



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ MONTÁŽNÍCH OPERACÍ ČLOVĚKA A KOLABORATIVNÍHO ROBOTY

VIRTUAL COMMISSIONING OF HUMAN AND COLLABORATIVE ROBOT ASSEMBLY OPERATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Richard Choleva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mikuláš Szabari, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Richard Choleva
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Mikuláš Szabari, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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

Virtuální zprovoznění montážních operací člověka a kolaborativního robota

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student navrhne robotické pracoviště pro vybranou montážní operaci. Montážní operace bude provedena kolaborativním robotem a člověkem současně. Student rozhodne o rozdělení operaci pro člověka a robota, přizpůsobí koncový efektor požadovaným operacím robota a pojedná o nastavení robota pro bezpečnou kolaboraci.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v dané oblasti.
Rozbor řešené problematiky.
Návrh pracoviště
Virtuální zprovoznění.
Návrh řízení a HMI.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

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

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

SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.

NOF, Shimon. Springer Handbook of Automation. Berlin: Springer, 2009. ISBN 978-3-540-78830-0.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá virtuálním zprovozněním robotického pracoviště pro vybrané montážní operace, které jsou prováděny člověkem a kolaborativním robotem současně. Teoretická část práce se zaměřuje na koncept Průmyslu 4.0, vývoj robotiky v průmyslu, kolaborativní roboty a virtuální zprovoznění. V praktické části je detailně rozebrána řešená problematika s výběrem ruční svítilny jako výrobku určeného k montáži. Následně je navrženo kolaborativní pracoviště, provedena jeho bezpečnostní analýza a virtuální zprovoznění. Nakonec je předloženo ekonomické zhodnocení projektu a dále nastíněno jeho možné využití v praxi.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the virtual commissioning of a robotic workstation for selected assembly operations that are performed by a human and a collaborative robot simultaneously. The theoretical part of the thesis focuses on the concept of Industry 4.0, the development of robotics in industry, collaborative robots and virtual commissioning. The practical part analyzes in detail the addressed issue, selecting a flashlight as the product for assembly. Subsequently, a collaborative workstation is designed, its safety is analyzed and following this it undergoes virtual commissioning. Finally, the economic evaluation of the project is presented and its potential practical applications are outlined.

KLÍČOVÁ SLOVA

Virtuální zprovoznění, kolaborativní robot, spolupráce mezi člověkem a robotem, bezpečnost, ruční svítilna

KEYWORDS

Virtual commissioning, collaborative robot, human-robot collaboration, safety, flashlight

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHOLEVA, Richard. *Virtuální zprovoznění montážních operací člověka a kolaborativního robota* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/161651>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Mikuláš Szabari.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu Ing. Mikuláši Szabari, Ph.D. za jeho vstřícný přístup, cenné rady a čas, který mi v průběhu psaní mé práce ochotně věnoval. Také děkuji mým blízkým, kteří mě při psaní této diplomové práce a v průběhu celého studia podporovali.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

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

V Brně dne 24.5.2024

.....

Choleva Richard

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Průmysl 4.0.....	17
2.2	Vývoj robotiky v průmyslu	20
2.3	Kolaborativní robotika	23
2.3.1	Spolupráce mezi člověkem a robotem (Human-Robot Collaboration)	24
2.3.2	Bezpečnost kolaborativních robotů	26
2.3.3	Vybavení kolaborativních robotů	28
2.3.4	Programování kolaborativních robotů	29
2.3.5	Přehled dostupných řešení.....	30
2.4	Virtuální zprovoznění	32
2.4.1	Řídicí systém	33
2.4.2	Nástroje pro virtuální zprovoznění	34
3	SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	35
3.1	Problémová situace	35
3.2	Formulace problému	35
3.3	Formulace cílů a řešení	35
3.4	Analýza výrobku.....	36
3.4.1	Popis svítilny	37
3.4.2	Postup montáže svítilny	39
4	NÁVRH KOLABORATIVNÍHO PRACOVÍŠTĚ	41
4.1	Kolaborativní robot a přizpůsobený koncový efektor	42
4.2	Pracovní židle	42
4.3	Pracovní stůl	43
4.4	Upínací přípravek	43
4.5	Zásobník na součásti svítilny	44
4.6	Box na součásti svítilny	44
4.7	Pracovní podložka.....	45
4.8	Páječka	45
5	BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZA	47
5.1	Požadavky právních předpisů EU.....	47
5.1.1	Legislativní požadavky	47
5.1.2	Normativní požadavky	48
5.1.3	Harmonizované normy.....	48
5.2	Systémová analýza robotického pracoviště.....	49
5.2.1	Základní blokový diagram pracoviště.....	49
5.2.2	Blokový diagram pracoviště.....	50
5.2.3	Definice nebezpečného prostoru pracoviště.....	51
5.3	Identifikace relevantních nebezpečí.....	51
5.4	Analýza významných nebezpečí	52
5.5	Přehled identifikovaných významných nebezpečí a odhad počátečního rizika .	53
5.6	Vyhodnocení bezpečnostní analýzy a snížení rizik	54
6	VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ	57
6.1	Příprava projektu	57
6.1.1	Založení projektu	57

6.1.2	RobotWare.....	58
6.1.3	Virtuální kontrolér	58
6.2	Tvorba pracoviště.....	58
6.2.1	Umístění komponent pracoviště	59
6.2.2	Definování mechanismů.....	60
6.2.3	Vytváření pracovních objektů	61
6.3	Logika pracoviště.....	61
6.3.1	Signály.....	61
6.3.2	Logická stanice	62
6.3.3	Tvorba událostí.....	62
6.3.4	Simulace procedur	63
6.4	Řízení	64
6.5	HMI.....	66
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	67
8	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI.....	69
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	77
10.1	Seznam zkratk a symbolů	77
10.2	Seznam tabulek	77
10.3	Seznam obrázků	78
11	SEZNAM PŘÍLOH	81

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou virtuálního zprovoznění robotického pracoviště pro vybrané montážní operace, kterých se účastní jak člověk, tak kolaborativní robot. V posledních desetiletích došlo k významným změnám v oblasti průmyslové výroby, které jsou spojené s nástupem čtvrté průmyslové revoluce, známé jako Průmysl 4.0. Tento koncept přináší integraci chytrých technologií a digitalizace do výrobních procesů, čímž zvyšuje efektivitu, flexibilitu a konektivitu výroby. Jedním z klíčových prvků této revoluce jsou právě kolaborativní roboty, které umožňují bezpečnou a efektivní spolupráci člověka a robota. Kolaborativní roboty představují významný pokrok v oblasti robotiky, kde se tradiční průmyslové roboty pohybovaly v oddělených a zabezpečených zónách, zatímco lidé pracovali mimo jejich dosah. Kolaborativní roboty jsou navrženy tak, aby pracovaly přímo vedle lidských operátorů bez nutnosti fyzických bariér, což otevírá nové možnosti pro optimalizaci a zefektivnění výrobních procesů.

Teoretická část práce představí zmíněný koncept Průmyslu 4.0, vývoj robotiky v průmyslu, kolaborativní roboty a virtuální zprovoznění. Praktická část je věnována problematice virtuálního zprovoznění robotického pracoviště s konkrétním vybraným produktem určeným k montáži (ruční svítilna) a rozdělení úkolů mezi kolaborativního robota a člověka. Součástí praktické části je návrh kolaborativního pracoviště, provedení jeho bezpečnostní analýzy, a nakonec virtuální zprovoznění. Závěr praktické části pak předkládá ekonomické zhodnocení projektu a nastiňuje jeho možná využití v praxi.

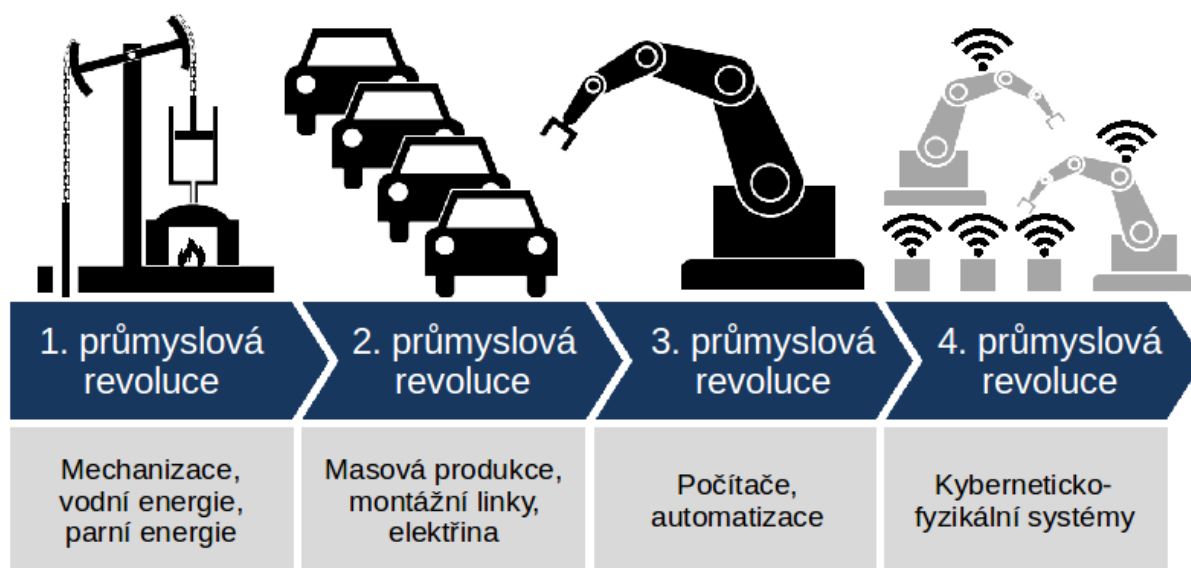
V práci je demonstrováno, jak mohou kolaborativní roboty zlepšit výrobní procesy konkrétním a praktickým způsobem. Ukazuje nejen technické aspekty a bezpečnostní opatření při integraci kolaborativních robotů, ale také ekonomické výhody a možnosti jejich reálného nasazení ve výrobě. Čtenáři se dozví o optimálním rozdělení úkolů mezi člověkem a robotem a o důležitosti bezpečnostní analýzy v kolaborativních prostředích. Samotné virtuální zprovoznění je zde prezentováno jako efektivní nástroj pro testování a zlepšení výrobních procesů před jejich implementací v reálném světě. Výsledky této práce mohou sloužit jako model pro implementaci kolaborativních robotů v dalších průmyslových aplikacích, což může přispět k rozvoji moderní a efektivní výroby.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato kapitola se zaměřuje na současný stav poznání v oblasti kolaborativních robotů. Podrobněji se zabývá jejich funkcí, bezpečností, vybavením, programováním, ale i způsoby spolupráce či přehledem dostupných řešení. Kromě toho se dotýká čtvrté průmyslové revoluce, vývoje robotiky v průmyslu a virtuálního zprovoznění.

2.1 Průmysl 4.0

Průmysl 4.0, známý také jako Čtvrtá průmyslová revoluce, následuje po třech předešlých průmyslových revolucích (Obr. 1), které vždy vedly k zásadním změnám modelu v oblasti výroby. Mezi tyto změny patří přechod na nový zdroj energie v podobě vody a vodní páry, hromadnou výrobu v montážních linkách a automatizaci pomocí informačních technologií. První průmyslová revoluce, jejíž počátek je datován ke konci 18. století, představila vodu a vodní páru jakožto nový energetický zdroj, který v mnoha oblastech výrazně snížil potřebu využívat lidskou a zvířecí sílu. Tento pokrok byl využit i v zemědělství a přinesl výrazný rozvoj tohoto odvětví. Přibližně o sto let později přišla Druhá průmyslová revoluce se zavedením montážních linek. Také se začala hojně využívat ropa, plyn a elektřina, což s využitím vyspělejších komunikačních prostředků jako jsou telefon či telegraf, vedlo k sériové výrobě a určitému stupni automatizace ve výrobních procesech. V druhé polovině 20. století následovala Třetí průmyslová revoluce, kdy se počítače, pokročilá sdělovací technika a analýza dat staly nedílnou součástí všech výrobních procesů. Do strojních zařízení se začaly instalovat programovatelné logické automaty (PLC), což mělo za následek zautomatizování některých procesů a ulehčení sběru a sdílení dat. Nyní žijeme v době Průmyslu 4.0, jenž je charakterizován jako transformace prostřednictvím digitalizace a automatizace všech částí podniku a výrobního procesu. Mezinárodní firmy, které tento koncept přijmou, si zajistí lepší konkurenční postavení na dnešním trhu. [1] [2]

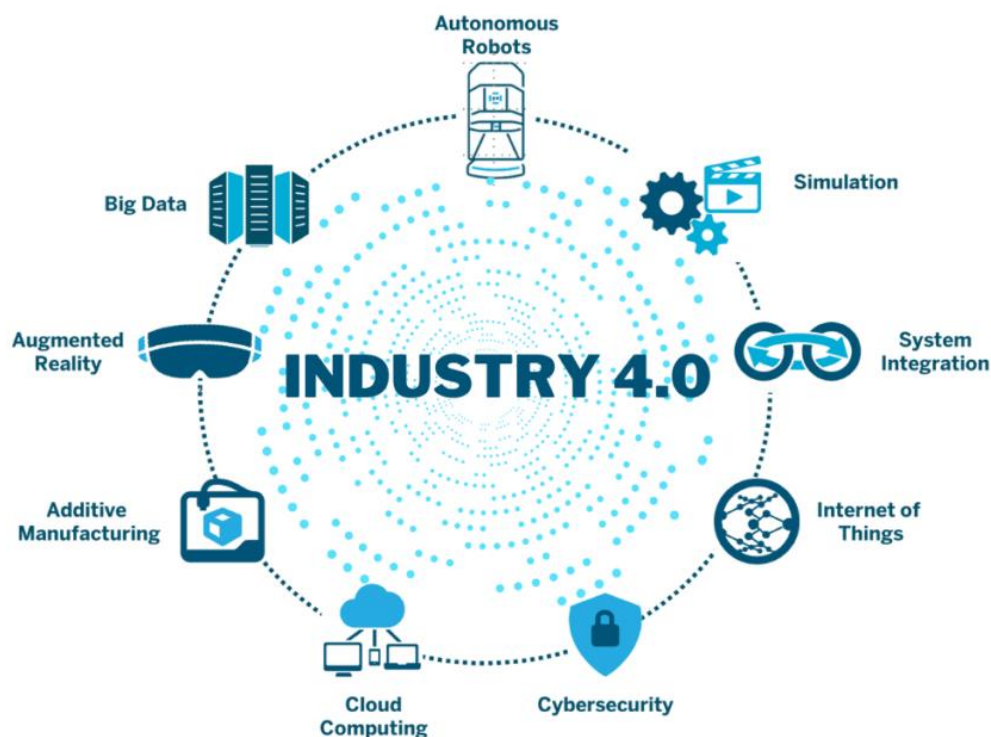


Obr. 1) Průmyslové revoluce a jejich inovace [3]

Průmysl 4.0 byl veřejnosti poprvé představen v roce 2011 na strojírenském veletrhu v německém Hannoveru. Ve chvíli, kdy myšlenka další průmyslové revoluce zazněla, řada evropských firem a výzkumných pracovníků tento koncept přijala za účelem docílit efektivnější a méně nákladné výroby. Toho lze dosáhnout díky snadné výměně informací a integrovaným řízením výrobních produktů a strojů, které jsou v rámci interoperability schopny vzájemně spolupracovat. Digitalizace výroby je umožněna zejména prostřednictvím snímačů zabudovaných ve většině strojních zařízeních. Také je důležité poznamenat, že vývoj světového průmyslu je mnohem rychlejší a má dokonce i větší dopad než během jakékoliv předešlé průmyslové revoluce. To je zapříčiněno analýzou souvisejících dat v rámci všudypřítomného systému s fúzí digitálních dat a fyzických objektů. [1]

Průmysl 4.0 lze strukturovat do tří základních složek: horizontální integrace, vertikální integrace a inženýrská integrace. Horizontální integrace představuje myšlenku vzájemné spolupráce a konkurence společností vyznačující se podobnými vlastnostmi, za cílem dosáhnout efektivního výrobního systému. Co se týče integrace vertikální, ta spočívá ve vytvoření hierarchických subsystémů na výrobní lince, aby byla linka vysoce flexibilní a dala se snadno konfigurovat. Inteligentní stroje jsou díky této konfiguraci schopny vytvořit automatizovaný řídicí systém, jenž se dokáže automaticky rekonfigurovat v závislosti na typu produktu. Poslední složku představuje integrace během celého procesu tvorby hodnoty produktu zahrnující tyto aspekty: vyjádření požadavků zákazníka, vývoj a design výrobku, recyklace, výrobní inženýrství, výrobní služby, plánování výroby a údržba. Každou fázi této integrace je možné použít opakovaně pro stejný typ výrobku. Použitím příslušného softwaru během procesu lze předpovědět, jak ovlivní návrh produktu služby a výrobu, přičemž bude zajištěna přizpůsobitelnost daného produktu. [1]

Základy Průmyslu 4.0 jsou tvořeny devíti technologickými pokroky (Obr. 2) [1] [4] [5]:



Obr. 2) Technologické nástroje Průmyslu 4.0 [6]

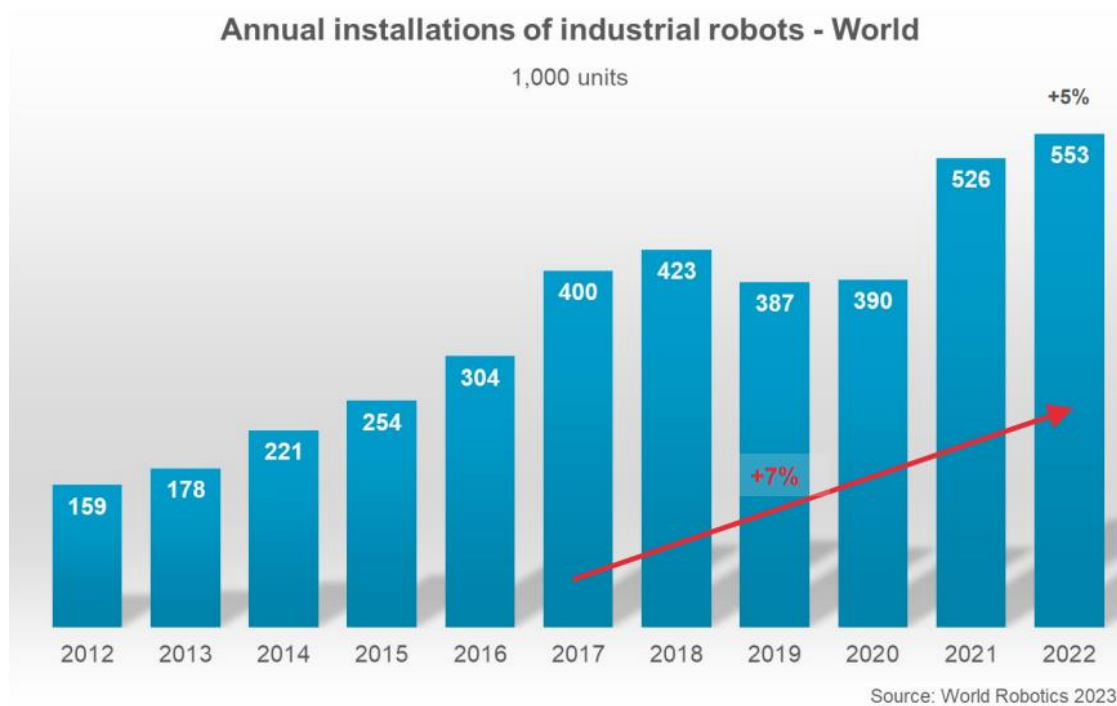
- 1) **Big Data** – Hlavní roli ve snaze usnadnit rozhodování v reálném čase hraje sběr a komplexní vyhodnocování dat, která pochází z široké škály různých zdrojů. Analýza zaznamenaných dat slouží k odhalení hrozeb, jež se vyskytly v různých výrobních procesech, ale také k předpovědi hrozeb nových. Analýza také objevuje možnosti, jak těmto nebezpečím předcházet. Společnost Forrester charakterizovala Big Data pomocí čtyř prvků, jimiž jsou: objem dat, rozmanitost dat, rychlost vytváření nových dat a jejich analýza, hodnota dat.
- 2) **Autonomní roboty** – Autonomní roboty, které prezentuje doba čtvrté průmyslové revoluce, dokážou pracovat s minimálním lidským zásahem. Hlavní rozdíl je možné vidět na jejich velikosti a funkci, což si lze představit kupříkladu na dronu pro skenování zásob či mobilním robotu provádějícím operace typu pick and place (vzít a umístit). Vyspělý software, umělá inteligence, senzory a strojové vidění jsou důvodem, proč tyto roboty nemají problém i s těmi nejtěžšími úkoly. Také je třeba uvést jejich schopnost jednat na základě informací, které obdrží ze svého okolí.
- 3) **Simulace** – Simulace je proces modelování reálného nebo virtuálního procesu či systému za účelem porozumět jeho chování. Skutečný svět je v simulaci vyobrazen prostřednictvím dat v reálném čase, přičemž tvoří tzv. simulační model zahrnující stroje, lidi a produkty. Díky simulaci je tedy možné optimalizovat nastavení strojů ještě před uvedením do provozu, což urychluje jejich seřízení a zlepšuje kvalitu.
- 4) **Systémová integrace** – Systémová integrace a její rozdělení bylo již popsáno detailněji pár odstavců zpět, ve zkratce se však jedná o propojení různých oblastí průmyslu za cílem dosáhnout optimalizovaných výrobních procesů.
- 5) **Internet věcí (IoT)** – IoT umožňuje pokročilé propojení systémů, služeb, fyzických objektů s tím, že zajišťuje mezi objekty vzájemnou komunikaci a sdílení dat. To vše pomocí senzorů a radiofrekvenčních identifikátorů, které poskytují data v reálném čase o stavu, výkonu či poloze těchto objektů.
- 6) **Kybernetická bezpečnost** – Obrana proti kybernetickým útokům je v důsledku nárůstu konektivity a využívání velkých souborů dat velmi důležitá. Způsoby, jak hrozby odhalit, předcházet jim či na ně reagovat je možné zautomatizovat například využitím bezpečnostního modelu Zero Trust nebo technologií jako jsou strojové učení či blockchain.
- 7) **Cloud Computing** – Většina moderních technologií jako je kupříkladu umělá inteligence, strojové učení nebo IoT, se v dnešní době opírá o cloudové technologie. Cloud poskytuje místo pro ukládání dat, přičemž jej kyberneticko-fyzické systémy využívají ke komunikaci a koordinaci v reálném čase.
- 8) **Aditivní výroba** – Aditivní výroba, jinými slovy 3D tisk, je způsob výroby součástí, kdy se vrstvu po vrstvě postupně nanáší nový materiál. Mezi výhody 3D tisku patří jednoznačně možnost uchovávat návrhy výrobků v podobě souborů s tím, že jejich tisk proběhne až na vyžádání. Sníží se tak náklady i potřeba přemístit výrobu do zahraničí.
- 9) **Rozšířená realita** – Rozšířená realita slouží k propojení digitálního světa se světem skutečným. Do reálného prostředí je tedy možné pomocí chytrých brýlí nebo mobilních zařízení promítat například digitalizované součásti, školení či instrukce pro opravu a montáž.

2.2 Vývoj robotiky v průmyslu

Ještě před nástupem robotů bývaly doby, kdy továrny používaly technologie v podobě extrémního vytápění a chlazení, těžké stroje či strojní zařízení znečišťující okolní prostředí kouřem a úniky oleje, což lidské pracovníky vystavovalo nepřetržitému nebezpečí. Po většinu času vykonávali zaměstnanci ve výrobních linkách zdoluhavou, vyčerpávající práci, která se neustále opakovala (lepení, svařování, zatloukání). To mohlo vést k poklesu soustředění s následkem až smrtelné nehody. Po druhé světové válce však došlo k rozmachu automobilového průmyslu společně s rozvojem výpočetní techniky, což umožnilo robotům proniknout do světa průmyslu. Počítač měl totiž schopnost řídit pohyby robotu a to tak, aby byl každý jeho krok stejný, čímž byl i každý výrobek jednotný. [7]

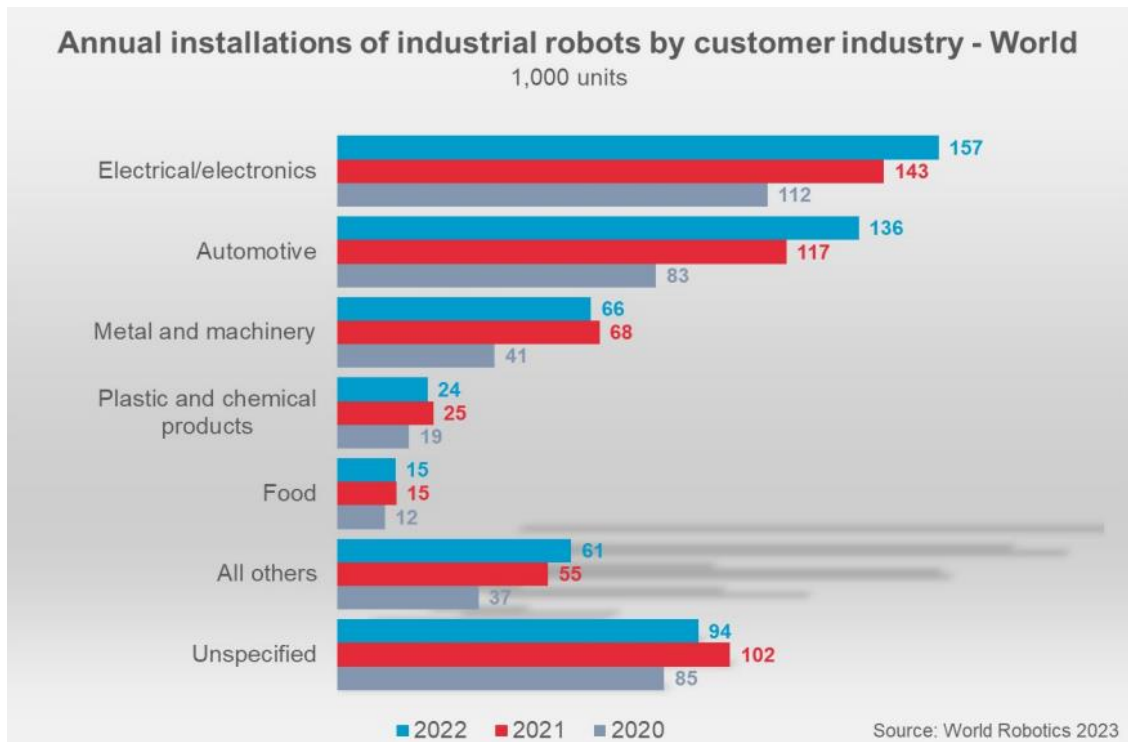
V 50. letech 20. století Joseph F. Englberger společně s Georgem Devolem sestrojili první průmyslový robot – Unimate. Toto dvoutunové zařízení, jež bylo uvedeno do provozu v roce 1961 ve výrobní hale General Motors, původně sloužilo k odebírání automobilových dílů a následně k jejich pokládání na dopravní pás. Robot nemohl interagovat s jiným pracovním prostorem, uměl pouze přesně vykonávat tu samou činnost, kterou mu udělil jeho základní program. Nadešla tak éra, kdy nezáživná, repetitivní či silově náročná práce mohla být přenechána průmyslovým robotům. [8] [9]

Od té doby sice došlo k mnoha pokrokům ve světě robotiky, nicméně průmyslové roboty se za posledních 50 let vzhledem velmi neliší. Stále to jsou klouby spojené úseky tuhého materiálu s nástrojem na konci. Senzory jsou lepší, koncové efekty přesnější a materiály uživateli přívětivější, hlavním rozdílem jsou ovšem inovace, které lidské oko nevidí: Data, cloud computing a v neposlední řadě IoT. Díky těmto technologiím může zařízení, jeho část nebo dokonce celá továrna podávat informace o svém stavu. Počet instalovaných průmyslových robotů každým rokem stoupá, což zachytila Mezinárodní federace robotiky ve zprávě z letošní tiskové konference, kde uvedla 5% nárůst od roku 2021 (Obr. 3). [7] [10]



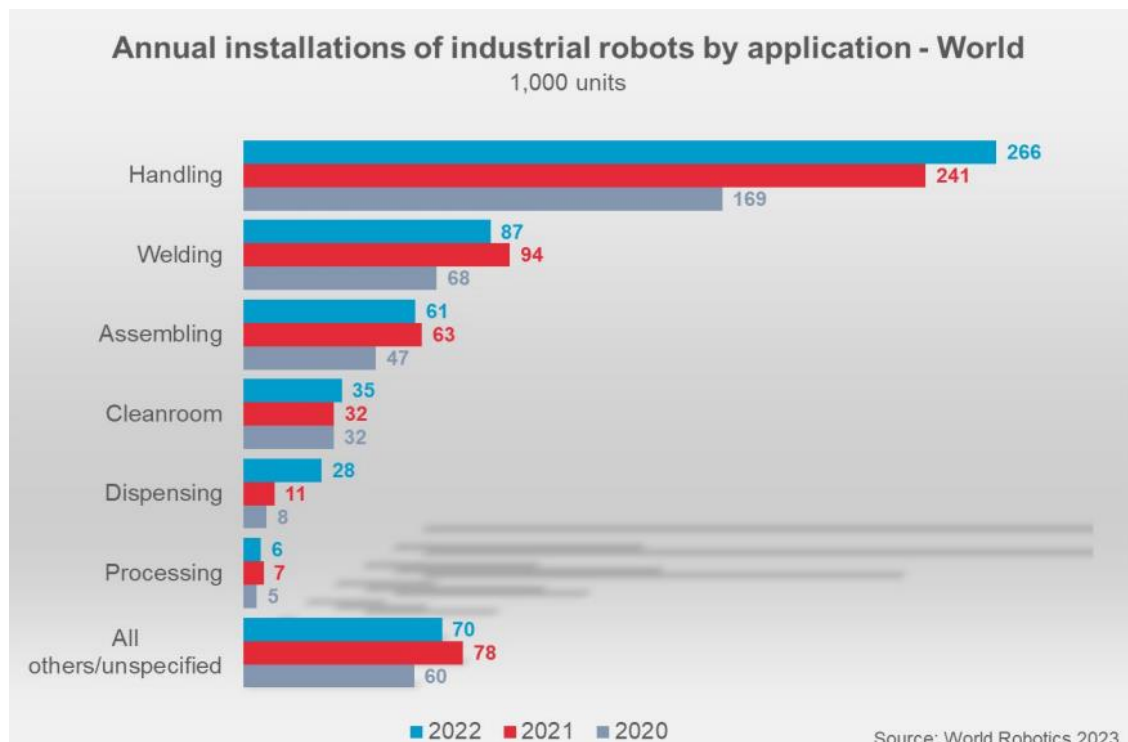
Obr. 3) Počet nainstalovaných průmyslových robotů za daný rok [11]

Ačkoliv své uplatnění našly roboty nejdříve ve výrobě aut, jejich popularita roste také v elektrotechnice, kde již třetím rokem zaznamenaly nejvyšší počet instalací (Obr. 4). [8] [10]



Obr. 4) Počet nainstalovaných průmyslových robotů podle odvětví [12]

Co se týče způsobu využití, roboty stále registrují nejvíce zprovoznění za účelem manipulace s materiálem (Obr. 5). Dále následuje svařování a montážní činnost. [10]

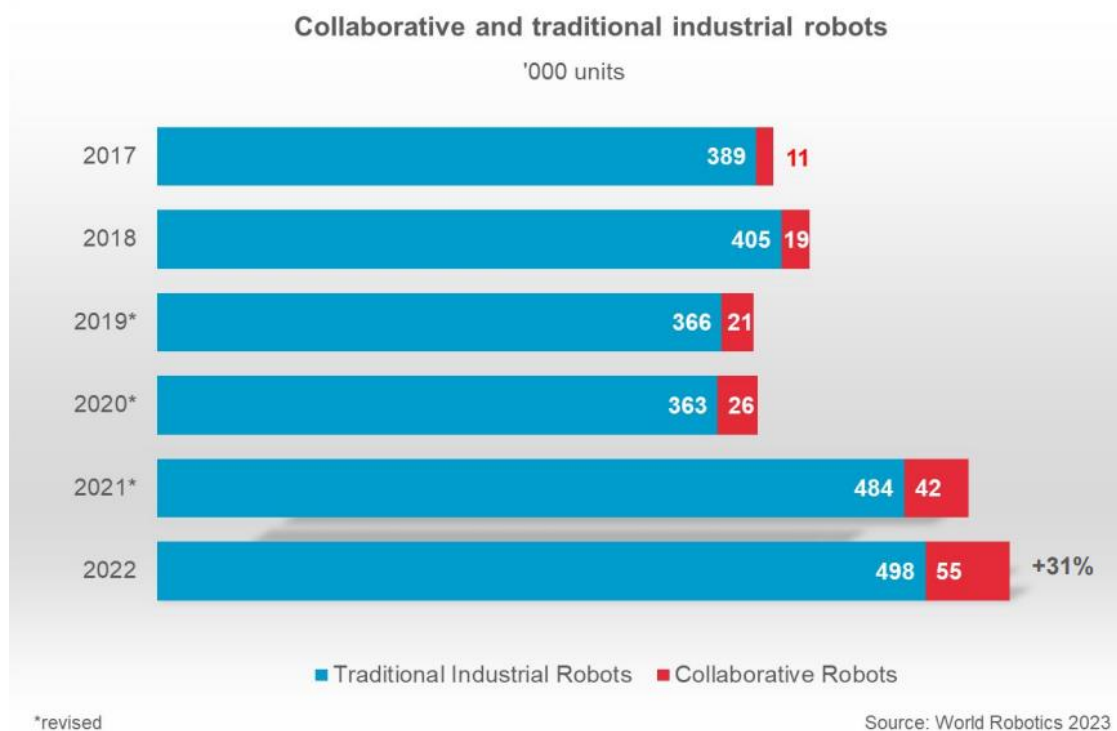


Obr. 5) Počet nainstalovaných průmyslových robotů podle použití [13]

Není to tak dávno, co se na trhu objevil nový typ robotů, který se od svých předchůdců liší jednou zásadní věcí – schopností pracovat po boku člověka. Tím pádem není nutné tyto roboty, jež nazýváme kolaborativní, izolovat od lidských pracovníků za použití mechanických nebo optických zábran pro zmenšení pravděpodobnosti, že by se robot porouchal a tím způsobil nějaká zranění. Kolaborativní roboty mohou pracovat v blízkosti člověka, ba dokonce s ním v přímém kontaktu, protože využívají moderní technologie, mezi než patří klouby s omezením síly a počítačové vidění pro rozpoznání lidské přítomnosti v pracovním prostoru. Obecně bývají o poznání menší a lehčí než jejich tradiční průmysloví kolegové, snadno se dají přemístit a naprogramovat k vykonávání specifických úkolů. [7] [9]

Kolaborativní roboty, zkráceně koboty, zpočátku postrádaly vlastní zdroj energie. Staraly se výhradně o řízení trajektorie a odlehčení pouze části hmotnosti přemísťovaného předmětu, zatímco člověk poskytoval zbytek síly potřebné pro jeho pohyb. V dnešní době jsou už koboty schopny precizně manipulovat s objekty samy, přičemž zvládnou shromažďovat a poskytovat informace o svém okolí. [9]

Lidé se s kolaborativními roboty při spolupráci vzájemně doplňují. Lze konstatovat, že společně nabízejí dovednosti, kterých by jeden bez druhého nebyl schopen. Důsledkem je pak lepší a rychlejší výroba. V posledních letech vykazuje kolaborativní robotika rychlý vývoj, což se také projevuje na počtu nainstalovaných kobotů – rok 2022 zaznamenal až 31% nárůst oproti roku 2021. Přesto se jedná pouze o malý zlomek v porovnání s tradičními průmyslovými roboty (Obr. 6). [9] [10]



Obr. 6) Počet nainstalovaných průmyslových/kolaborativních robotů [14]

2.3 Kolaborativní robotika

Kolaborace není až tak úplně o prováděném úkolu, nýbrž o vlastnostech robotu, které jej činí bezpečným a užitečným pro práci v blízkosti člověka. Tento robot je označován jako kolaborativní a dle patentu US5952796A se jím rozumí: „Přístroj a metoda pro přímou fyzickou interakci mezi člověkem a univerzálním manipulátorem řízeným počítačem.“ [15] Kobot a člověk mohou společně sdílet fyzický prostor (např. pracovní buňku, stanici, pracovní stůl) a simultánně zde pracovat na téže úloze. Na trhu se objevuje řada kolaborativních robotů, které již splňují požadavky pro konkrétní aplikace bez nutnosti jakýkoliv úprav. Nicméně většinu z nich lze přizpůsobit dle potřeby pomocí příslušenství a nástrojů, jako jsou kamerové systémy, přísavná chapadla či svařovací hroty. Jejich flexibilita z nich dělá vhodnou investici pro malé až střední podniky, a to především pro ty, jež vyrábí v režimu High-Mix Low-Volume (HMLV) a Just-in-Time (JIT). HMLV reprezentuje velké střídání typu obrobků v malých sériích, JIT zajištění dodávky materiálu do výroby tak, že bude k dispozici vždy při potřebě použití ve výrobním procesu. Flexibilita kobotů pramení z možnosti rychlého přepínání mezi úlohami prostřednictvím intuitivního grafického rozhraní nebo také z nenáročného programování, kdy je v některých případech možné použít ruční vedení ramene a ukázat tak kobotu, jak daný úkol provést. [15] [16] [17] [18]

Kolaborativní roboty bývají obvykle kompaktní, takže je lze po výrobní hale přesouvat a umístit kupříkladu na pracovní stůl nebo robustní vozík. Větší varianty se dají přimontovat na podlahu, stěnu či strop s ohledem na druh využití. Koboty jsou dostupné v mnoha velikostech s tím, že nabízí širokou škálu nosností, dosahů a provozních rychlostí. Nosnost se většinou pohybuje v rozmezí 3 až 16 kg (nicméně společnost FANUC přišla s modelem schopným unést až 35 kg) a rameno typicky dosáhne do 500 až 900 mm. Jejich rychlost závisí na vzdálenosti od člověka, ale ve většině případů operují rychlostí 1 m/s nebo méně, přičemž mohou dovést rychlosti až 1,5 m/s (nutno podotknout, že v těchto místech jejich tradiční průmysloví kolegové dokážou vyvinout rychlost až 3 m/s, ne-li více). Téměř všechny modely jsou šestiosé, což přináší sofistikovaný pohyb mezi okolními objekty. [15]

Smyslem kolaborativních robotů není lidské pracovníky zcela nahradit, ale spíše je ušetřit od nezáživné a repetitivní činnosti, která by mohla vést k chybám a zraněním. Malé rozměry a obratnost z nich dělá skvělá řešení pro práci s drobnými díly nebo komplikovaným umístěním. Jejich využití nalezneme zkrátka u takových úkolů, které se běžně provádí u pracovních stolů a ve výrobních halách. Mezi ně patří operace typu pick and place, dokončování (např. broušení, leštění), kontrola kvality, montáž a mnoho dalších. [15]

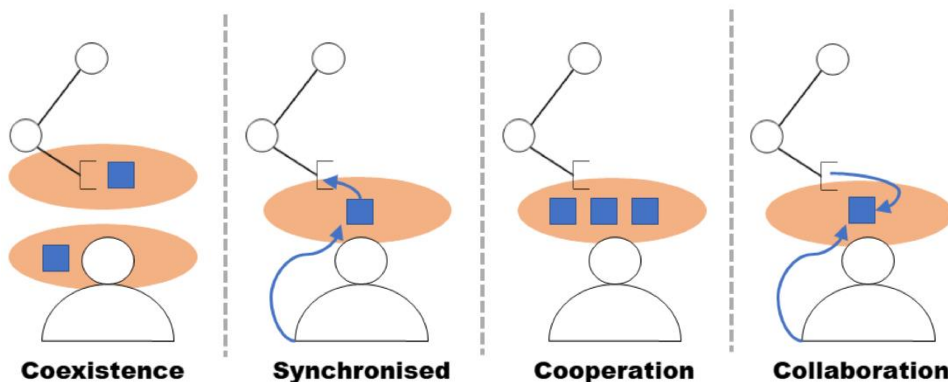
Co se týče návratnosti investic, koboty prokázaly schopnost získat investované peníze zpět rychleji než konvenční průmyslové roboty, a to zejména díky výrazně nižším počátečním nákladům. Koboty jsou totiž menších rozměrů a obvykle nevyžadují tolik technických znalostí a času na instalaci, programování a údržbu. Na trhu se objevuje spousta modelů, jež se dá pořídit za méně než 900 000 Kč. Je ovšem nutné zmínit, že konečná cena pravděpodobně vyšplhá výš z důvodu dalších nákladů jako jsou nástroje, příslušenství, chapadla, nebo v některých případech, nájem systémového integrátora pro efektivní integraci kobotu do výrobního procesu. Kolaborativní robot má na výrobu přímý a nepřímý vliv. Přímý dopad lze pozorovat během několika měsíců a může se jednat o situaci, kdy kobot urychlí výrobu, což povede k vyššímu prodeji nebo možnosti plnit větší zakázky a tím i k vyšším tržbám. Nepřímý dopad může představovat snížení prostojů, jež byly dříve zapříčiněny únavou nebo zraněním pracovníků. [15] [16]

2.3.1 Spolupráce mezi člověkem a robotem (Human-Robot Collaboration)

Důvodů, proč by měli lidé začít spolupracovat s roboty, existuje hned několik. Jedná se například o zlepšení ergonomie, což hraje důležitou roli především u starších pracovníků, kteří už nejsou tak obratní a pociťují dopady stání či zvedání břemen již na začátku směny. Dalším důvodem je zlepšení kvality a efektivity výroby v důsledku kombinace těch nejlepších dovedností člověka a robota. Nakonec dochází i k úspoře času a prostoru. [15] [19]

Interakce mezi člověkem a robotem výrazně podléhá několika faktorům, mezi něž patří vykonávaný úkol, sdílený pracovní prostor, míra kontaktu mezi člověkem a robotem, ale i pořadí a načasování souvisejících procesů. Na základě těchto poznatků rozlišujeme čtyři základní interakce (Obr. 7) [20]:

- **Koexistence** – Jedná se o způsob interakce, kdy pracovník a robot plní rozličné úkoly v jiném pracovním prostředí za absence fyzických zábran. Příkladem může být situace, kdy má robot na starost zvedání těžkých břemen a montáž, přičemž zaměstnanec na vše dohlíží a kontroluje kvalitu.
- **Synchronizace** – V tomto případě využívá člověk a robot společný pracovní prostor, avšak své úkoly vykonávají postupně v různých časech. Oba jdou za stejným cílem a komunikují přitom formou pokynů a zpětné vazby. Například může obsluha zásobovat stroj materiálem, během čehož robot realizuje výrobní proces. Vše musí probíhat synchronizovaně, aby bylo docíleno správného naložení stroje bez přerušení výroby.
- **Kooperace** – Lidský operátor a robot pracují v rámci této interakce současně za stejným účelem. Ačkoliv spolu sdílí pracovní prostředí a k informacím o úkolu se mohou dostat skrze stejné technologické prostředky, každý z nich má své vlastní zájmy a do práce si nezasahují. Jako příklad lze uvést práci ve skladu, kde je zaměstnanci přiděleno řízení zásob a plnění objednávek, mezitímco se robot věnuje manipulaci s materiálem a jeho přepravě.
- **Kolaborace** – Tento vztah je založen na synergii mezi člověkem a robotem. Oba úzce spolupracují ve stejnou dobu v tom samém pracovním prostoru, aby dosáhli společného cíle. Mezi účastníky dochází k interakci fyzické nebo bezkontaktní (např. řeč, gesta, mrkání). Fyzická lze uskutečnit díky měření sil a krouticích momentů, bezkontaktní prostřednictvím pokročilých snímacích technologií (např. strojové vidění, haptická odezva). Může se například jednat o montáž těžké součásti, kdy je úkolem robota zvedat a přesně polohovat jednotlivé díly, zatímco je obsluha umisťuje a činí rozhodnutí.

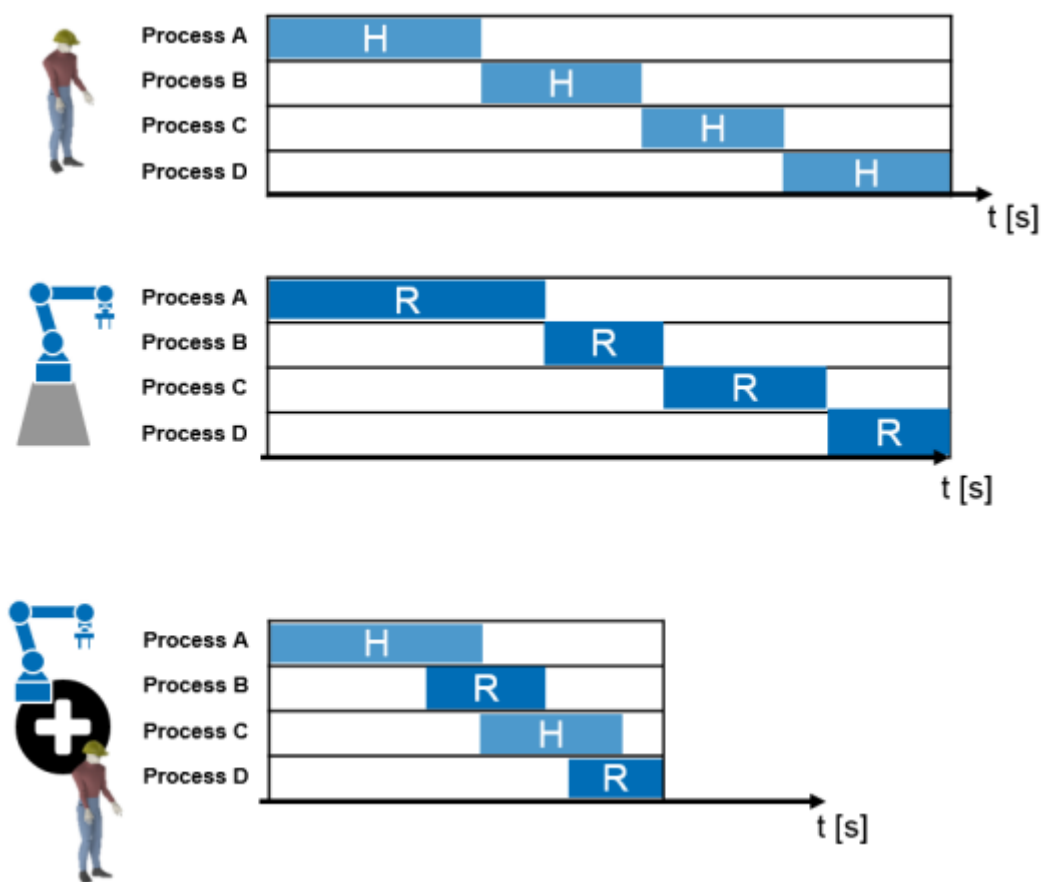


Obr. 7) Typ spolupráce mezi člověkem a robotem [21]

Nedílnou součástí implementace HRC na pracovišti je rozpoznání aplikací, které budou ze spolupráce člověka a robota těžit. Tyto aplikace je možné identifikovat kupříkladu použitím metody zvané **Skill based task sharing**, kdy se v podstatě jedná o rozdělování úkolů na základě dovedností s tím, že výsledkem by měla být jejich efektivní kombinace. [19]

Postup zmíněné metody začíná rozčleněním výrobního procesu na jednotlivé operace. Načež jsou porovnány dovednosti člověka a robota za účelem zjistit, kdo je schopný provést danou operaci rychleji. Adekvátní kombinace vede k výraznému zkrácení délky výrobního procesu (Obr. 8). Jednotlivé operace však mohou být přiděleny také s ohledem na zlepšení ergonomie a kvality samotné činnosti. Nicméně je důležité poznamenat, že tato metoda nejlépe funguje za předpokladu, že člověk a robot pracují na úkolu simultánně. V opačném případě by totiž docházelo ke ztrátě času a poklesu produktivity kvůli čekání jednoho na druhého, než svou úlohu dokončí. [19]

Roboty disponují výhodou nepřetržité efektivity nehledě na okolní události. Na druhou stranu, aby lidé zůstali efektivní, musí být ideálně vytíženi. Ve chvíli, kdy mají práce moc nebo naopak málo, jejich efektivita kolísá. Roboty jsou navíc silnější, přesnější a vykazují stabilní výkon, který se u lidí během dne může měnit. Avšak mezi lidské přednosti patří citlivost rukou či možnost pohybem jednoduše rozšířit svůj pracovní prostor, který je u robotu přesně vymezen vzhledem k jeho upevnění. Zmíněné rozdíly pak hrají roli v rozhodování během přidělování jednotlivých úloh. [19]



Obr. 8) Časová efektivita v rámci HRC [22]

2.3.2 Bezpečnost kolaborativních robotů

Kolaborativní roboty se vyznačují hned několika bezpečnostními rysy, díky kterým jsou vhodné pro HRC aplikace. V zásadě řadíme jejich bezpečnostní prvky do čtyř hlavních kategorií: vnitřní senzory, vnější senzory, design robotu a návrh procesu. Úkolem vnitřních senzorů, jež jsou zabudovány v kloubech kobotu, je snímat okolní síly a kroutící momenty a následně je porovnat s daty simulovanými v řídicí jednotce robotu. Ve chvíli, kdy naměřené hodnoty překročí hodnoty simulované, robot neprodleně zastaví. Aby šlo kolizi zcela předejít, využívají se vnější senzory například pro měření kapacity. Ty jsou schopné v závislosti na změně kapacity zaznamenat v jejich blízkosti přítomnost vodivého či nevodivého objektu. Robotu je tedy umožněno zpomalit nebo zastavit ještě před fyzickým kontaktem s lidským tělem. Pokud se střetu nelze vyhnout, hraje důležitou roli design robotu. Ten by měl být opatřen uzavřenými a zaoblenými hranami, přičemž mezery mezi klouby by měly být dostatečně velké, aby nedošlo ke skřípnutí (např. prstu). Mimo to polstrování a použití plastu namísto kovového materiálu výrazně sníží tlak během kolize. Také samotný návrh procesu je velice důležitý pro bezpečnost na pracovišti. V místech, kde hrozí fyzický střet člověka s robotem, je nutné redukovat maximální sílu nárazu, a to buď snížením nosnosti, anebo rychlosti robotu. [19]

O požadavcích na bezpečnost průmyslových robotů a jejich integraci pojednávají normy ISO 10218-1 a ISO 10218-2. Konkrétně druhá jmenovaná norma se v jedné své části věnuje provozu kolaborativních robotů, kde jej popisuje jako zvláštní druh operace mezi člověkem a robotem sdílejícím stejný pracovní prostor. Chybí zde ale zmínka o tom, kdy pracovní prostor sdílejí a co v tu dobu dělají. Proto v roce 2016 vyšla technická specifikace ISO/TS 15066 doplňující zmíněné normy. Ta definuje čtyři provozní režimy, které mohou být uplatněny pro bezpečnou kolaborativní operaci, a to buď samostatně anebo v kombinaci. [23]:

- **Bezpečnostní monitorované zastavení** – Jestliže se člověk s robotem nachází ve společném pracovním prostoru, robot je bezpečně zastaven, avšak zůstává pod proudem. Pokud pracovník prostor opustí, robot se automaticky rozběhne.
- **Ruční vedení** – V rámci tohoto režimu může operátor pohybovat ramenem robotu a naučit ho tak konkrétní dráhy pohybu, anebo si tak nechat odlehčit práci s těžkým břemenem. Na tuto metodu je však kladeno mnoho požadavků, jako je kupříkladu maximální povolená rychlost a zatížení. Je potřeba počítat i s tím, že ruční vedení funguje pouze v případě aktivního bezpečnostního monitorovaného zastavení nebo omezení výkonu a síly.
- **Monitorování rychlosti a polohy** – Tato metoda představuje změnu rychlosti robotu v závislosti na vzdálenosti od člověka. S přiblížením pracovníka robot zpomaluje až do úplného zastavení, při jeho vzdálení opět zrychluje. K realizaci tohoto řešení je potřeba pokročilá snímací technologie (např. bezpečnostní laserový skener), monitorování bezpečné rychlosti a složité programování. Také by nemělo chybět ochranné zastavení, pokud není použita metoda omezení výkonu a síly.
- **Omezení výkonu a síly** – Tento provozní režim připouští záměrný i nezáměrný fyzický kontakt mezi člověkem a robotem. Podle ISO/TS 15066 může nastat kontakt kvazi-statický (sevření části těla mezi robotem a okolním povrchem, důležitou roli zde hraje síla a tlak), anebo přechodný (dynamický náraz robotu do části těla bez sevření, podstatná je setrvačnost a relativní rychlost). Technická specifikace dále ve své příloze uvádí tabulku (obr. 9), kde rozděluje tělo na 29 částí a k nim přiřazuje maximální povolený tlak a sílu pro oba kontakty.

Oblast těla	Konkrétní část těla		Kvazi-statický kontakt		Přechodný kontakt	
			Max. dovolený tlak p_s [N/cm ²]	Max. dovolená síla N	Násobitel max. dovoleného tlaku p_T	Násobitel max. dovolené síly F_T
Lebka a čelo	1	Střed čela	130	130	Nelze použít	Nelze použít
	2	Spánek	110		Nelze použít	
Obličej	3	Žvýkáci sval	110	65	Nelze použít	Nelze použít
Krk	4	Krční sval	140	150	2	2
	5	Sedmý krční obratel	210		2	
Záda a ramena	6	Ramenní kloub	160	210	2	2
	7	Pátý bederní obratel	210		2	2
Hrudník	8	Prsní kost	120	140	2	2
	9	Prsní sval	170		2	
Břicho	10	Břišní sval	140	110	2	2
Pánev	11	Pánevní kost	210	180	2	2
Paže a loketní klouby	12	Deltový sval	190	150	2	2
	13	Pažní kost	220		2	
Předloktí a zápěstní klouby	14	Vřetenní kost	190	160	2	2
	15	Sval předloktí	180		2	
	16	Pažní nervy	180		2	
Ruce a prsty	17	Bříško ukazováčku D	300	140	2	2
	18	Bříško ukazováčku ND	270		2	
	19	Koncový kloub ukazováčku D	280		2	
	20	Koncový kloub ukazováčku ND	220		2	
	21	Svaly dlaně	200		2	
	22	Dlaň D	260		2	
	23	Dlaň ND	260		2	
	24	Hřbet ruky D	200		2	
	25	Hřbet ruky ND	190		2	
Stehna a kolena	26	Stehenní sval	250	220	2	2
	27	Čěška	220		2	
Dolní končetiny	28	Střed holeně	220	130	2	2
	29	Lýtkový sval	210		2	

Obr. 9) Biomechanické limity [24]

Aby bylo zřejmé, že kolaborativní pracoviště dodržuje všechny bezpečnostní zásady a je tak připraveno pro uvedení do provozu, musí nést označení CE (Conformité Européenne). Postup k obdržení CE certifikace sestává z několika důležitých kroků, přičemž jedním z nich je posouzení rizika, kterým se zabývá norma ČSN EN ISO 12100 celým názvem Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika. Tato norma se mimo jiné zaměřuje na postupy pro identifikaci nebezpečí či odhad a hodnocení rizika v konkrétních etapách životního cyklu zařízení, na což navazuje postupem, jak nebezpečí odstranit a riziko dostatečně snížit. V rámci posuzování rizika je nutné brát v potaz i okolní prostředí kolaborativního robotu. Například ostré hrany vyskytující se na pracovišti by mohly při střetu robotu s člověkem způsobit vážná zranění. Z toho důvodu je na posouzení rizika nahlíženo jako na celkové ověření. Snížení rizika pouze u jednotlivých částí totiž nezajistí snížení rizika pro celý systém. [19]

2.3.3 Vybavení kolaborativních robotů

Kolaborativním robotům je k dispozici široká škála vybavení, které jim umožňuje plnit nejrůznější úkoly. Mimo jiné zde spadají chapadla (grippers), nástroje (End Of Arm Tooling) či kamerové systémy [25]:

- **Grippers** – Pomocí těchto koncových efektorů dokáže robot manipulovat s předměty. Nabízí se jich mnoho druhů, přičemž každý disponuje specifickými vlastnostmi. Kupříkladu se mezi ně řadí grippers prstové (Obr. 10a), vakuové (Obr. 10b) a magnetické (Obr. 10c).



Obr. 10) Gripper a) prstový, b) vakuový, c) magnetický [26] [27] [28]

- **EOAT** – Jedná se o nástroje, které je možné připevnit na konec ramene kobotu. Výhodou je jejich snadná montáž a demontáž, a tak může být kobotu přiděleno více úkolů. Nalezneme zde dávkovače lepidla (Obr. 11a), brusky (Obr. 11b), šroubováky (Obr. 11c) a mnoho dalších nástrojů.



Obr. 11) a) Dávkovač lepidla, b) Bruska, c) Šroubovák [29] [30] [31]

- **Kamerové systémy** – Toto příslušenství poskytuje kobotu zrak, díky němuž dokáže lokalizovat předměty, rozpoznávat vzory nebo skenovat čárové kódy. Kamery se dělí na dvoudimenzionální (Obr. 12a), schopné určit šířku a délku objektu a trojdimenzionální (Obr. 12b), které navíc zvládnou určit i jeho výšku.



Obr. 12) a) 2D kamera, b) 3D kamera [32] [33]

2.3.4 Programování kolaborativních robotů

Obecně se průmyslové roboty programují dvěma způsoby, a to on-line nebo off-line. On-line programování spočívá ve tvorbě či aktualizaci programu přímo na pracovišti. Robot je přepnut do programovacího režimu, čímž je jeho dosavadní činnost pozastavena. K tomuto procesu slouží tzv. teach-pendant, což je ovládací zařízení, prostřednictvím kterého obsluha pohybuje ramenem robotu a následně tyto pohyby zaznamenává. Totéž lze provést ručním vedením ramene, což je sice velmi intuitivní, avšak méně přesné. Navíc je v tomto případě z hlediska bezpečnosti nezbytné, aby byl robot vybaven patřičnými senzory. On-line programování mají v oblibě především malé firmy, protože je nenáročné i pro méně zkušené programátory. Na druhou stranu tvorba programu off-line přítomnost robotu nevyžaduje. Kód lze vytvořit v textovém editoru anebo graficky v příslušném softwaru, přičemž je posléze nahrán do řídicí jednotky robotu. Použitím této metody dochází ke snížení doby odstávky robotu a urychlení jeho integrace. Nevýhodou je ovšem rigidita programu, jelikož se během chodu nedá měnit. Do kolaborativního prostředí přináší člověk nepředvídatelnost, a proto se zpravidla zapojuje do programování kobotu oběma způsoby. [34] [35]

Lidský operátor může zasahovat do programu kolaborativního robotu explicitně anebo implicitně. Explicitní zapojení představuje přímou komunikaci, kdy člověk předává kobotu informace nebo instrukce. V rámci implicitního zapojení kolaborativní robot sleduje lidské chování, na které následně reaguje na základě nasbíraných dat nebo ručního návrhu programátorů. S ohledem na zmíněné způsoby zapojení obsluhy, rozeznáváme tři druhy programovacích metod, jež činí chování kobotu flexibilním [35]:

- **Komunikace** – Kolaborativní robot je ovládán obsluhou verbálně (řečí) nebo neverbálně (gesty, pohledy, polohou hlavy, haptikou a uživatelským rozhraním). Programátor v režimu off-line definuje jednotlivé operace kobotu a vytváří program pro základní řízení pohybu. Do on-line programování je operátor zapojen převážně explicitně s tím, že kobotu rozdává pokyny pro vykonání předem nadefinovaných operací.
- **Optimalizace** – V této metodě hraje významnou roli okolí kobotu. Překážky, pozice nástrojů a další prvky okolí jsou modelovány jako matematické funkce a poté optimalizovány pro dosažení požadovaného výkonu. V důsledku toho lze dosáhnout snížení zátěže a vyčerpané energie pracovníka, zvýšení jeho komfortu, lepší kvality výrobku a mnoho dalších pozitiv. V off-line režimu je úkolem programátora navrhnout funkce a optimalizační algoritmy. V průběhu on-line programování je i samotná obsluha součástí funkce, a tedy je zapojena implicitně. Výsledkem optimalizační metody je vyšší pravděpodobnost, že kolaborativní robot vykoná danou úlohu lépe než člověk.
- **Učení** – Kobot nabývá nových dovedností podobně jako člověk, a to kupříkladu prostřednictvím pozorování, metodou pokus-omyl, obdržetím zpětné vazby či kladením otázek. V rámci off-line programování navrhne programátor učební algoritmus a poskytne kobotu počáteční data (např. iterace metodou pokus-omyl), z nichž se posléze učí. On-line pak může obsluha kolaborativnímu robotu poskytovat další data (např. zpětná vazba, odpovědi na otázky), čímž explicitně ovlivní jeho reakce. Obsluha se může zapojit také implicitně, a to jako součást prostředí, jež kobot pozoruje.

2.3.5 Přehled dostupných řešení

Seřízení světlometů

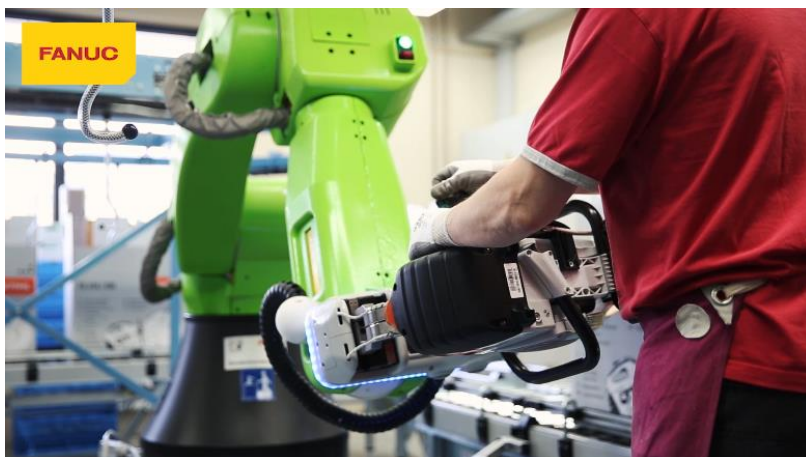
V rámci studie proveditelnosti přišla společnost Kuka, Dürr a Ford s inovativním konceptem seřízení vozidlových světel pro závod Ford v německém Saarlouis. Původně byla mlhová světla vozidel seřizována ručně, což mělo neblahý dopad na komfort pracovníků. Obsluha se totiž musela předklonit, aby dosáhla na špatně dostupné otvory pro seřizovací šrouby v oblasti nárazníku. Také byla potřeba počínat si velmi opatrně, aby nedošlo k poškození otvorů šroubovákem. Použití dvou kolaborativních robotů, jež automaticky seřizují světla do mlhy, zatím co pracovník seřizuje hlavní světla, vedlo ke zlepšení kvality, časové úspoře a odstranění lidského diskomfortu (Obr. 13). [36]



Obr. 13) Seřizování předních světlometů [37]

Manipulace s pilami

Stihl, výrobce řetězových pil, se potýkal s vysokým vytížením zaměstnanců na balící lince ve Waiblingenu u Stuttgartu – rukama jednoho pracovníka zde prošla za směnu hmotnost o velikosti zhruba osmi tun. Práce na balící lince zahrnuje manipulaci s desetikilovými pilami, zkoušku třesem a vizuální kontrolu. S cílem odlehčit zaměstnancům zátěž a zároveň zvýšit efektivitu výroby se společnost rozhodla zavést na pracoviště kolaborativní robot od firmy Fanuc. Pracovník se tedy může soustředit na vizuální kontrolu pily s tím, že fyzicky náročná práce je přenechána kobotu (Obr. 14). [38]



Obr. 14) Vizuální kontrola pily [39]

Plazmové řezání a svařování MIG

Kanadská společnost Carriere Industrial Supply (CIS), situována ve městě Sudbury, se zaměřuje na výrobu těžkých zemních strojů. Za účelem zvýšit bezpečnost zaměstnanců, zlepšit výrobu a kvalitu produktu se rozhodli sáhnout po kolaborativních robotech Universal Robots. Konvenční roboty nepřipadaly v úvahu kvůli HMLV výrobě a velikosti obrobků, k nimž je nutné přemístit robot a nikoliv naopak. Plazmové řezání prováděné ručně po sobě zanechává nahromaděnou strusku a zubaté hrany, jež jsou důsledkem přesunů pracovníka během dlouhých řezů. Těmito nedostatky ovšem kobot netrpí, což přináší značnou časovou úsporu vzhledem k tomu, že čištění spoje zabere až 80% času z celkového řezu. CIS rozšířili využití kobotů i ke svaření, čímž eliminovali neergonomické podmínky při svařování velkých žeber karosérií nákladních automobilů – nyní pracuje svařeč a kobot současně jiném žebře (Obr. 15). [40]



Obr. 15) Kolaborace při svařování žeber [41]

Montáž osvětlení

Fagerhults Belysning AB, švédský výrobce osvětlení pro veřejná a profesionální prostředí, dostal v roce 2021 příležitost uvést do provozu tři kolaborativní roboty Yaskawa. Cílem firmy bylo tato zařízení produktivně aplikovat, a proto byly především rozloženy výrobky na vhodné montážní úlohy pro koboty. Finální výrobní proces pak vypadal následovně: 1. Montáž vstupu do ochranné trubky, 2. Upevnění panelu, 3. Zašroubování řídicí jednotky, 4. Umístění svorkovnice. Koboty výrazně zlepšily ergonomii na pracovišti (Obr. 16). [42]



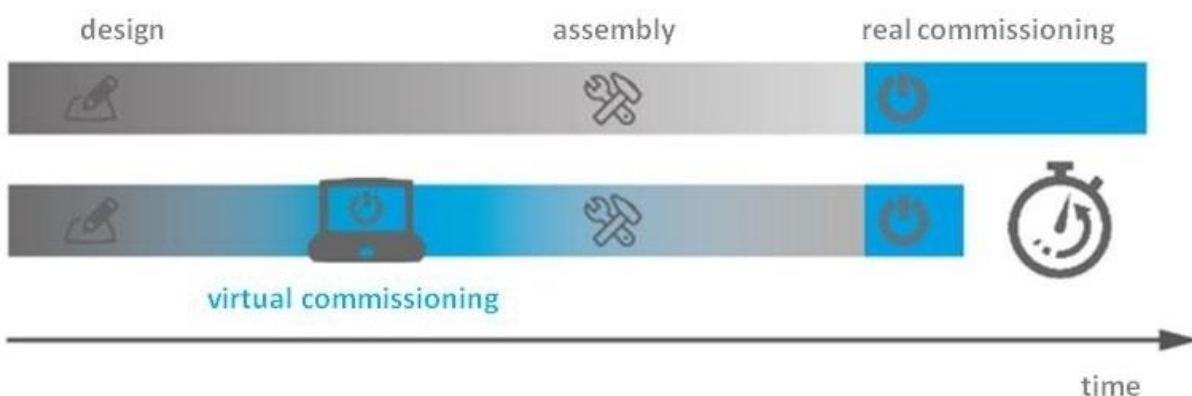
Obr. 16) Kolaborativní pracoviště pro montáž osvětlení [43]

2.4 Virtuální zprovoznění

Virtuálním zprovozněním se rozumí proces, při kterém se simuluje a modeluje výrobní systém za účelem vývoje a testování jeho chování ještě před samotným fyzickým uvedením do provozu. Simulace procesů před spuštěním výrobního systému umožňuje odhalit a následně vyřešit případné chyby a problémy, což vede k minimalizaci doby odstávky. Díky virtuálního zprovoznění lze prozkoumat a otestovat řadu návrhových variant s cílem vybrat optimální řešení. Mezi další přínosy patří mimo jiné značná úspora času a nákladů. [44]

K virtuálnímu zprovoznění se přistupuje iterativně, přičemž ho lze rozdělit na tři hlavní stadia: model in the loop (MIL), software in the loop (SIL) a hardware in the loop (HIL). První fáze MIL spočívá ve vytvoření logického modelu reprezentujícího programovatelné logické automaty (PLC) a rozhraní mezi člověkem a strojem (HMI). Tento model je propojen se simulačním modelem výrobního systému a oba běží současně. Jestliže simulace způsobí chybu, tak je nutné logický model měnit a simulaci opakovat, dokud neproběhne zcela v pořádku. Na to navazuje fáze SIL, kdy se ověřuje, zdali zůstala logika v modelu stejná i po jeho kompilaci do softwaru. Zkompilovaný kód je vygenerován z logického modelu a následně spuštěn na emulátoru, což je zařízení schopné napodobit elektronický hardware v PLC či HMI. Logický model může být naprosto správný, avšak překlad z modelu do softwaru může vyvolat problémy, o kterých se dříve nevědělo. Pokud proběhne simulace MIL úspěšně, ale simulace SIL selže, je zřejmé, že zdrojem selhání je převod logiky z modelu do kompilovaného softwaru. Jestliže je zkompilovaný software na emulátoru PLC nebo HMI funkční, přichází na řadu závěrečná fáze HIL. Ta, na rozdíl od předešlých digitálních stadií, ověřuje funkčnost zkompilovaného softwaru na reálném PLC nebo HMI. Prostřednictvím virtuálního zprovoznění jsou inženýři schopni cyklicky procházet všechny fáze v případě, že by se v některé z nich vyskytla chyba. Mohou tak odhalit a opravit problémy ještě před fyzickým zprovozněním. [44] [45]

Mezi virtuálním a tradičním zprovozněním existuje několik zásadních rozdílů. Tradiční zprovoznění probíhá přímo na místě, kde má být dané řešení nasazeno (např. ve výrobní hale). Pokud se během testování zařízení vyskytnou potíže, bude je potřeba manuálně opravit. V tom případě je nezbytné pozastavit některé nebo dokonce všechny výrobní procesy po celou dobu zprovoznění, což může být finančně náročné. U virtuálního zprovoznění bývá naopak většina nasazení realizována na dálku a na samotné místo stačí dorazit až v závěru. Proces tradičního zprovoznění zabere obvykle delší dobu (Obr. 17) a na místě implementace je k němu zapotřebí tým o více lidech na rozdíl od zprovoznění virtuálního, kdy většinu nasazení na dálku zvládne i jednotlivec. [46]



Obr. 17) Porovnání tradičního a virtuálního zprovoznění – časová úspora [47]

2.4.1 Řídicí systém

V rámci virtuálního zprovoznění je důležité zvolit optimální způsob, jakým bude pracoviště řízeno. V dnešní době rozeznáváme dvě hlavní metody řízení, buď prostřednictvím integrované řídicí jednotky (kontrolérem robotu), anebo programovatelným průmyslovým automatem (PLC). Oba způsoby disponují určitými vlastnostmi, a proto je nezbytné vybírat na základě konkrétního řešení. [48]

PLC

Možnost řízení pomocí PLC využijí v zásadě komplexnější pracoviště, které kombinují robotická zařízení s nerobotickými systémy. Pro příklad mohou obsahovat složité dopravníkové systémy, dávkovače palet, přepravní vozíky a další přístroje, které musí komunikovat s více roboty. Sjednocením ovládnutí robotů a dalších součástí systému pod PLC dochází k výraznému snížení složitosti celého systému. PLC totiž dokáže obsluhovat více zařízení pomocí stejného softwaru a hardwaru, což snižuje náklady na integraci a usnadňuje údržbu. Robotický řídicí systém založený na PLC navíc přináší jednotné HMI pro celý systém, a proto teach-pendant už netvoří hlavní rozhraní s kontrolérem robotu. Funkce dostupné pro HMI (např. alarmový systém, záznam poruch, monitorování dat) jsou nyní přímo propojeny s kontrolérem robotu. Další výhodou je také schopnost programátorů PLC řešit problémy robotického systému bez toho, aniž by se učili specifický programovací jazyk daného výrobce. Řídicí systém založený na PLC také umožňuje využití více značek robotů, díky čehož nemusí brát uživatelé ohled na to, od jaké firmy robot již dříve použili. [48]

Kontrolérem robotu

Řízení pracoviště kontrolérem robotu je vhodné pro systémy s nízkým počtem vstupů a výstupů (I/O), protože je lze jednoduše spravovat prostřednictvím jednoho teach-pendantu využitím vestavěných funkcí robotu. Kupříkladu se může jednat o pracoviště, které zahrnují nanejvýš dva roboty s jednoduchým dopravníkovým systémem pro přívod a odvod materiálu. Funkce jako spouštěcí a vypínací sekvence, diagnostika poruch, počítání a výběr dílů, ovládnutí dopravníků a další typické schopnosti PLC, zvládne i kontrolér robotu. Dříve tyto kontroléry představovaly pouze uzly k nadřazenému PLC, ale tyto doby jsou už dávno pryč, jelikož nyní kontroléry dokážou zastávat tuto nadřazenou roli sami. Tento způsob řízení pracoviště nabízí oproti PLC určité výhody. Teach-pendant umožňuje přístup ke všemu, co je s robotem spjaté (nastavení, úlohy, sekvenční kód I/O). Programové soubory jsou uloženy v řídicí jednotce robotu, a nikoliv formou off-line na počítači, což výrazně zjednodušuje řízení revizí. Vše jde navíc jednoduše zálohovat. Tato metoda představuje nižší náklady vzhledem k tomu, že řízení pomocí PLC vyžaduje poměrně drahý software a znalost PLC programování. [49]

2.4.2 Nástroje pro virtuální zprovoznění

Virtuální zprovoznění vyžaduje několik důležitých druhů softwaru. V první řadě se jedná o simulační software, jenž slouží k vytvoření 3D modelu výrobního systému. Tento software obsahuje všechny kinematické struktury a prvky logiky potřebné pro ovládání a vytváření simulací jednotlivých operací. Pokud je navrhovaný systém řízený pomocí PLC, pak je potřeba vybrat vhodnou programovací platformu PLC a komunikační rozhraní, které simulovaný 3D model s PLC propojí. Mezi známé zástupce zmíněných typů softwaru patří [50]:

Software výrobců průmyslových robotů

- RobotStudio – ABB
- KUKA.Sim – KUKA
- Roboguide – Fanuc

Univerzální software

- Tecnomatix Process Simulate – Siemens
- Delmia V5 Robotics – Dassault Systèmes

Software pro PLC

- TIA Portal – Siemens
- TwinCAT – Beckhoff

Software pro vzájemnou komunikaci

- Technologie OPC
- PLCSIM Advanced 2.0 – Siemens
- SIMIT – Siemens

3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Při řešení závěrečné práce je nutné shrnout, čím se bude zabývat, kterým problémům bude čelit a jaké jsou její cíle. V tomhle případě je rovněž důležité popsat vyráběné zařízení a uvést postup jeho montáže.

3.1 Problémová situace

V současné době se stále na drtivě většině robotických pracovišť využívá konvenčních průmyslových robotů, které jsou sice velice výkonné, avšak pracovní prostor s člověkem sdílet nemohou. Může tomu tak být například i z důvodu nejasné legislativy týkající se implementace kolaborativních robotů. Výrobci se pak mohou obávat porušení bezpečnostních předpisů a kolaborativní roboty raději umístí do ochranné klece. Výroba přitom dokáže ze spolupráce člověka s robotem těžit (např. zlepšení ergonomie a zvýšení produktivity). V těchto případech je nezbytné kolaborativní robot správně zavést a zajistit bezpečnost celého pracoviště.

3.2 Formulace problému

Problém představuje vhodné rozdělení montážních operací pro člověka a robot, přizpůsobení koncového efektoru požadovaným operacím robotu a nastavení robotu pro bezpečnou kolaboraci.

3.3 Formulace cílů a řešení

- Rešerše v dané oblasti
- Návrh pracoviště
- Virtuální zprovoznění
- Návrh řízení a HMI
- Ekonomické zhodnocení
- Závěr a doporučení pro praxi

Cílem diplomové práce je navrhnout kolaborativní pracoviště pro montáž vybraného zařízení a virtuálně jej zprovoznit. Důležité je přitom rozdělit operace pro člověka a robot tak, aby vyhovovaly oběma účastníkům a přinášely pozitivní dopad na výrobu (např. zlepšení ergonomie, zvýšení kvality a produktivity). Rovněž musí být robotické pracoviště zcela bezpečné, aby nedošlo k újmě na zdraví pracovníka.

3.4 Analýza výrobku

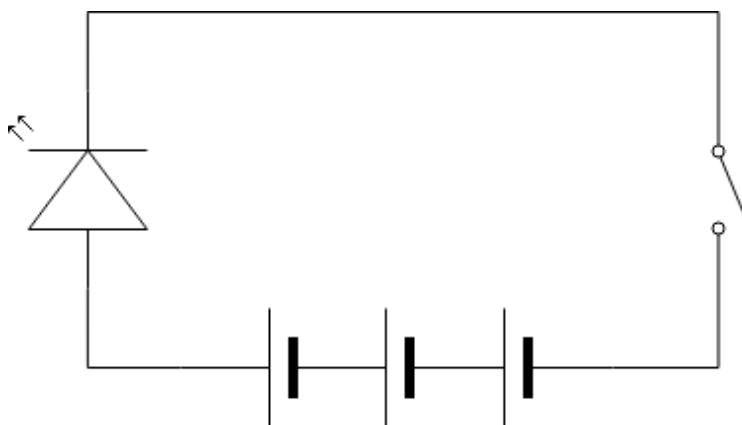
Montovaným produktem byla zvolena ruční svítilna pro běžné použití (Obr. 18). Tento užitečný nástroj produkující světlo nachází využití v mnoha oblastech, a proto jich existuje řada různých typů. Kupříkladu se jedná o potápěcí, vojenské, pátrací nebo infračervené svítilny. Pro případ této diplomové práce však byla vybrána zmíněná svítilna z hlediska všeobecnosti. Na základě rešeršní činnosti byla po zobecnění zhotovena její konstrukce, a tedy se nejedná o konkrétní svítilnu. Hlavními parametry jsou:

- Délka: 119,5 mm
- Minimální průměr: 28 mm
- Maximální průměr: 33 mm
- Hmotnost: 125 g (vypočteno Inventorem)



Obr. 18) Ruční svítilna pro běžné použití

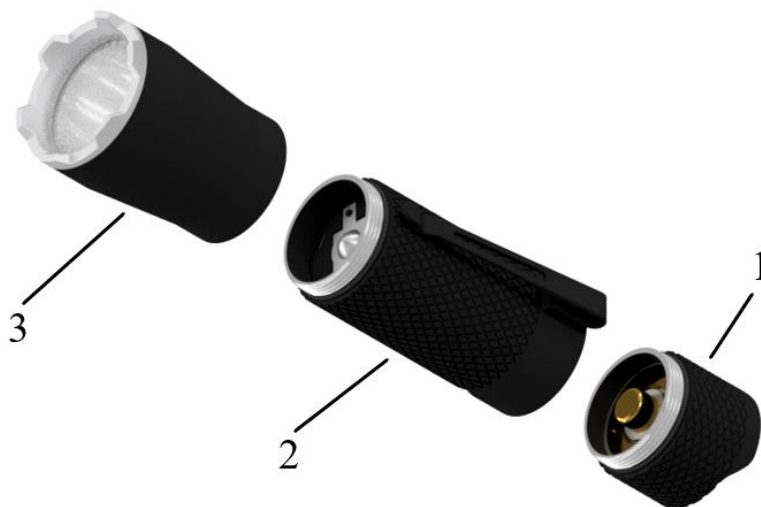
Princip, na němž svítilna funguje, není složitý. Lze jej vysvětlit pomocí zjednodušeného schématu elektrického obvodu (Obr. 19). Zjednodušení spočívá ve vynechání LED ovladače, jelikož je jeho skutečné schéma podstatně složitější než zbytek obvodu. Sepnutím spínače do polohy ON dochází k uzavření elektrického obvodu, což umožňuje tok elektrického proudu. Jeho zdrojem jsou baterie, ze kterých proudí až do LED, kde vzniká světlo. Dále tvoří elektrický obvod součásti z vodivých materiálů (např. pružiny), které již zmíněné komponenty propojují. Po sepnutí spínače do polohy OFF je elektrický obvod otevřen, čímž je tok elektrického proudu zamezen a svítilna tak přestává svítit.



Obr. 19) Schéma elektrického obvodu svítilny

3.4.1 Popis svítilny

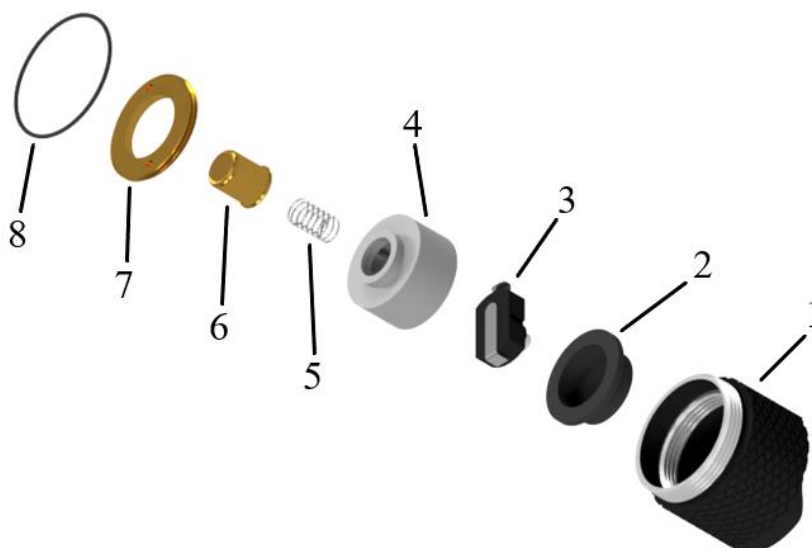
Svítilnu je možné rozdělit na tři hlavní části: uzávěr (1), tělo (2) a hlavu (3) (Obr. 20). Ty jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.



Obr. 20) Uzávěr, tělo a hlava svítilny

Uzávěr

Uzávěr svítilny (Obr. 21) se skládá z hliníkového krytu (1), do nějž je vloženo gumové tlačítko (2) pro komfortní sepnutí spínače (3). Ten je uložen v plastovém krytu (4) společně s pružinou (5) a víčkem (6), které zajišťují tok elektrického proudu a nepohyblivost zásobníku s bateriemi. Komponenty uvnitř hliníkového krytu jsou axiálně vymezeny pojistným kroužkem (7). Na kryt je nasunut těsnicí kroužek (8), jenž slouží jako ochrana před vnikem vody či prachu do svítilny.



Obr. 21) Uzávěr svítilny

Tělo

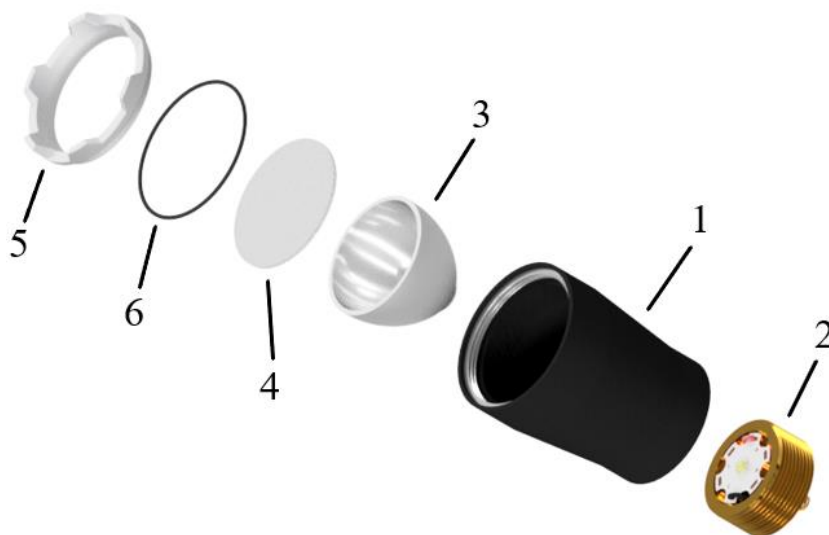
Tělo svítilny (Obr. 22) sestává z hliníkového krytu (1), ve kterém je uložen zásobník s bateriemi (2) jako zdroj elektrické energie. Na kryt je opět nasunut těsnicí kroužek (3) a také připevněn držák (4) pro uchycení svítilny.



Obr. 22) Tělo svítilny

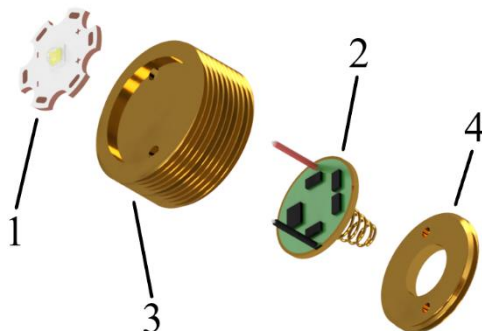
Hlava

Hlava svítilny (Obr. 23) je tvořena hliníkovým krytem (1), do nějž je zespodu našroubována LED soustava (2). Do vrchní části krytu je umístěn reflektor (3), který vytváří stálý světelný paprsek soustředěním světla ven ze svítilny. Odrážení paprsků je dosaženo parabolickým tvarem a kovovým materiálem (např. hliníkem) reflektoru. Na ten je položena skleněná čočka (4) chránící LED před vnějším okolím. Na kryt je poté našroubována hliníková fazeta (5) s těsnícím kroužkem (6), jež zamezuje osový pohyb čočky a reflektoru.



Obr. 23) Hlava svítilny

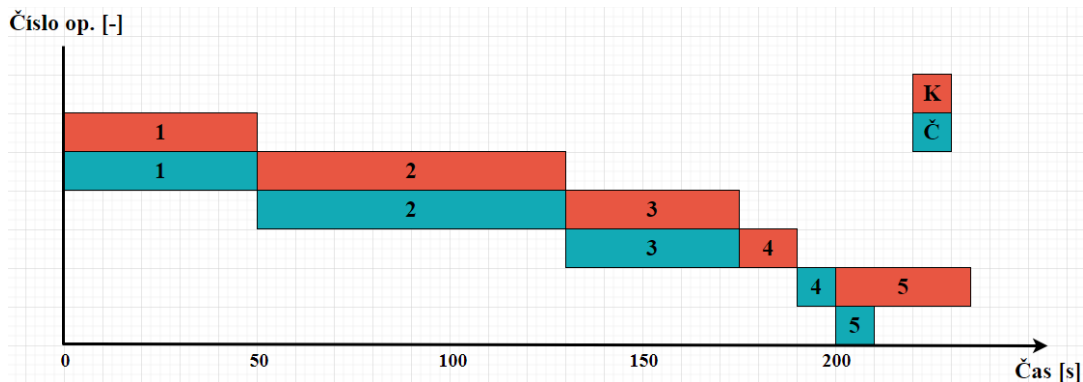
Mezi hlavní prvky LED soustavy (Obr. 24) patří světelná dioda (1) a její ovladač (2). LED ovladač má na starost zajistit stálé a nepřerušované napájení diody. Zároveň tak předchází přehřívání, blikání či zhoršení jejího výkonu. Umístěn je v měděném krytu (3) a axiálně zajištěn pojistným kroužkem (4). LED se musí pro spojení s ovladačem spájet.



Obr. 24) LED soustava

3.4.2 Postup montáže svítilny

Montáž svítilny začíná najetím kolaborativního robotu do pozice pro složení uzávěru. Pracovník si do gripperu upne kryt uzávěru a postupně do něj vkládá zbylé součástky, které nakonec axiálně vymezí pojistným kroužkem. Poté umístí uzávěr na své místo v zásobníku a pokračuje montováním LED soustavy. Opět využívá robot, a to pro upnutí krytu, do něhož vloží z jedné strany LED ovladač a z druhé provlíkne drátky pro spojení se světelnou diodou. Pracovník poté otočí gripper o 180 stupňů, aby mohl drátky s diodou pohodlně spájet. Dále robot přesune uzávěr do upínacího přípravku a našroubuje na něj tělo svítilny. Obsluha mezitím složí zbytek hlavy, kterou následně vloží na své místo v zásobníku. Robot poté umístí do těla zásobník s bateriemi a obsluha na tělo nasune těsnící kroužek. Nakonec robot našroubuje hlavu, přičemž pracovník připevní k tělu držák. Postup montáže vyobrazuje následující graf (Obr. 25) s popisem v tabulce 1. Jeden díl představuje 10 sekund, a tedy celá montáž trvá 235 sekund.



Obr. 25) Postupový diagram montáže svítilny

Tab 1) Rozdělení operací mezi člověkem a kolaborativním robotem

Číslo operace	1	2	3	4	5
Operace kobotu	Držení krytu uzávěru	Držení krytu LED	Vložení uzávěru a šroubování těla	Vložení zásobníku s bateriemi	Šroubování hlavy
Operace člověka	Montáž uzávěru	Montáž LED	Montáž hlavy	Nasunutí těsnícího kroužku	Připevnění držáku
Typ spolupráce	Kolaborace		Kooperace	Synchronizace	Kooperace

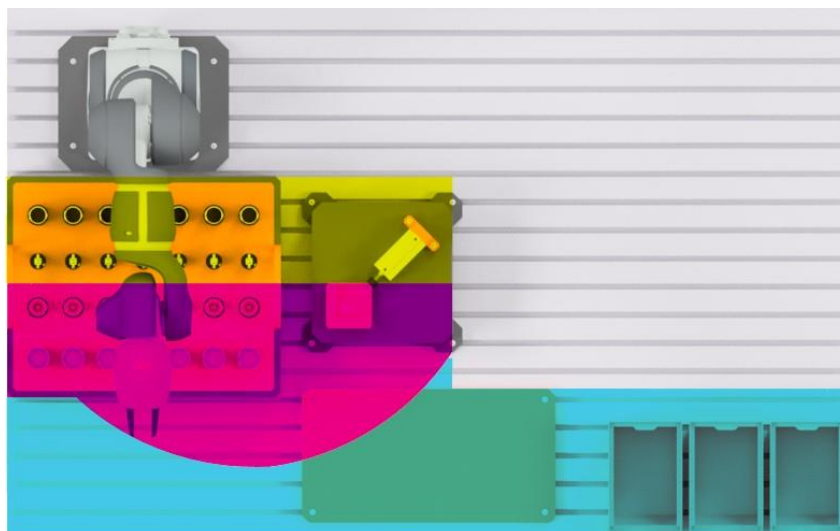
4 NÁVRH KOLABORATIVNÍHO PRACOVIŠTĚ

Kolaborativní pracoviště (Obr. 26) bylo navrženo se snahou dosáhnout co největší flexibility. Například pracovní plocha je tvořena hliníkovými profily, jež obsahují mezery pro montáž jednotlivých komponent. Díky těmto mezerám je možné komponenty jednoduše měnit a přesouvat po pracovní ploše. Pracoviště je rovněž přizpůsobeno pro montáž více typů svítilen. Poradí si s výrobou svítilen od průměru 15 až 50 mm. Podrobněji jsou komponenty pracoviště rozebrány v následujících podkapitolách.



Obr. 26) Kolaborativní pracoviště

Na obrázku 27 jsou vyobrazeny pracovní obálky kolaborativního robotu (žlutá barva) a člověka (modrá barva). Společný pracovní prostor je označen fialovou barvou. Oblast zásobníku spolu nesdílí ve stejný čas. Naopak jsou v přímém kontaktu v oblasti upínacího přípravku a podložky, kdy kobot člověku přidržuje kryt uzávěru nebo LED soustavy.



Obr. 27) Pracovní obálky kobota a člověka

4.1 Kolaborativní robot a přizpůsobený koncový efektor

Pro spolupráci s člověkem byl na pracoviště vybrán kolaborativní robot IRB 14050 Single-arm YuMi (Obr. 28a) od společnosti ABB. Tento kompaktní sedmiosý manipulátor je vhodný pro montáž a manipulaci s materiálem, přičemž je primárně určen pro práci s malými díly. Součástí balení je také integrovaný gripper se servomotorem, kamerou a vakuem. Funkce lze kombinovat, ale pro tento případ stačí použít modul se servomotorem (Obr. 28b). Zajišťuje totiž uchopení předmětů do šířky 50 mm s možností ovládat pohyb a sílu prstů. Základní charakteristika kobotu:

- Hmotnost: 9,5 kg
- Jmenovité zatížení: 500 g
- Dosah: 559 mm



Obr. 28) a) Single-arm YuMi, b) Gripper se servomotorem [51] [52]

4.2 Pracovní židle

Pracovní židle (Obr. 29) [53] by měla být především komfortní, aby na ni obsluha vydržela pohodlně sedět po celou dobu směny. Rozhodně by tedy měla jít polohovat, aby si ji pracovník mohl přizpůsobit na výšku těla.



Obr. 29) Pracovní židle

4.3 Pracovní stůl

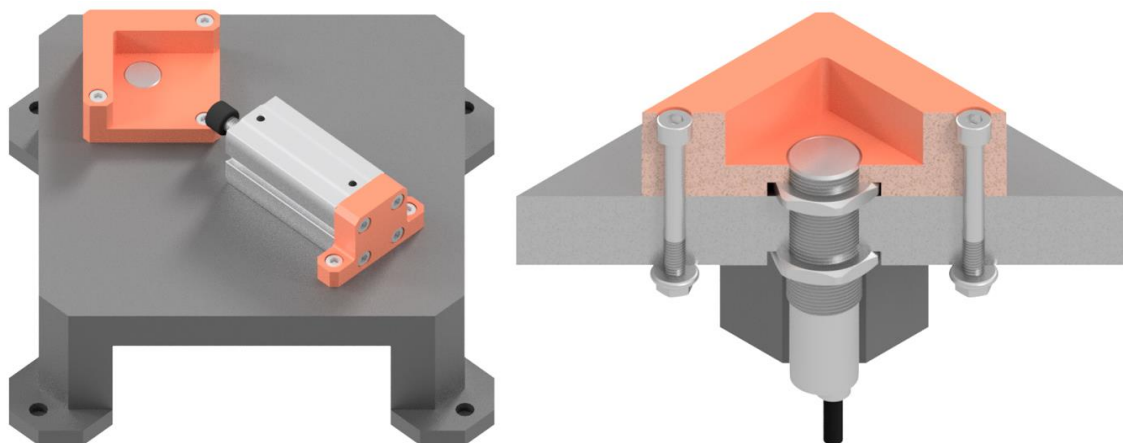
Pracovní stůl (Obr. 30) je složen z hliníkových profilů. Ve vrchní části stolu do sebe profily zapadají a vytváří tak pracovní plochu. Zesponu konstrukce jsou připevněna kolečka, díky kterým je možné stůl poměrně snadno přemístit. Deska stolu poskytuje místo pro uložení kontroléru či dalších potřebných komponent. K profilům ze přední strany stolu lze připnout teach-pendant, takže nezabírá místo na pracovní ploše. Konstrukce stolu je navíc upravena tak, aby měl pracovník místo na nohy.



Obr. 30) Pracovní stůl

4.4 Upínací přípravek

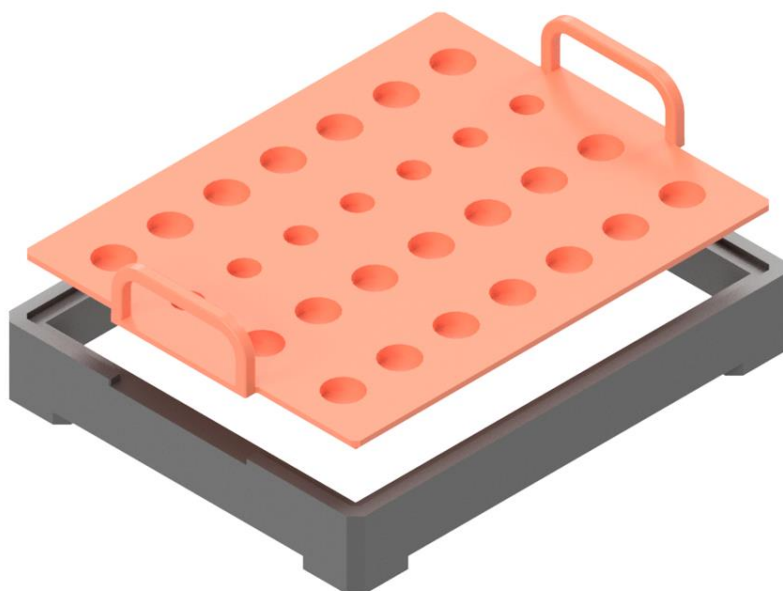
Přípravek sloužící k upnutí svítilny (Obr. 31a) se skládá z dílů vyrobených metodou 3D tisku tvořících základ pro upevnění pneumatického válce a kapacitního senzoru (Obr. 31b). Poté, co snímač identifikuje část svítilny, válec ji přitlačí na stěnu základu. Upínací přípravek obsahuje dvojčinný pneumatický válec od firmy FESTO se zdvihem 50 mm, díky něž zvládne upnout svítilny od průměru 15 až 50 mm. Snímač byl vybrán na základě schopnosti detekovat kovové i nekovové materiály, jelikož může mít svítilna umístěné gumové tlačítko jak zesponu, tak i z boku. Proto byl zvolen kapacitní senzor značky Baumer se snímací vzdáleností až 8 mm.



Obr. 31) a) Upínací přípravek, b) Řez přípravkem

4.5 Zásobník na součásti svítilny

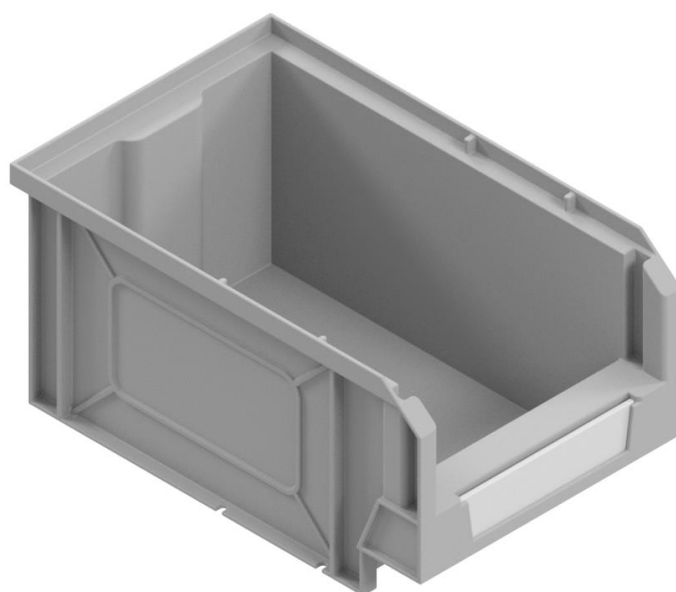
Zásobník (Obr. 32) slouží k uložení součástí svítilny (krytu těla, zásobníku s bateriemi, hlavy a uzávěru), odkud je kobot posléze odebírá a umísťuje do upínacího přípravku. Skládá se ze dvou dílů zhotovených prostřednictvím technologie 3D tisku. Spodní díl je zevnitř pevně uchycen ke stolu s tím, že je do něj vrchní díl pouze vložen. Je tomu tak z důvodu rychlejší výměny vrchního dílu, a tedy i rychlejšího přechodu na výrobu jiného typu svítilny.



Obr. 32) Zásobník na součásti svítilny

4.6 Box na součásti svítilny

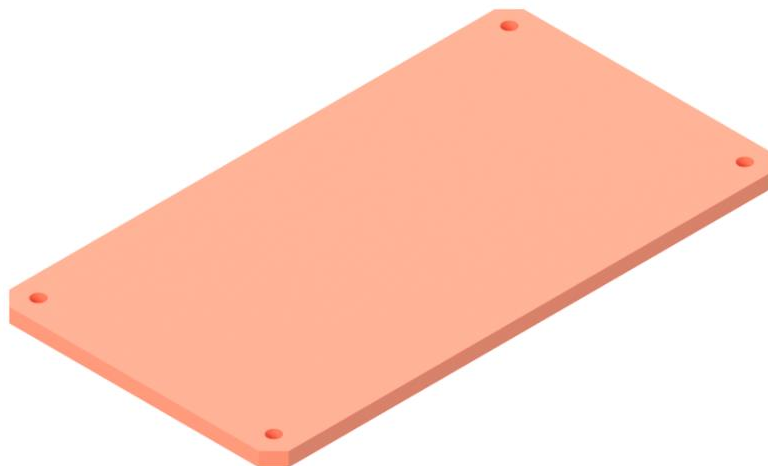
Plastový box (Obr. 33) s cedulkou pro popis je využit ke skladování součástek hlavních částí svítilny (uzávěru, těla a hlavy). Pracovník má tedy na stole nachystané tři boxy, každý se součástkami jednotlivých částí.



Obr. 33) Box na součásti svítilny

4.7 Pracovní podložka

Na podložce (Obr. 34) o velikosti 190x360 mm vyrobené 3D tiskem vykonává obsluha různé úkoly. V tomto konkrétním případě zde montuje část hlavy svítilny, přičemž podložku využívá i jako místo pro odkládání součástek svítilny. Hlavním účelem podložky je zabránit tomu, aby malé díly spadly do mezer na stole.



Obr. 34) Pracovní podložka

4.8 Páječka

Páječka je nástroj využívaný k trvalému spojení dvou kovových objektů použitím pájky, kovu s nižší teplotou tavení (např. slitina cínu) než u spojovaných materiálů. Páječka roztaví spojovací kov, jehož následným ochlazením vzniká pevné spojení. V tomto konkrétním případě jsou dráty vedoucí z plošných spojů LED ovladače spájeny se světelnou diodou. Pracovník k tomu využívá elektrickou pájecí stanici značky Extol Industrial (Obr. 35), která nalezne své místo na pracovní ploše po levé straně pracovní podložky.



Obr. 35) Extol Industrial pájecí stanice [54]

5 BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZA

Při navrhování strojních zařízení vzniká široká škála rizik, která je potřeba posoudit a poté odstranit, anebo alespoň minimalizovat na přijatelnou úroveň. Kolaborativní roboty jsou sice samy o sobě bezpečné a nesou označení CE, nicméně se tato značka vztahuje pouze na ně, a je tedy nezbytné provést analýzu rizik celého robotizovaného pracoviště k zisku nového ES prohlášení o shodě. Postup této analýzy vychází primárně z předmětu „Management rizik u strojních a elektrických zařízení“ vedeným panem docentem Petrem Blechou. [55]

5.1 Požadavky právních předpisů EU

Pro dosažení náležité úrovně bezpečnosti robotů a robotických systémů byly vytvořeny harmonizační právní předpisy EU definující základní požadavky na bezpečnost. Jejich hlavním úkolem je stanovení úrovně bezpečnosti a formulace požadavků, které je potřeba během vývoje strojního zařízení splnit. Vzhledem k neustálému vývoji vědy a techniky v oblasti ochrany zdraví při práci, je důležité umět na nové poznatky flexibilně reagovat. Proto byl založen institut harmonizovaných technických norem. Dodržení harmonizovaných norem vede ke splnění právních povinností dle předpisů EU. Proces posuzování shody včetně jeho výsledku je nutné dokumentovat, přičemž až po shromáždění důkazů o shodě je v kompetenci výrobce opatřit strojní zařízení ES prohlášením o shodě a evropskou značkou shody CE. [56]

5.1.1 Legislativní požadavky

Z hlediska legislativy existuje několik důležitých směrnic EU vztahujících se na robotické systémy. Tou nejzásadnější je Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/42/ES o strojních zařízeních, která je v národním právu České republiky prováděna prostřednictvím nařízení vlády č. 176/2008 Sb. k provádění zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky. Kromě konkrétních technických požadavků na strojní zařízení, stanovují zmíněné předpisy také podmínky, za kterých může výrobce uvést strojní zařízení na trh nebo do provozu. Než se tak stane, musí výrobce zajistit několik nezbytných opatření [56] [57]:

- 1) splnění požadavků na ochranu zdraví a bezpečnost;
- 2) technická dokumentace;
- 3) návod k používání;
- 4) posouzení shody;
- 5) ES prohlášení o shodě;
- 6) označení CE.

Pro dodržení základních bezpečnostních požadavků robotického systému, je potřeba zahrnout ještě další dvě evropské směrnice [56]:

- **2014/35/EU** – Směrnice o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání elektrických zařízení určených pro používání v určitých mezích napětí na trh. V národním právu ČR je tato směrnice prováděna pomocí nařízení vlády č. 118/2016 Sb. k provádění zákona č. 90/2016 Sb.
- **2014/30/EU** – Směrnice o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se elektromagnetické kompatibility. V národním právu ČR je tato směrnice prováděna pomocí nařízení vlády č. 117/2016 Sb. k provádění zákona č. 90/2016 Sb.

5.1.2 Normativní požadavky

Celkově rozlišujeme tři základní typy bezpečnostních norem, jejichž účelem je poskytnout výrobcům, konstruktérům a uživatelům strojních zařízení plán, jak dosáhnout shody s ustanoveními příslušné legislativy [56]:

- 1) **Normy typu A** – tzv. základní. Stanovují základní pojmy, zásady konstrukce a všeobecná hlediska, která lze aplikovat na většinu strojních zařízení. Řadí se mezi ně například norma ČSN EN ISO 12100.
- 2) **Normy typu B** – tzv. skupinové. Obecně se dělí na dva typy:
 - a. **B1** – normy zabývající se jedním bezpečnostním hlediskem (např. bezpečnými vzdálenostmi, teplotami povrchu nebo hlukem). Mimo jiné zde patří normy ČSN EN ISO 1349-1 a ČSN EN ISO 1349-2.
 - b. **B2** – normy zabývající se jedním typem bezpečnostního zařízení (např. dvouručními ovládači, blokovacími zařízeními nebo kryty). Nalezneme zde například normu ČSN EN ISO 13855.
- 3) **Normy typu C** – tzv. předmětové. Zaměřují se na jednotlivé typy robotů či robotických systémů, u nichž určují podrobné požadavky na bezpečnost. Jako příklad lze uvést normy ČSN EN ISO 10218-1 a ČSN EN ISO 10218-2.

Co se týče kolaborativních robotů, zatím pro ně neexistuje žádná konkrétní norma, pouze technická specifikace ISO/TS 15066 doplňující normy ČSN EN ISO 10218-1 a ČSN EN ISO 10218-2 o části určené výhradně kolaborativním robotům používaným v průmyslu. Věnuje se například provozním režimům a způsobům fyzického kontaktu mezi člověkem a robotem (viz. kapitola 3.3.2). Tato technická specifikace sice není standard, nicméně se jí řídí spousta významných výrobců jako ABB, Kuka, Universal Robots a další. [58]

5.1.3 Harmonizované normy

Tato kapitola obsahuje výčet všech nalezených harmonizovaných norem týkajících se navrhovaného robotického pracoviště:

- **ČSN EN ISO 10218-1:2012**
Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 1: Roboty
- **ČSN EN ISO 10218-2:2011**
Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 2: Systémy robotů a integrace
- **ČSN EN ISO 11161:2007**
Bezpečnost strojních zařízení - Integrované výrobní systémy - Základní požadavky
- **ČSN EN ISO 12100:2011**
Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika
- **ČSN EN ISO 13849-1:2017**
Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Obecné zásady pro konstrukci
- **ČSN EN ISO 13849-2:2013**
Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 2: Ověřování platnosti

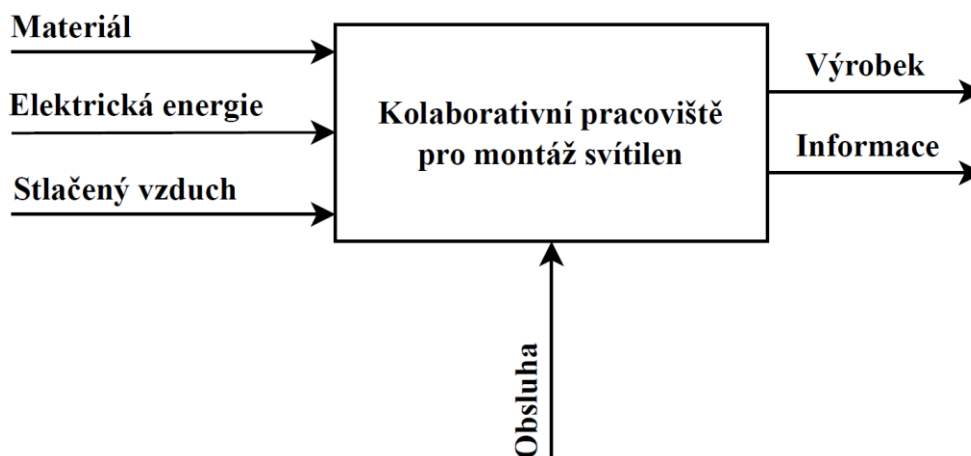
- **ČSN EN ISO 13855:2010**
Bezpečnost strojních zařízení - Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla
- **ČSN EN ISO 14118:2018**
Bezpečnost strojních zařízení - Zamezení neočekávanému spuštění
- **ČSN EN ISO 4414:2011**
Pneumatika - Všeobecná pravidla a bezpečnostní požadavky na pneumatické systémy a jejich součásti
- **ČSN EN 60204-1 ed.3:2019**
Bezpečnost strojních zařízení - Elektrická zařízení strojů - Část 1: Obecné požadavky
- **ČSN EN IEC 61000-6-2 ed.4:2019**
Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-2: Kmenové normy - Odolnost pro průmyslové prostředí
- **ČSN EN IEC 61000-6-4 ed.3:2019**
Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-4: Kmenové normy - Emise - Průmyslové prostředí
- **ČSN EN IEC 62061 ed.2:2022**
Bezpečnost strojních zařízení - Funkční bezpečnost řídicích systémů souvisejících s bezpečností

5.2 Systémová analýza robotického pracoviště

Systémová analýza robotického pracoviště sestává z několika důležitých schémat. Jedním z nich je základní blokový diagram zobrazující transformaci vstupních veličin na výstupy při průchodu montážním pracovištěm. Dalším schématem je již podrobnější blokový diagram znázorňující všechny prvky pracoviště a interakce mezi nimi. Nakonec je vymezena nebezpečná oblast. [59]

5.2.1 Základní blokový diagram pracoviště

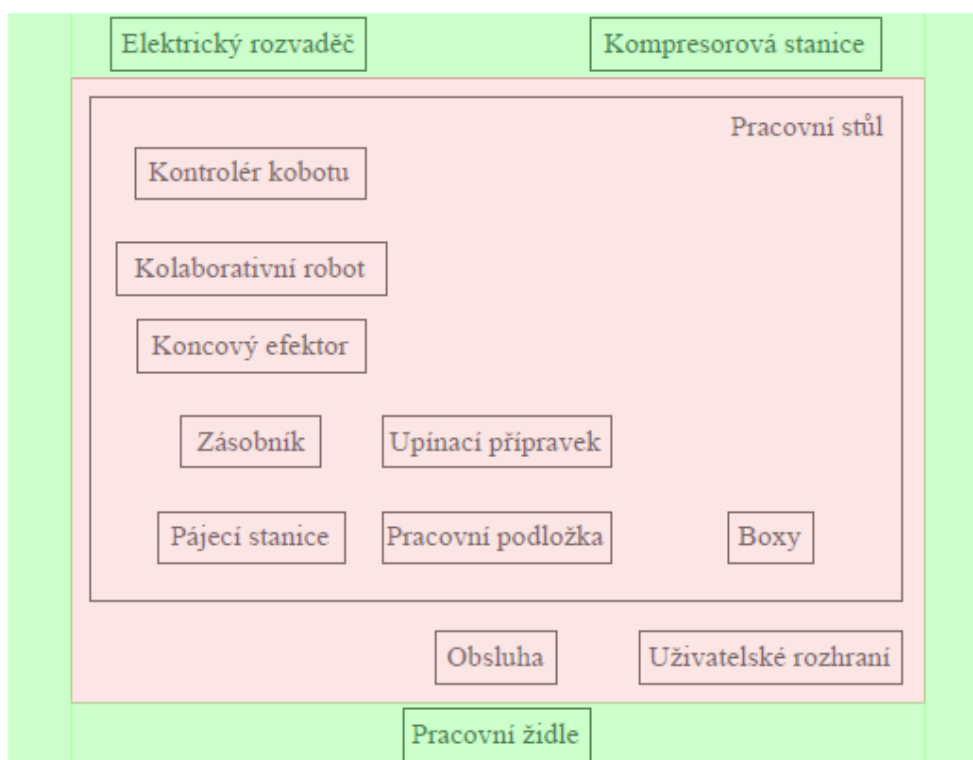
Základní blokový diagram (Obr. 36) znázorňuje vstupy do pracoviště v podobě materiálu, elektrické energie, stlačeného vzduchu a obsluhy. Výstupem je pak výrobek společně s informacemi o něm. [59]



Obr. 36) Základní blokový diagram pracoviště

5.2.3 Definice nebezpečného prostoru pracoviště

Nebezpečná oblast (Obr. 38) je rozdělena na pracovní prostor (červená barva) a okolí pracoviště (zelená barva). [59]



Obr. 38) Nebezpečné prostory pracoviště

5.3 Identifikace relevantních nebezpečí

Následující tabulka vznikla na základě blokového diagramu pracoviště (Obr. 37), jenž uvádí všechny komponenty systému vyskytující se na navrhovaném montážním pracovišti. V tabulce je dále specifikováno umístění komponent a typ nebezpečí, které podle ČSN EN ISO 12100 představují. [59] [60]

Tab 2) Identifikovaná relevantní nebezpečí (ukázka)

Název komponenty systému	Poloha komponenty v systému	Typ nebezpečí dle ČSN EN ISO 12100
Kolaborativní robot	Pracovní prostor	Mechanická nebezpečí (1.1-1, 1.2-1, 1.2-3, 1.6-1, 1.6-2, 1.7-1, 1.8-2) Elektrická nebezpečí (2.2-1, 2.3-2) Nebezpečí vibrací (5.1-1) Ergonomická nebezpečí (8.1-1) Kombinace nebezpečí (10.1, 10.2)

Koncový efektor	Pracovní prostor	Mechanická nebezpečí (1.1-1, 1.2-3, 1.4-1, 1.6-1, 1.6-2, 1.7-1, 1.8-2) Elektrická nebezpečí (2.2-1, 2.3-2) Ergonomická nebezpečí (8.1-1) Kombinace nebezpečí (10.1, 10.2)
Kontrolér robotu (řídící systém)	Pracovní prostor	Mechanická nebezpečí (1.2-1, 1.3-1, 1.5-1, 1.8-2) Elektrická nebezpečí (2.2-1, 2.3-2)

5.4 Analýza významných nebezpečí

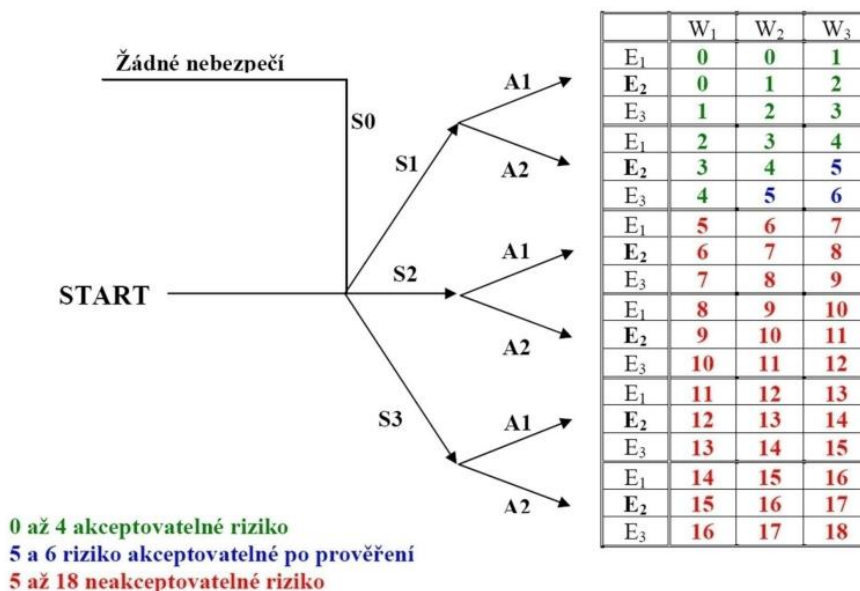
Tabulka 3 zaznamenává analýzu významných nebezpečí v jednotlivých fázích životního cyklu montážního pracoviště. [59] [60] [61]

Tab 3) Analýza významných nebezpečí (ukázka)

ANALÝZA VÝZNAMNÝCH NEBEZPEČÍ BĚHEM ŽIVOTNÍHO CYKLU PRACOVIŠTĚ				Typ strojního zařízení: Kolaborativní pracoviště pro montáž svítlen
Poř. číslo	Fáze životního cyklu	Typ nebezpečí (dle ČSN EN ISO 12100)		Popis nebezpečné události:
		Stručný popis	id. číslo	
1	Doprava			
1.1	Nakládání, přeprava, vykládání	Stlačení, pořezání, odření, zakopnutí	1.2-1, 1.3-1, 1.5-1, 1.8-2	Během nakládání, přepravy a vykládání se mohou komponenty pracoviště převrhnout a pracovníka stlačit. Ten může rovněž o jednotlivé komponenty zakopnout nebo se pořezat či odřít o jejich ostré hrany.
1.2	Balení, rozbalování	Stlačení, pořezání, odření, zakopnutí	1.2-1, 1.3-1, 1.5-1, 1.8-2	Při balení nebo rozbalování hrozí stlačení, zakopnutí o komponenty pracoviště nebo pořezání či odření o jejich ostré hrany.
2	Montáž a instalace, uvedení do provozu			
2.1	Montáž komponent a zařízení na pracovišti (např. připevnění koncového efektoru ke kolaborativnímu robotu)	Stlačení, pořezání, odření, zakopnutí, nepohodlí	1.2-1, 1.3-1, 1.5-1, 1.8-2, 8.1-1	V průběhu montáže je pracovník vystaven nebezpečí stlačení převrženou komponentou pracoviště, přičemž o ní může také zakopnout nebo se pořezat či odřít o ostré hrany. Zdlouhavá, repetitivní činnost (např. šroubování), může vést k nepohodlí.

5.5 Přehled identifikovaných významných nebezpečí a odhad počátečního rizika

Odhad velikosti rizika je proveden pomocí grafu pro odhad rizika (Obr. 39) pro všechna identifikovaná významná nebezpečí zapsaná v tabulce 4. Jedná se o odhad v případě, že nejsou použita žádná preventivní opatření snižující toto riziko. [56] [59] [60] [61]



Obr. 39) Graf pro odhad velikosti rizika [62]

Kategorie závažnosti škody – S [56]:

- S3 – smrt
- S2 – těžké zranění s trvalými následky
- S1 – lehké zranění s přechodnými následky
- S0 – žádné nebezpečí

Kategorie vystavení osob nebezpečím – A [56]:

- A2 – často až trvale
- A1 – zřídka až častěji

Kategorie možnosti vyvarování se nebezpečí – E [56]:

- E3 – sotva možné
- E2 – možné za určitých okolností
- E1 – možné

Kategorie pravděpodobnosti výskytu nebezpečné události – W [56]:

- W3 – velká pravděpodobnost – častý výskyt události
- W2 – střední pravděpodobnost – výskyt události vícekrát za život jedince
- W1 – malá pravděpodobnost

Tab 4) Odhad počátečních rizik u identifikovaných významných nebezpečí (ukázka)

Pořadové číslo	Nebezpečí	Kategorie				Odhadnuté počáteční riziko
		S	A	E	W	
1. Mechanická nebezpečí						
1.1 Nebezpečí vymrštění						
1.1-1	Vymrštění zařízení nebo jeho části	S2	A2	E3	W2	11
1.1-2	Vymrštění výrobku nebo součástí, ze kterých je výrobek složen	S1	A2	E3	W1	4
1.2 Nebezpečí stlačení						
1.2-1	Stlačení při manipulaci s komponentami či zařízeními	S1	A2	E3	W1	4
1.2-2	Stlačení pneumatickým válcem	S2	A2	E3	W3	12
1.2-3	Stlačení při pohybu zařízení nebo jeho částí	S3	A2	E2	W3	17
1.3 Nebezpečí pořezání						
1.3-1	Pořezání o hrany komponent či zařízení	S1	A2	E3	W3	6
1.3-2	Pořezání o hrany při manipulaci s výrobkem nebo jeho součástmi	S1	A1	E3	W3	3
1.4 Nebezpečí zachycení						
1.4-1	Zachycení o koncový efektor	S1	A2	E2	W2	4

5.6 Vyhodnocení bezpečnostní analýzy a snížení rizik

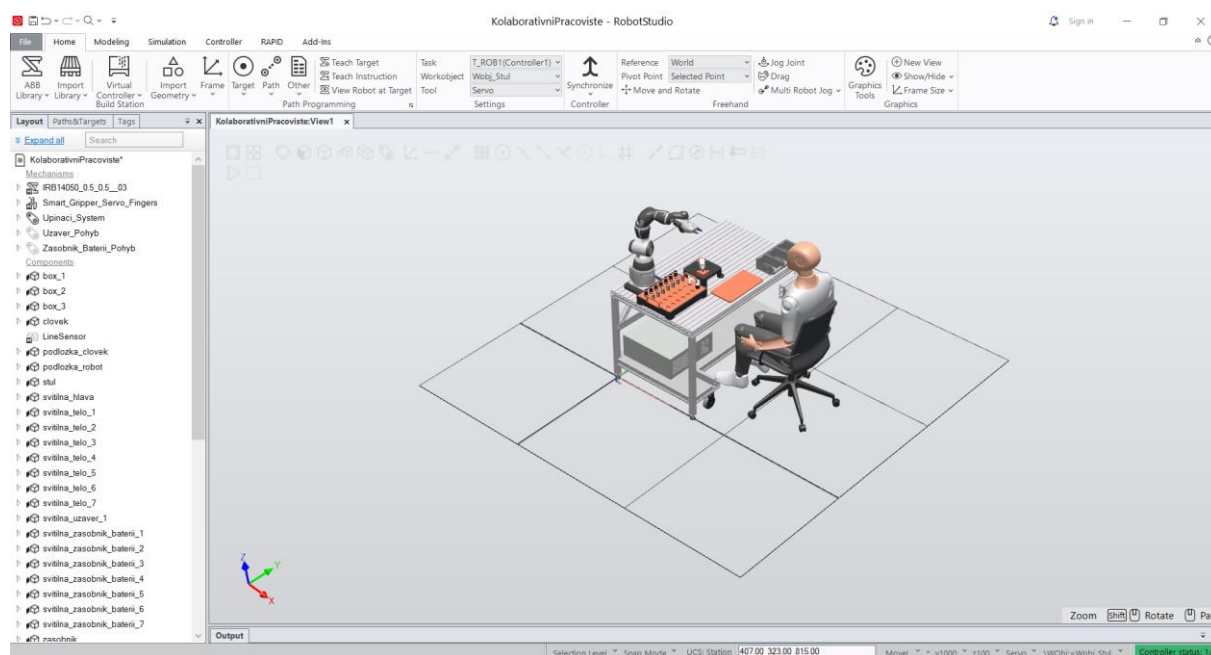
Bezpečnostní analýza odhalila mnoho rizik, na základě čehož je nutné provést určitá bezpečnostní opatření. Mezi nejzávažnější nebezpečí patří rameno kolaborativního robotu v pohybu. Pracoviště je sice nevrženo tak, aby se pracovní obálky obsluhy a robotu protínaly co nejméně, to však nemění nic na tom, že se část těla pracovníka může dostat do nebezpečné blízkosti robotu (např. z důvodu nepozornosti), což by mohlo vést k nárazu nebo stlačení. Kolaborativní robot je provozován v režimu omezení výkonu a síly, takže se s fyzickým kontaktem počítá. Kritické jsou ovšem oblasti krku a hlavy, kterým se robot musí vyhnout, a proto je nezbytná implementace dodatečných senzorů pro zaznamenání těchto citlivých partií. Pohybující se robot v kombinaci s ostrými hranami komponent v pracovním prostoru představuje další nebezpečí, proto musí být hrany těchto komponent zkosené či zaoblené. Každé neakceptovatelné riziko je třeba snížit, a to iteračním způsobem ve třech hlavních krocích pomocí formulářů rizik (Tab 5). [24] [61] [63] [64]

Tab 5) Formulář pro snížení rizika

VUT v Brně, FSI ÚVSSR		FORMULÁŘ PRO SNÍŽENÍ RIZIKA Zpracoval: Bc. Richard Choleva		Strojní zařízení: Kolaborativní pracoviště pro montáž svítidel Datum: 5.5.2024
Číslo nebezpečí (ČSN EN ISO 12100)	Identifikační číslo	Označení nebezpečí dle ČSN EN ISO 12100: 1. Mechanická nebezpečí		
1.2-3	3	Nebezpečí stlačení při pohybu zařízení nebo jeho částí		
Životní etapa: seřizování, provoz, čištění a údržba, vyhledávání závady/odstraňování závady		Nebezpečný prostor: pracovní prostor		
Ohrožené osoby: seřizovač, obsluha pracoviště, pracovník údržby, technik robotů		Provozní stav zařízení: za provozu, mimo provoz		
Popis nebezpečné situace/události:	Pohybující se rameno robotu může pracovníka vážně ohrozit stlačení částí těla ke komponentám v pracovním prostoru. Například může dojít ke stlačení horních končetin či hlavy, což by mohlo mít fatální následky.			
Počáteční riziko:	Závažnost možné škody na zdraví:	S3 – Smrt	Velikost rizika 17	
	Četnost a doba trvání ohrožení:	A2 – Často až trvale		
	Možnost vyvarování se nebezpečí:	E2 – Možné za určitých okolností		
	Pst. výskytu nebezpečné události:	W3 – Velká		
Krok 1: Opatření zabudovaná v konstrukci				
Popis opatření:	Podle technické specifikace ISO/TS 15066 je přísně zakázáno, aby se dostal robot do fyzického kontaktu s citlivými částmi těla (např. hrtanem, očima nebo obličejem). Na základě toho je nutné nainstalovat dodatečné senzory pro detekci oblastí krku a hlavy, aby se jim robot mohl vyvarovat.			
Snížené riziko po opatření:	Závažnost možné škody na zdraví:	S2 – Těžké zranění	Velikost rizika 11	
	Četnost a doba trvání ohrožení:	A2 – Často až trvale		
	Možnost vyvarování se nebezpečí:	E2 – Možné za určitých okolností		
	Pst. výskytu nebezpečné události:	W3 – Velká		
Krok 2: Bezpečnostní ochrana a doplňková ochranná opatření				
Popis opatření:	Maximální hodnoty tlaku a síly kolaborativního robotu při kontaktu s konkrétní částí lidského těla nesmí překročit povolené hodnoty dle ISO/TS 15066 (třeba brát v potaz užitečné zatížení a zrychlení). Podle normy ČSN EN ISO 10218-1 nesmí rychlost robotu během přímé spolupráce s člověkem překročit 250 mm/s.			
Snížené riziko po opatření:	Závažnost možné škody na zdraví:	S0 – Žádné nebezpečí	Velikost rizika 0	
	Četnost a doba trvání ohrožení:	–		
	Možnost vyvarování se nebezpečí:	–		
	Pst. výskytu nebezpečné události:	–		
Krok 3: Informace pro používání				
Popis opatření:	–			
Zbytkové riziko:	Závažnost možné škody na zdraví:	–	Velikost rizika –	
	Četnost a doba trvání ohrožení:	–		
	Možnost vyvarování se nebezpečí:	–		
	Pst. výskytu nebezpečné události:	–		
VALIDACE:	Opatření jsou dostatečná	Bc. Richard Choleva	5.5.2024	

6 VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ

Pro virtuální zprovoznění navrhovaného pracoviště byl zvolen program RobotStudio (Obr. 40) od společnosti ABB. Bylo tak učiněno na základě předešlého výběru kolaborativního robotu od téže společnosti. Mezi další důležité faktory této volby patří kopie reálného řídicího systému (chování robotu v simulaci se téměř shoduje s jeho chováním ve skutečnosti) a přívětivé uživatelské prostředí. Jelikož navrhované pracoviště neobsahuje mnoho zařízení, které by bylo potřeba ovládat, je řídicím systémem pracoviště zvolen kontrolér robotu.



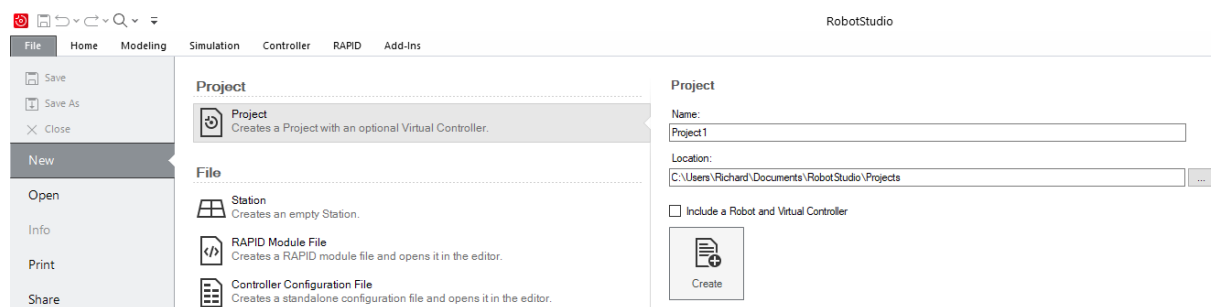
Obr. 40) Navrhované pracoviště v RobotStudiu

6.1 Příprava projektu

Příprava projektu v RobotStudiu spočívá v založení projektu a výběru vhodného RobotWaru s příslušným virtuálním kontrolérem.

6.1.1 Založení projektu

Po zapnutí RobotStudia se objeví hlavní stránka, kde je možné v záložce „New“ založit nový projekt (Obr. 41). Je však potřeba dát si pozor na diakritiku, interpunkci a mezery, protože se nesmí objevit v cestě pro uložení projektu, jinak by daný kontrolér robotu nešel spustit.



Obr. 41) Založení projektu v RobotStudiu

6.1.2 RobotWare

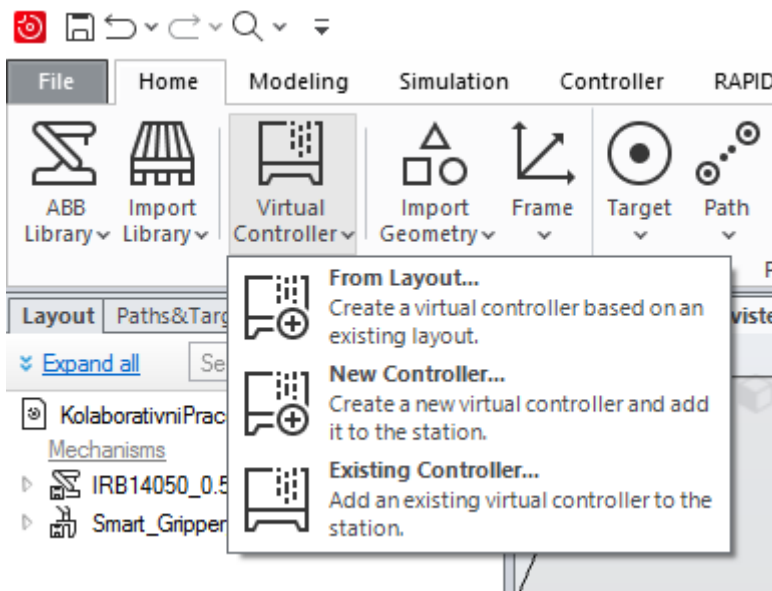
Po vytvoření projektu je důležité vybrat v záložce „Add-ins“ ten správný RobotWare, což je softwarová platforma běžící na řídicí jednotce robotu. Kolaborativní robot Single-arm YuMi je ovládán již novou generací kontrolérů zvanou OmniCore, a proto je nutné zvolit RobotWare právě pro tento typ (Obr. 42).



Obr. 42) RobotWare pro OmniCore

6.1.3 Virtuální kontrolér

Poslední krok v přípravě projektu představuje vytvoření virtuálního kontroléru, což lze zvolením až ze tří možností v sekci „Home – Virtual Controller“. Pro toto řešení byla zvolena první možnost (Obr. 43), které však musí předcházet umístění robotu na pracoviště, jinak by bylo políčko „From Layout...“ vybledlé a nešlo by na něj kliknout. Poté stačí akorát vybrat příslušný RobotWare.



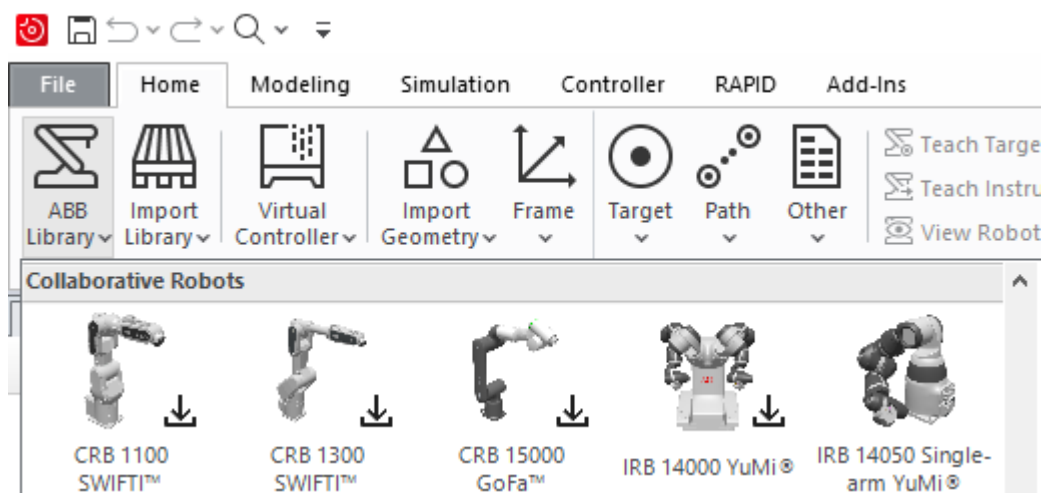
Obr. 43) Tvorba virtuálního kontroléru „From Layout“

6.2 Tvorba pracoviště

Nedílnou součástí při vytváření nového pracoviště je umístění jednotlivých komponent. Dále se definují ovládané zařízení v podobě mechanismů a vytváří tzv. pracovní objekty komponent.

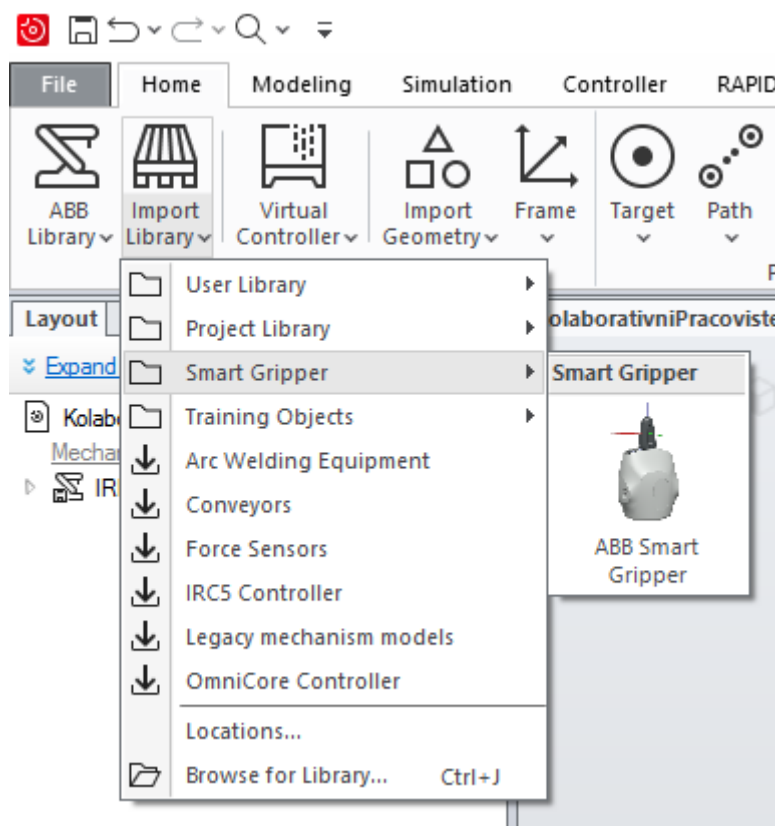
6.2.1 Umístění komponent pracoviště

V nabídce „Home“ pod záložkou „ABB library“ se nachází knihovna přímo od výrobce, a tedy obsahuje všechny produkty ABB od polohovadel až po kolaborativní roboty (Obr. 44).



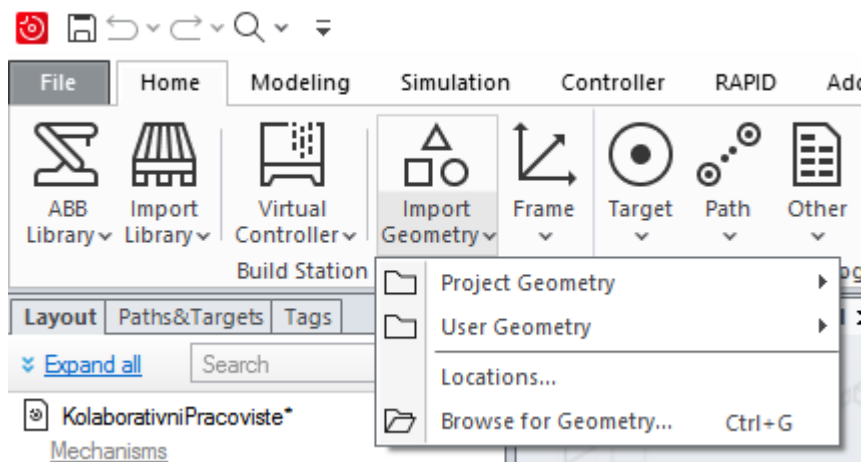
Obr. 44) Výběr kolaborativního robotu

Hned vedle ABB knihovny lze v záložce „Import Library“ stáhnout již nedefinovanou knihovnu od výrobce. V tomto kroku se konkrétně jedná o knihovnu „Smart Gripper“, ze které je přidán ke kolaborativnímu robotu koncový efektor, servo s dvěma prsty (Obr. 45). Připevnění k robotu probíhá pouhým přetažením nalevo v záložce „Layout“.



Obr. 45) Přidání koncového efektoru

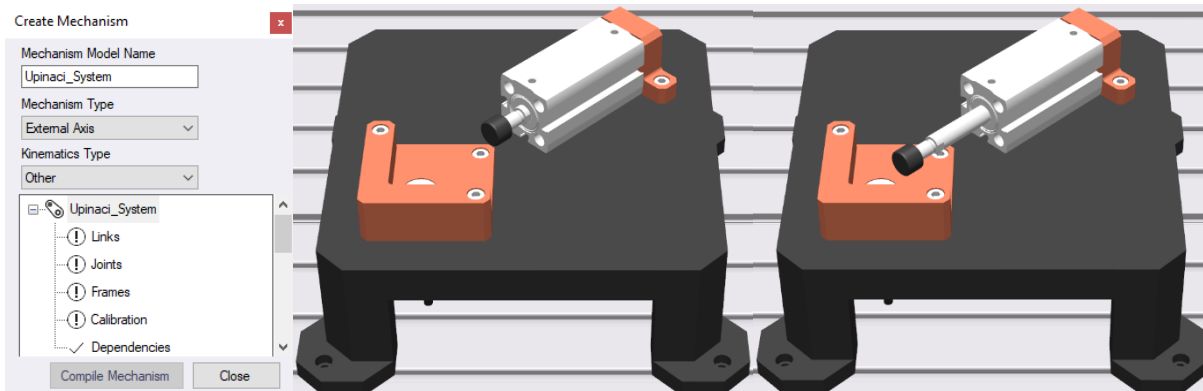
RobotStudio sice nabízí možnost modelování základních objektů (např. krychle nebo kužel), pro vytváření robotických pracovišť je však nutné zvolit variantu importování vlastní geometrie. V sekci „Home – Import Geometry“ je možné kliknutím na „Browse for Geometry...“ umístit na pracoviště vlastní objekty (Obr. 46), které byly v tomto případě vymodelovány v programu Inventor. U základní verze RobotStudia lze přidat pouze soubory ve formátu SAT, pro vložení souborů jiného formátu (např. STEP), je nutné dokoupit licenci pro daný konvertor. Požadovaných poloh jednotlivých component bylo docíleno použitím funkcí jako je „Set Position/Offset Position/Rotate/Place“ po kliknutí pravým tlačítkem myši na danou komponentu v záložce „Layout“.



Obr. 46) Importování vlastních objektů

6.2.2 Definování mechanismů

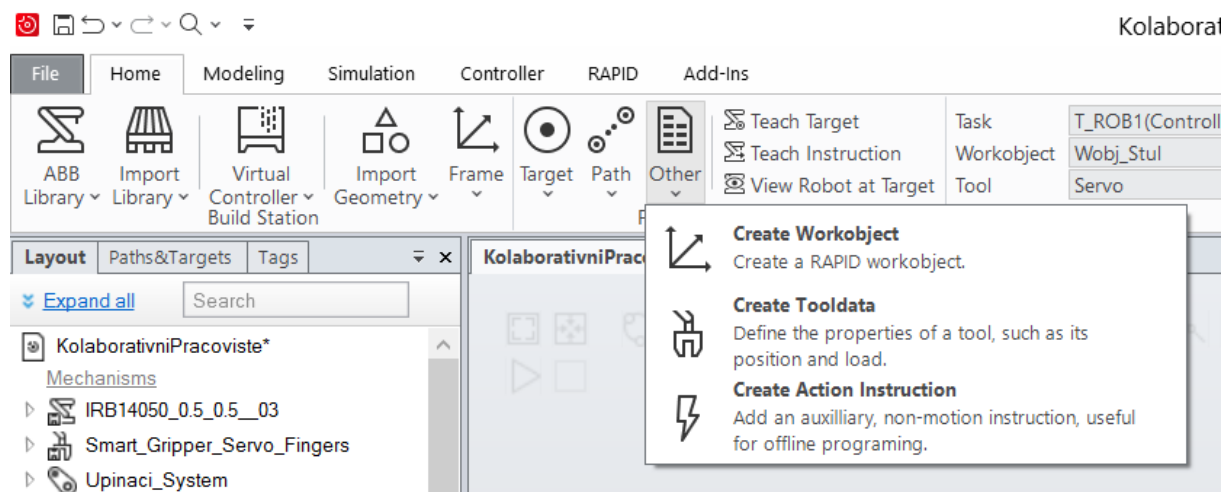
Na zařízení, které mají vykonávat určitý pohyb ovládaný řídicím systémem pracoviště, byla uplatněna funkce „Create Mechanism“ nacházející se v sekci „Modeling“. V tomto řešení se jedná pouze o upínací přípravek, mechanismus robotu a gripperu je už předem vytvořen výrobcem. Splněním jednotlivých kroků (Obr. 47a) dojde u mechanismu k nastavení základny, navázání jednotlivých částí, vytvoření pohyblivých vazeb a souřadného systému. Po kompilaci se nastaví požadované polohy mechanismu a doby změny daných poloh. Upínací přípravek má dvě základní polohy, a to polohu výchozí se zasunutým pneumatickým válcem (Obr. 47b), anebo polohu s vysunutým pneumatickým válcem (Obr. 47c) při detekci součásti svítilny. Stejně tak se nastaví pozice pro otevírání a zavírání gripperu.



Obr. 47) a) Tvorba mechanismu, b) Zasunutý válec, c) Vysunutý válec

6.2.3 Vytváření pracovních objektů

Vytvoření pracovních objektů jednotlivých komponent na pracovišti (např. zásobník nebo upínací přípravek) přináší výhody. V rámci pracovního objektu jsou naprogramované pohyby robotu přesnější a body, jež byly v daném objektu vytvořeny, se při jeho přemístění v programu aktualizují (přesouvají se s objektem). Funkci „Create Workobject“ je možné najít v sekci „Home – Other“ (Obr. 48).



Obr. 48) Tvorba pracovních objektů

6.3 Logika pracoviště

Po umístění komponent na svá místa v pracovním prostoru, je na řadě tvorba cest neboli procedur. Na to navazuje vytvoření potřebných signálů, které kupříkladu slouží k informování o stavu robotu, anebo ovládání jednotlivých částí zařízení. Využita je rovněž logická stanice nebo karta událostí, kde jsou zhotoveny různé činnosti, jak robotu, tak upínacího přípravku.

6.3.1 Signály

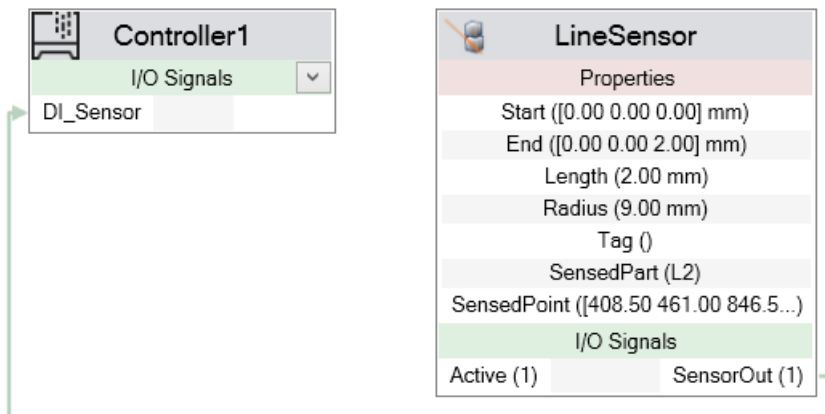
V sekci „Controller – Configuration“ lze spravovat všechny signály pracoviště. Pod záložkou „I/O System“ byly vytvořeny signály ve formě digitálních výstupů pro ovládání gripperu (Obr. 49a) a pneumatického válce a vstupní signál, jenž informuje kontrolér při sepnutí snímače. Ve stejné sekci byly pod záložkou „Controller“ vytvořeny tzv. systémové signály jako výstupy zaznamenávající stav robotu (Obr. 49b). Příkladem je „Auto On“ signalizující práci v automatickém módu, anebo „Runchain Ok“ potvrzující chod bezpečnostních funkcí.

Configuration - I/O System		Configuration - Controller	
Name	Type of Signal	Signal Name	Status
DO_GripperLED	Digital Output	AutoModeStatus	Auto On
DO_GripperLEDPrep	Digital Output	DO_AutoOn	Auto On
DO_GripperTelo	Digital Output	DO_CycleOn	Cycle On
DO_GripperUzaver	Digital Output	DO_MotorsOffState	Motors Off State
DO_GripperUzaverMontaz	Digital Output	DO_MotorsOnState	Motors On State
DO_GripperUzaverMontazPrep	Digital Output	DO_RunChainOk	Runchain OK
DO_GripperUzaverPrep	Digital Output	EStopStatus	Emergency Stop
DO_GripperZasobnikBaterii	Digital Output	MotLmpPB	Motors On
DO_GripperZasobnikBateriiPrep	Digital Output	SysFailStatus	SysFail

Obr. 49) a) Signály gripperu (část), b) Systémové signály robotu

6.3.2 Logická stanice

Logická stanice je využita k vytvoření jednoduché logiky kapacitního snímače v upínacím přípravku (Obr. 50). Do stanice je přidána funkce „LineSensor“, kde se nastaví parametry snímaného prostoru. Načež se propojí s kontrolérem robotu tak, že se při zaznamenání součásti svítilny (SensorOut) zapíše do signálu „DI_Sensor“ logická 1. Přidáním této funkce se snímaná oblast objeví v pracovním prostoru, stačí ji akorát umístit na povrch senzoru. Logickou stanicí lze najít na kartě „Simulation“ v záložce „Simulation Logic“.



Obr. 50) Logika snímače v upínacím přípravku

6.3.3 Tvorba událostí

V sekci s logickou stanicí se nachází také „Event manager“ (Obr. 51), jenž umožňuje vytvářet události navázáním logické hodnoty signálu na určitou akci. V tomto případě byly využity akce v podobě změny polohy mechanismu, odpojení/připojení objektu a změny signálu. Signály gripperu po najetí do pozice odebrání/umístění součásti svítilny změni polohu prstů gripperu pomocí funkce „Move Mechanism to Pose“ a danou součást uchopí/uvolní prostřednictvím funkce „Attach/Dettach“. Co se týče upínacího přípravku, signál „DI_Sensor“ iniciuje pohyb pneumatického válce funkcí „Move Mechanism to Pose“, přičemž ho signál pro reset válce nastavuje zpět na logickou 0.

Activation	Trigger Ty...	Trigger Sys...	Trigger Name	Trigger Parameter	Action Type	Action System	Action Name	Action Parameter
On	I/O	Controller1	DO_GripperTelo	1	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperTelo	0	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperLED	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperLED	0	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperZasobnik...	1	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperZasobnik...	0	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperHlava	1	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperHlava	0	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperUzaver	1	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperUzaver	0	Multiple			Multiple
On	I/O	Controller1	DO_GripperUzaverM...	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperUzaverM...	0	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperUzaverPr...	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperZasobnik...	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperHlavaPrep	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_GripperUzaverM...	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...
On	I/O	Controller1	DO_Uzaver_Pohyb	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Uzaver_Pohyb : Dopad
On	I/O	Controller1	DO_Uzaver_Pohyb	0	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Uzaver_Pohyb : HomeP...
On	I/O	Controller1	DO_Zasobnik_Baterii...	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Zasobnik_Baterii_Pohy...
On	I/O	Controller1	DO_Zasobnik_Baterii...	0	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Zasobnik_Baterii_Pohy...
On	I/O	Controller1	DI_Sensor	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Upinaci_System : Valec...
On	I/O	Controller1	DI_Sensor	0	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Upinaci_System : Valec...
On	I/O	Controller1	DO_ValecReset	1	Change I/O	Controller1	DI_Sensor	0
On	I/O	Controller1	DO_GripperLEDPrep	1	Move Mechanism to Pose		Move Mech...	Smart_Gripper_Servo_F...

Obr. 51) Seznam událostí v „Event Manager“

6.3.4 Simulace procedur

V prostředí simulace je pod kartou „Paths&Targets“ prostor pro tvorbu jednotlivých operací. Nejprve se v rámci pracovních objektů v záložce „Workobjects&Targets“ vytvoří body v požadovaných pozicích, kterými má robot projet. Je důležité dát si pozor, aby body nebyly mimo dosah robotu a byla zvolena vhodná konfigurace os robotu. Poté se tyto body vloží do vytvořených cest v záložce „Paths&Procedures“, čímž vznikají pohyby robotu. Kolaborativní robot v tomto případě využívá dva typy pohybu. První z nich je „MoveJ“, který přesune robot z jednoho bodu do druhého co nejefektivněji. U druhého typu pohybu „MoveL“ koncový efektor robotu přesně kopíruje cestu mezi dvěma body. Z toho vyplývá, že je „MoveL“ využit v místech, kde je potřeba přesnost, tedy při odebrání, umístování a šroubování součástí svítilny. Po přidání příkazů pro nastavení signálů („Set“), resetování signálů („Reset“) a dobu čekání („WaitTime“ – poskytuje čas pro otevření či zavření gripperu) probíhá simulace a ladění procedur. Synchronizací se všechny procedury propíší do RAPIDu.

Pro příklad je uvedena procedura šroubování těla svítilny, kde bylo klíčové zjistit, kolik otáček je nutné provést pro kompletní zašroubování. Délka závitu $L = 4$ mm, stoupání závitu $P = 1$ mm. Využitím rovnice (1) získáme celkový úhel φ :

$$\varphi = \frac{L}{P} \cdot 360^\circ$$

$$\varphi = \frac{4}{1} \cdot 360^\circ = 1440^\circ \quad (1)$$

Z čehož vyplývá, že je během šroubovacího procesu nutné udělat 4 otáčky po 1 mm a 360°.

Tento pohyb byl vyřešen pomocí příkazu „MoveL“ (Obr. 52), kdy konec jedné otáčky vznikl vytvořením bodu vzdáleného 1 mm od bodu na začátku otáčky a pootočeného o 360° (natočení osy gripperu z -180° na 180°). Šroubování hlavy svítilny je řešeno stejným způsobem.

```
PROC Telo_Sroubovani()
  MoveJ T_1_Pick,v200,fine,Servo\WObj:=Wobj_Zasobnik;
  MoveL T_Pick_1,v50,fine,Servo\WObj:=Wobj_Zasobnik;
  WaitTime 1;
  Set DO_GripperTelo;
  WaitTime 1;
  MoveL T_1_Pick,v50,fine,Servo\WObj:=Wobj_Zasobnik;
  MoveJ T_1_Place,v200,fine,Servo\WObj:=Wobj_UpinaciSystem;
  MoveL T_Place_1,v50,fine,Servo\WObj:=Wobj_UpinaciSystem;
  MoveL T_Sroubovani_1,v50,fine,Servo\WObj:=Wobj_UpinaciSystem;
  WaitTime 1;
  Reset DO_GripperTelo;
  WaitTime 1;
  MoveJ T_Sroubovani_2,v200,fine,Servo\WObj:=Wobj_UpinaciSystem;
  WaitTime 1;
  Set DO_GripperTelo;
  WaitTime 1;
  MoveL T_Sroubovani_3,v50,fine,Servo\WObj:=Wobj_UpinaciSystem;
  WaitTime 1;
  Reset DO_GripperTelo;
  WaitTime 1;
```

Obr. 52) Část procedury šroubování

6.4 Řízení

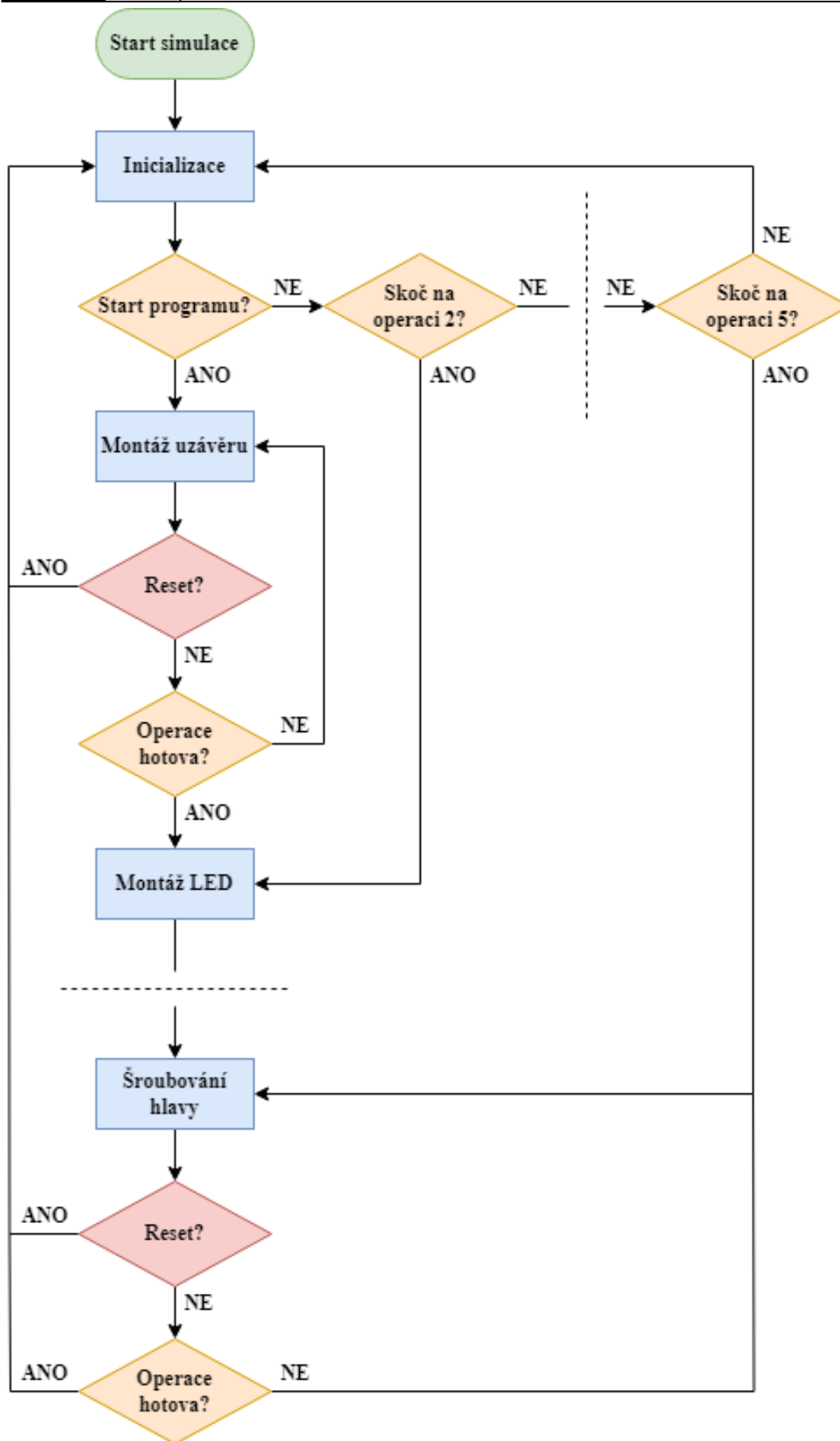
Řízení kolaborativního pracoviště probíhá skrze kontrolér robotu, k čemuž byl využit programovací jazyk robotů ABB zvaný RAPID. Struktura programu je založená na stavovém automatu, kostru tedy tvoří funkce CASE. Jednotlivé stavy:

- 1) Inicializace
- 2) Montáž uzávěru
- 3) Montáž LED
- 4) Upnutí uzávěru a šroubování těla
- 5) Vložení baterií
- 6) Šroubování hlavy

Inicializace je výchozí stav robotu, který zajišťuje resetování všech signálů a najetí robotu do pozice HOME. Ve stavu montáže uzávěru může obsluha najet do polohy pro sestavení uzávěru a otevírat či zavírat gripper dle potřeby. Montáž LED funguje stejně jako předešlý stav, ovšem s dodatečnou možností otáčet gripperem o 180 stupňů. V posledních třech stavech je vždy možné spustit danou operaci a ve chvíli, kdy je dokončena, přejít do dalšího stavu. Na konci programu se může uživatel vrátit zpět do stavu inicializace a začít s montáží další svítilny. V průběhu montáže se lze resetováním programu vrátit do stavu inicializace, z něhož se dá rovněž přeskočit na konkrétní operaci. Obrázek 53 znázorňuje část programu v prostředí editoru RAPID. Pro lepší představu, jak program funguje, byl vytvořen vývojový diagram (Obr. 54), kde byla z důvodu nedostatku místa vložena přerušovaná čára, nicméně znázorněný princip je pro chybějící stavy (operace 3 a 4) stejný.

```
T_ROB1/Module1 x
203 CASE MontazLED:
204
205     State1 := FALSE;
206     State2 := TRUE;
207     State3 := FALSE;
208     State4 := FALSE;
209     State5 := FALSE;
210
211     DisableOp1 := TRUE;
212     DisableOp2 := FALSE;
213     DisableOp3 := TRUE;
214     DisableOp4 := TRUE;
215     DisableOp5 := TRUE;
216
217     IF Move2 THEN
218         Montaz_RobotClovek2;
219         Move2 := FALSE;
220     ENDIF
221
222     IF DO_PoziceMontazRobotClovek = high AND Gripper2 = true THEN
223         LED_ZavritGripper;
224     ELSEIF DO_PoziceMontazRobotClovek = high AND Gripper2 = false THEN
225         LED_OtevritGripper;
226     ENDIF
227
228     IF DO_PoziceMontazRobotClovek = high AND RotateGripper = true THEN
229         LED_OtociGripperu1;
230     ELSEIF DO_PoziceMontazRobotClovek = high AND RotateGripper = false THEN
231         LED_OtociGripperu2;
232     ENDIF
```

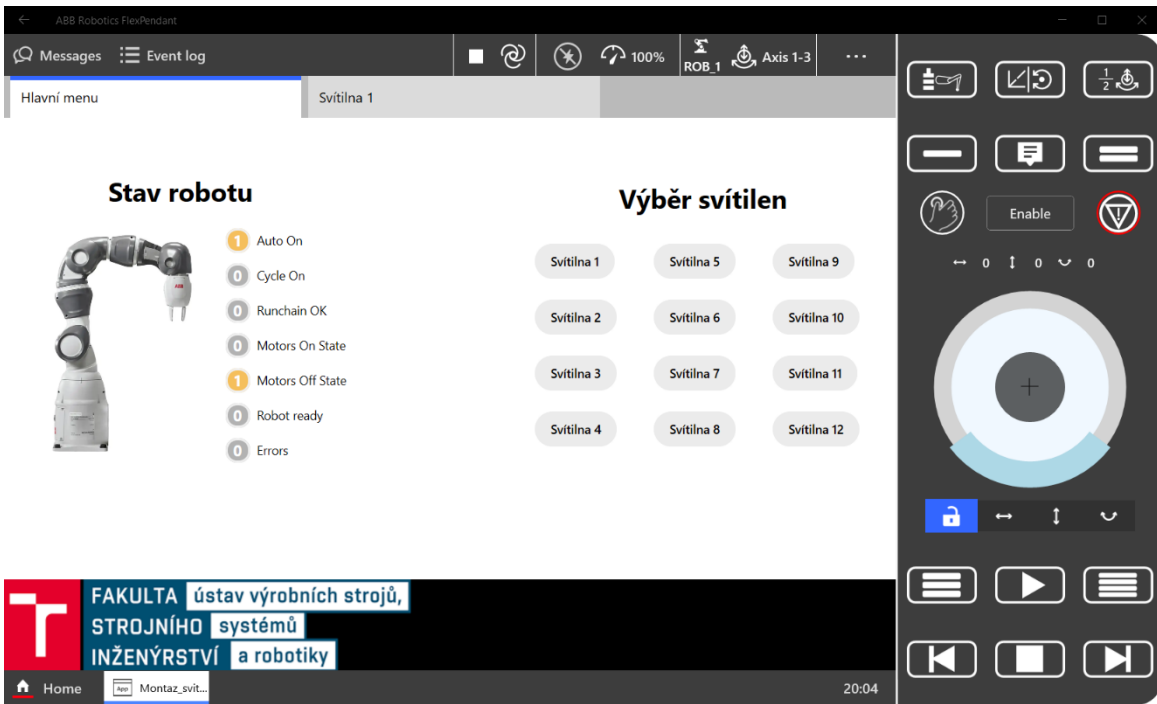
Obr. 53) Část programu v editoru RAPID



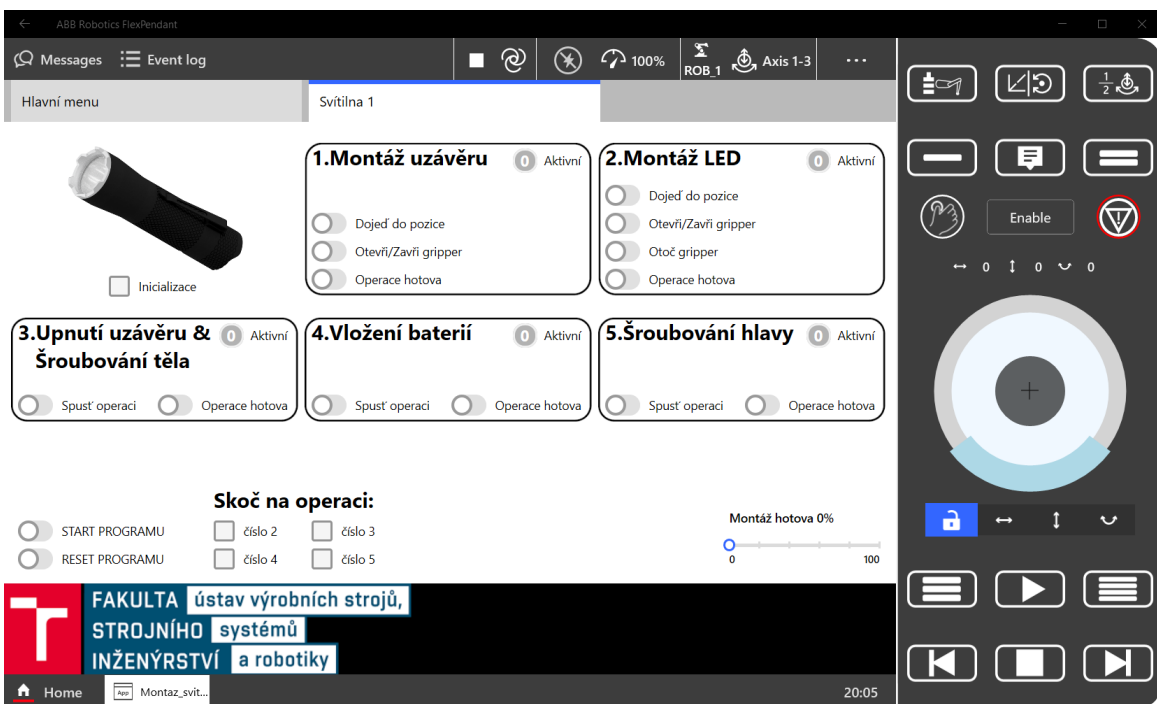
Obr. 54) Vývojový diagram programu

6.5 HMI

Human machine interface, zkráceně HMI, je rozhraní mezi člověkem a strojem sloužící ke komunikaci mezi těmito účastníky. Kolaborativní pracoviště je ovládané teach pendantem, proto musel být do RobotStudia dodatečně stažen virtuální FlexPendant [65] a pro vytvoření vlastní aplikace tzv. Omnicore AppMaker [66]. HMI tohoto řešení se skládá ze dvou záložek. Hlavní menu (Obr. 55) obsahuje informace o stavu robotu společně s nabídkou 12 typů svítlen k montáži. Zvolením svítilny se přejde na záložku určenou pro postup její montáže (Obr. 56).



Obr. 55) HMI – Hlavní menu



Obr. 56) HMI – Montáž vybrané svítilny

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Automatizace pracoviště nepochybně přináší mnoho výhod, nicméně je před samotnou implementací zásadní zvážit, zdali se tato investice vyplatí. Hlavním kritériem při rozhodování je návratnost investic, kterou lze vypočítat jako podíl investované částky a ušetřené částky. V případě plné automatizace by se jednalo o poměr ceny všech komponent včetně nákladů na jejich chod a měsíčního platu pracovníka. U tohoto pracoviště se ovšem jedná o částečnou automatizaci, kdy člověk není zcela nahrazen robotem, nýbrž je doplněn kobotem.

V kontextu robotizace je vhodné zmínit, že se kolaborativní roboty vyznačují schopností získat zpět investované peníze rychleji ve srovnání s jejich konvenčními průmyslovými kolegy. Tato výhoda vyplývá z podstatně nižších počátečních nákladů, jež jsou ovlivněny menšími rozměry a kratší dobou potřebnou k jejich instalaci, programování či údržbě.

Čas potřebný k montáži jedné svítily zůstane přibližně stejný, bez ohledu na to, zda je použit kolaborativní robot, či nikoli. Cílem implementace kolaborativního robotu je ušetřit obsluhu opakující se činnosti, která představuje šroubování částí svítily. Zlepšením ergonomie s možností přestávek během montáže vlivem pracovní součinnosti obou účastníků dojde ke zvýšení produktivity, a tím i k většímu výdělku peněz.

Náklady by však byly ve skutečnosti poněkud vyšší, protože nebyly zohledněny následující faktory. Patří mezi ně bezpečnostní opatření, jako je například kamerový systém chránící obsluhu před nárazem do citlivých částí těla (oblastí krku a hlavy), dále spotřeba elektrické energie a stlačeného vzduchu, a v neposlední řadě také údržba pracoviště. Ceny jednotlivých komponent zahrnutých v počáteční investici (Tab 6) byly stanoveny na základě rešeršní činnosti, využití umělé inteligence a vlastních praktických zkušeností.

Tab 6) Počáteční investice

Název komponenty	Cena [Kč]
Kolaborativní robot ABB IRB 14050 Single-arm YuMi	690 000
Podložka pod robot	600
Kontrolér OmniCore C30	340 000
FlexPendant	148 000
Servo gripper	80 000
Elektrický rozvaděč	20 000
Kompresorová stanice	30 000
Pracovní stůl	6 000
Pracovní židle	2 000
Upínací přípravek	8 400
Zásobník	3 700
Pracovní deska	800
Pájecí stanice	1 500
3x plastový box	75
Celkem	1 331 075

8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Cílem závěrečné práce bylo virtuálně zprovoznit robotické pracoviště pro vybrané montážní operace, které jsou simultánně prováděny člověkem a kolaborativním robotem. Klíčové bylo rozhodnout o rozdělení jednotlivých operací mezi oba účastníky montáže, přizpůsobit koncový efektor robota požadovaným úkolům a následně nastavit robot pro bezpečnou kolaboraci.

V prvních kapitolách je prostřednictvím rešeršní činnosti nastíněno pozadí řešené problematiky. Spadá zde Průmysl 4.0, vývoj robotiky v průmyslu, kolaborativní roboty a virtuální zprovoznění. Na to navazuje, již v rámci praktické části, systémový rozbor uvádějící problémovou situaci se stanovením cílů. Rozbor rovněž zahrnuje analýzu montovaného výrobku, jímž byla zvolena ruční svítilna pro běžné použití. Tato analýza detailně popisuje složení a funkci svítilny a zároveň rozděluje mezi člověka a kobota úkoly pro její montáž, a to na základě předností obou účastníků. Rozdělení úkolů je doprovázeno postupovým diagramem s časem potřebným pro výrobu jedné svítilny. Poté následuje návrh pracoviště, kde jsou rozebrány všechny jeho komponenty. Důležitou součástí návrhu byla volba robotu s koncovým efektozem. Jako nejvhodnější se ukázal kolaborativní robot IRB 14050 Single-arm YuMi od společnosti ABB, vybavený dvourstým servo gripperem. Hlavním faktorem při výběru byly kolaborativní vlastnosti, a konkrétně u robotu jeho hmotnost, jmenovitě zatížení a dosah. Během návrhu pracoviště bylo počínáno tak, aby byla zajištěna vyhovující ergonomie. Pro možnost implementace pracoviště včetně výrobního procesu byla vytvořena bezpečnostní analýza. V jejím úvodu byly popsány požadavky právních předpisů EU a zhotoveny různé diagramy navazující na další kroky. Mezi tyto kroky patří identifikace relevantních nebezpečí a jejich analýza, přehled identifikovaných významných nebezpečí a odhad počátečního rizika. Na závěr je provedeno vyhodnocení bezpečnostní analýzy, jsou snížena možná rizika a je virtuálně zprovozněno pracoviště. Tento proces zahrnoval výběr programu splňujícího požadavky na toto zprovoznění, návrh řízení a tvorbu HMI, které umožňuje pracovníkovi komunikovat s robotem. Nakonec byl zvolen program RobotStudio od stejné společnosti jako použitý kolaborativní robot. Jeho největší výhodou je, že přesně kopíruje reálný řídicí systém, takže chování robotu v simulaci se téměř shoduje s jeho chováním ve skutečnosti. Vše uzavírá ekonomické vyhodnocení, které se zabývá počátečními investicemi a jejich návratností.

Tento projekt nalezne praktické využití v malých až středních firmách fungujících v režimu HMLV, velkého střídání typu výrobku v malých sériích. Koboty se vyznačují bezpečností, což je činí ideálními pro práci v blízkosti lidí. Lze je tedy nasadit tam, kde by se tradiční průmyslové roboty nevešly kvůli nutnosti použití zábran. Díky vysoké flexibilitě a přesnosti kolaborativního robotu Single-arm YuMi, je toto pracoviště vhodné využít v elektrotechnice při práci s malými součástkami. Navíc jeho kompaktní rozměry a snadná přemístitelnost umožňují rychlé přizpůsobení výrobním potřebám. Projekt poskytuje solidní základ pro bezpečné a efektivní zavedení kolaborativních pracovišť, minimalizuje rizika a náklady spojené s implementací, a tím podporuje modernizaci a zvýšení efektivity výroby.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TAY, Shu; TE CHUAN, Lee; AZIATI, A. H. Nor a AHMAD, Ahmad Nur Aizat. *An Overview of Industry 4.0: Definition, Components, and Government Initiatives*. Online. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. Roč. 10, č. 14, Prosinec 2018, s. 1379-1387. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/332440369_An_Overview_of_Industry_40_Definition_on_Components_and_Government_Initiatives. [citováno 2024-02-17].
- [2] IBM. *IBM Think*. Online. Dostupné z: <https://www.ibm.com/topics/industry-4-0>. [citováno 2024-02-17].
- [3] ISO Consulting s.r.o.. *Průmyslová revoluce*. Digitální. 2019. In: ISO Consulting s.r.o. Dostupné z: <https://www.iso-consulting.cz/post/%C4%8Dtvrt%C3%A1-pr%C5%AFmyslov%C3%A1-a-marketingov%C3%A1-revoluce>. [citováno 2024-02-17].
- [4] SAP. *SAP Products. Supply Chain Management. Industry 4.0 Solutions from SAP. What is industry 4.0?*. Online. Dostupné z: <https://www.sap.com/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html>. [citováno 2024-02-17].
- [5] SAURABH, Vaidya; PRASHANT, Ambad a SANTOSH, Bhosle. *Industry 4.0 – A Glimpse*. Online. Procedia Manufacturing. Roč. 10, 2018, s. 233-238. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>. [citováno 2024-02-17].
- [6] MELOENY, Sam. *Industry 4.0*. Digitální. 2022. In: Calsoft Systems. Dostupné z: <https://www.calsoft.com/what-is-industry-4-0/>. [citováno 2024-02-17].
- [7] TURNEY, Drew. *The History of Industrial Robots, From Single Taskmaster to Self-Teacher*. Online. In: Design and Make with Autodesk, 12.8.2022. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/design-make/videos/history-of-industrial-robots>. [citováno 2024-02-17].
- [8] JONES, Kyle. *Brief history of industrial robotics*. Online. In: Medium, 15.4.2023. Dostupné z: https://medium.com/@kylejones_47003/brief-history-of-industrial-robotics-1a8cbbbdaaae. [citováno 2024-02-17].
- [9] MISITI, Alex. *A History of Industrial Robots*. Online. In: Wevolver, 23.9.2020. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/a-history-of-industrial-robots>. [citováno 2024-02-17].
- [10] BILL, Marina; MÜLLER, Christopher; KRAUS, Werner a BIELLER, Susanne. *World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas*. Online. In: International Federation of Robotics, září 2023. Dostupné z: https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf. [citováno 2024-02-17].
- [11] BILL, Marina; MÜLLER, Christopher; KRAUS, Werner a BIELLER, Susanne. *Annual installations of industrial robots - World*. Digitální. Online. 2023. In: International Federation of Robotics. Dostupné z: https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf. [citováno 2024-02-17].
- [12] BILL, Marina; MÜLLER, Christopher; KRAUS, Werner a BIELLER, Susanne. *Annual installations of industrial robots by customer industry - World*. Digitální. Online. 2023. In: International Federation of Robotics. Dostupné z: https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf. [citováno 2024-02-17].
- [13] BILL, Marina; MÜLLER, Christopher; KRAUS, Werner a BIELLER, Susanne. *Annual installations of industrial robots by application - World*. Digitální. Online. 2023. In:

- International Federation of Robotics. Dostupné z: [https://ifr.org/img/worldrobotics/2023 WR extended version.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf). [citováno 2024-02-17].
- [14] BILL, Marina; MÜLLER, Christopher; KRAUS, Werner a BIELLER, Susanne. *Collaborative and traditional industrial robots*. Digitální. Online. 2023. In: International Federation of Robotics. Dostupné z: <https://ifr.org/img/worldrobotics/2023 WR extended version.pdf>. [citováno 2024-02-17].
- [15] FORCE DESIGN INC. *Collaborative Robots: A Comprehensive Guide*. Online. Dostupné z: <https://forcedesign.biz/collaborative-robots-a-comprehensive-guide/>. [citováno 2024-02-17].
- [16] A3 Association for Advancing Automation. *A3 Robotics. Collaborative Robots. What Are Collaborative Robots?* Online. Dostupné z: <https://www.automate.org/robotics/cobots/what-are-collaborative-robots>. [citováno 2024-02-17].
- [17] SVOBODA, Ondřej. *Řídicí systém z vlastní dílny, 5. díl: Zákaznické aplikace, podpora automatizace*. Online. In: MM Průmyslové spektrum, 9.10.2020. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ridici-system-z-vlastni-dilny-5-dil-zakaznicke-aplikace-podpora-automatizace>. [citováno 2024-02-17].
- [18] Česká logistika. *Logistický slovník JIT*. Online. Dostupné z: <https://www.ceskalogistika.cz/jit/>. [citováno 2024-02-17].
- [19] ZEMA. *Definition and guidelines for collaborative workspaces*. Online. In: European Commission, 17.11.2017. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b6bdb039&appId=PPGMS>. [citováno 2024-02-17].
- [20] OTHMAN, Uqba a YANG, Erfu, 2023. Human–Robot Collaborations in Smart Manufacturing Environments: Review and Outlook. Online. *Sensors*. Roč. 23, č. 12. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s23125663>. [citováno 2024-02-17].
- [21] MATHESON, Eloise; MINTO, Riccardo; ZAMPIERI, Emanuele G. G.; FACCIO, Maurizio a ROSATI, Giulio. Types of use of a collaborative robot. Digitální. 2019. *Robotics*. Roč. 8, č. 4, s. 2. ISSN 2218-6581. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>. [citováno 2024-02-23].
- [22] ZEMA. *(Time-) Efficiency as the foundation of HRC*. Digitální. Online. 2017. In: European Commission. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b6bdb039&appId=PPGMS>. [citováno 2024-02-23].
- [23] SICK. *Safety for collaborative robot applications*. Online. In: SICK, 7.6.2022. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/en/sick-sensor-blog/safety-for-collaborative-robot-applications/w/blog-safety-collaborative-robot-applications/>. [citováno 2024-02-23].
- [24] ISO/TS 15066:2016. *Robots and robotic devices - Collaborative robots*.
- [25] WIREDWORKERS. *WiredWorkers Cobot. Tools*. Online. Dostupné z: <https://www.wiredworkers.io/cobot/tools/>. [citováno 2024-02-23].
- [26] WIREDWORKERS. *3FG15 Three-Finger Gripper*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/end-of-arm-tooling-grippers-4. [citováno 2024-02-23].
- [27] WIREDWORKERS. *VGC10 Vacuum Gripper*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/end-of-arm-tooling-grippers-4. [citováno 2024-02-23].

- [28] WIREDWORKERS. *MG10 Gripper*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/end-of-arm-tooling-grippers-4. [citováno 2024-02-23].
- [29] WIREDWORKERS. *FD310 Dispensing Unit*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/end-of-arm-tooling-dispensers-3. [citováno 2024-02-23].
- [30] WIREDWORKERS. *Sander*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/end-of-arm-tooling-sanders-6. [citováno 2024-02-23].
- [31] WIREDWORKERS. *SD70 Collaborative Screwdriver*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/end-of-arm-tooling-screw-devices-5. [citováno 2024-02-23].
- [32] JAKA. *JAKA Lens 2D*. Barevná fotografie. Online. In: JAKA Robotics. Dostupné z: <https://www.jakarobotics.com/products/vision/>. [citováno 2024-02-23].
- [33] WIREDWORKERS. *Pickit M-HD2*. Barevná fotografie. Online. In: WiredWorkers. Dostupné z: https://shop.wiredworkers.io/en_GB/shop/category/vision-systems-8. [citováno 2024-02-23].
- [34] OWEN-HILL, Alex. *What Is the Best Way to Program a Robot?* Online. In: RoboDK, 9.10.2018. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/program-robot-tips/>. [citováno 2024-02-23].
- [35] EL ZAATARI, Shirine; MAREI, Mohamed; LI, Weidong a USMAN, Zahid, 2019. Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. Online. Robotics and Autonomous Systems. Roč. 116, s. 162-180. ISSN 09218890. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>. [citováno 2024-02-23].
- [36] KUKA. *KUKA Industries. Case Studies. Headlight adjustment*. Online. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-hu/industries/loesungsdatenbank/2019/01/hrc-headlight-adjustment>. [citováno 2024-02-23].
- [37] KUKA. *Seřizování předních světlometů*. Barevná fotografie. Online. 2019. In: KUKA. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-hu/industries/loesungsdatenbank/2019/01/hrc-headlight-adjustment>. [citováno 2024-02-23].
- [38] FANUC. *Fanuc Customer Cases. STIHL*. Online. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/ch/en/customer-cases/stihl>. [citováno 2024-02-23].
- [39] FANUC. *Vizuální kontrola pily*. Barevná fotografie. Online. In: FANUC. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/ch/en/customer-cases/stihl>. [citováno 2024-02-23].
- [40] UNIVERSAL ROBOTS. *Universal Robots Case Stories. Carriere Industrial Supply*. Online. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/case-stories/carriere-industrial-supply/#anchor-video>. [citováno 2024-02-23].
- [41] UNIVERSAL ROBOTS. *Kolaborace při svařování žeber*. Barevná fotografie. Online. 2022. In: Universal Robots. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/case-stories/carriere-industrial-supply/#anchor-video>. [citováno 2024-02-25].
- [42] YASKAWA. *Yaskawa Europe. Applications. Collaborative assembly application with HC10*. Online. Dostupné z: https://www.yaskawa.eu.com/application/case/collaborative-assembly-application-with-hc10_u19240. [citováno 2024-02-25].
- [43] YASKAWA. *Kolaborativní pracoviště pro montáž osvětlení*. Barevná fotografie. Online. 2021. In: Yaskawa EU. Dostupné z: https://www.yaskawa.eu.com/application/case/collaborative-assembly-application-with-hc10_u19240. [citováno 2024-02-25].

- [44] JACKSON, Chad. *The Blurring Line between Virtual Commissioning and Digital Twins*. Online. In: Virtual Commissioning, 1.4.2020. Dostupné z: <https://virtualcommissioning.com/the-blurring-line-between-virtual-commissioning-and-digital-twins/>. [citováno 2024-02-25].
- [45] JACKSON, Chad. *Hybrid Digital Twin for Virtual Commissioning*. Online. In: Virtual Commissioning, 29.1.2020. Dostupné z: <https://virtualcommissioning.com/hybrid-digital-twin-for-virtual-commissioning/>. [citováno 2024-02-25].
- [46] OWEN-HILL, Alex. *Virtual Commissioning: Is It the Future for Automation?* Online. In: RoboDK, 16.1.2023. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/virtual-commissioning/>. [citováno 2024-02-25].
- [47] ABS. *Porovnání tradičního a virtuálního zprovoznění*. Digitální. Online. In: ABS-Ingénieurdienstleistung GmbH. Dostupné z: <https://www.abs-id.de/en/services/virtual-commissioning/>. [citováno 2024-02-25].
- [48] WICKS, Matt. *PLC-based vs. proprietary robotic controls*. Online. In: Control Engineering, 22.1.2014. Dostupné z: <https://www.controleng.com/articles/plc-based-vs-proprietary-robotic-controls/>. [citováno 2024-02-25].
- [49] NIEVES, Erik. *PLC or No PLC?: Robot Controller Takes on More*. Online. In: A3 Association for Advancing Automation, 2.7.2004. Dostupné z: <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/plc-or-no-plc-robot-controller-takes-on-more>. [citováno 2024-02-25].
- [50] BRAŽINA, Jakub. *Virtuální zprovoznění výrobního systému*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. 2019.
- [51] ABB. *Single-arm YuMi IRB 14050*. Barevná fotografie. Online. 2018. In: ABB. Dostupné z: <https://webshop.robotics.abb.com/tw/single-arm-yumi-irb-14050-series.html>. [citováno 2024-03-27].
- [52] ABB. *Single-arm YuMi IRB 14050 Gripper*. Barevná fotografie. Online. 2018. In: ABB. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/kolaborativni-roboty/yumi/single-arm-yumi>. [citováno 2024-03-27].
- [53] MOROZOV, Max. *IKEA langfjall office chair*. Online. In: GrabCAD, 8.1.2024. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/ikea-langfjall-office-chair-1>. [citováno 2024-03-27].
- [54] EXTOL. *Stanice pájecí s LCD a elektronickou regulací teploty a kalibrací*. Barevná fotografie. Online. In: Extol Industrial. Dostupné z: <https://www.extol.cz/stanice-pajeci-s-lcd-a-elektronickou-regulaci-teploty-a-kalibraci>. [citováno 2024-03-27].
- [55] REDAKCE ČASOPISU. *Implementace kolaborativních robotů z pohledu legislativy*. Online. ElektroPrumysl.cz. 16.8.2019, roč. 9, s. 10-13. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/implementace-kolaborativnich-robotu-z-pohledu-legislativy>. [citováno 2024-04-15].
- [56] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [57] BLECHA, Petr. *Legislativní požadavky EU na bezpečnost strojních zařízení*. Online. In: VUT E-learning, 2022. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/500926/mod_resource/content/2/GMR_03_Legislativni%20požadavky%20EU_Kansas_Cernoby1.pdf. [citováno 2024-04-15].
- [58] AUTOMA. *Bezpečnost kolaborativních robotů*. Online. Automa. Září 2017, roč. 23, č. 8-9, s. 74-76. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/bezpecnost-kolaborativnich-robotu-2017_08_0_11040/. [citováno 2024-04-15].

- [59] BLECHA, Petr. *Metodický přístup ke snižování rizika u strojních zařízení*. Online. In: VUT E-learning, 2022. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/500929/mod_resource/content/1/GMR_06_Metodicky%20pristup.pdf. [citováno 2024-04-15].
- [60] ČSN EN ISO 12100:2011. *Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika*.
- [61] TAOUFIK, Ismael. *Návrh koncového efektoru pro kolaborativní robot*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. 2020.
- [62] BLECHA, Petr. *Graf pro odhad velikosti rizika*. Digitální. Online. 2022. In: VUT E-learning. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/500929/mod_resource/content/1/GMR_06_Metodicky%20pristup.pdf. [citováno 2024-04-15].
- [63] ČSN EN ISO 10218-1:2012. *Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 1: Roboty*.
- [64] ČSN EN 60204-1 ed.3:2019. *Bezpečnost strojních zařízení - Elektrická zařízení strojů - Část 1: Obecné požadavky*.
- [65] ABB. *FlexPendant SDK 6.13.04*. Online. IN: ABB Developer Center. 1.3.2022. Dostupné z: <https://developercenter.robotstudio.com/lexpendent-sdk/download>. [citováno 2024-05-02].
- [66] ABB. *OmniCore App SDK and AppMaker 1.4*. Online. IN: ABB Developer Center. 1.9.2023. Dostupné z: <https://developercenter.robotstudio.com/omnicore-sdk/download>. [citováno 2024-05-02].

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratk a symbolů

Zkratka	Význam	Jednotka
CE	Conformité Européenne	[-]
ČR	Česká republika	[-]
EOAT	End Of Arm Tooling	[-]
EU	Evropská unie	[-]
HIL	Hardware-in-the-Loop	[-]
HMI	Human Machine Interface	[-]
HMLV	High-Mix Low-Volume	[-]
HRC	Human-Robot Collaboration	[-]
I/O	Input/Output	[-]
IoT	Internet of Things	[-]
JIT	Just-in-Time	[-]
Kobot	Kolaborativní robot	[-]
L	Délka závitu	[mm]
LED	Light-Emitting Diode	[-]
mm	milimetr	[-]
MIL	Model-in-the-Loop	[-]
P	Stoupání závitu	[mm]
PLC	Programovatelný logický automat	[-]
Pst	Pravděpodobnost	[-]
s	sekunda	[-]
SIL	Software-in-the-Loop	[-]
2D	Dvourozměrný	[-]
3D	Trojrozměrný	[-]
φ	Celkový úhel ve šroubovacím procesu	[°]

10.2 Seznam tabulek

Tab 1)	Rozdělení operací mezi člověkem a kolaborativním robotem	39
Tab 2)	Identifikovaná relevantní nebezpečí (ukázka).....	51
Tab 3)	Analýza významných nebezpečí (ukázka)	52

Tab 4)	Odhad počátečních rizik u identifikovaných významných nebezpečí (ukázka)	54
Tab 5)	Formulář pro snížení rizika	55
Tab 6)	Počáteční investice.....	67

10.3 Seznam obrázků

Obr. 1)	Průmyslové revoluce a jejich inovace [3]	17
Obr. 2)	Technologické nástroje Průmyslu 4.0 [6]	18
Obr. 3)	Počet nainstalovaných průmyslových robotů za daný rok [11].....	20
Obr. 4)	Počet nainstalovaných průmyslových robotů podle odvětví [12]	21
Obr. 5)	Počet nainstalovaných průmyslových robotů podle použití [13]	21
Obr. 6)	Počet nainstalovaných průmyslových/kolaborativních robotů [14]	22
Obr. 7)	Typ spolupráce mezi člověkem a robotem [21]	24
Obr. 8)	Časová efektivita v rámci HRC [22].....	25
Obr. 9)	Biomechanické limity [24]	27
Obr. 10)	Gripper a) prstový, b) vakuový, c) magnetický [26] [27] [28].....	28
Obr. 11)	a) Dávkovač lepidla, b) Bruska, c) Šroubovák [29] [30] [31].....	28
Obr. 12)	a) 2D kamera, b) 3D kamera [32] [33].....	28
Obr. 13)	Seřizování předních světlometů [37]	30
Obr. 14)	Vizuální kontrola pily [39]	30
Obr. 15)	Kolaborace při svařování žeber [41].....	31
Obr. 16)	Kolaborativní pracoviště pro montáž osvětlení [43].....	31
Obr. 17)	Porovnání tradičního a virtuálního zprovoznění – časová úspora [47].....	32
Obr. 18)	Ruční svítilna pro běžné použití	36
Obr. 19)	Schéma elektrického obvodu svítilny	36
Obr. 20)	Uzávěr, tělo a hlava svítilny	37
Obr. 21)	Uzávěr svítilny.....	37
Obr. 22)	Tělo svítilny.....	38
Obr. 23)	Hlava svítilny.....	38
Obr. 24)	LED soustava.....	39
Obr. 25)	Postupový diagram montáže svítilny	39
Obr. 26)	Kolaborativní pracoviště	41
Obr. 27)	Pracovní obálky kobota a člověka	41
Obr. 28)	a) Single-arm YuMi, b) Gripper se servomotorem [51] [52].....	42
Obr. 29)	Pracovní židle	42
Obr. 30)	Pracovní stůl	43

Obr. 31) a) Upínací přípravek, b) Řez přípravkem.....	43
Obr. 32) Zásobník na součásti svítilny	44
Obr. 33) Box na součásti svítilny	44
Obr. 34) Pracovní podložka	45
Obr. 35) Extol Industrial pájecí stanice [54]	45
Obr. 36) Základní blokový diagram pracoviště.....	49
Obr. 37) Blokový diagram pracoviště.....	50
Obr. 38) Nebezpečné prostory pracoviště.....	51
Obr. 39) Graf pro odhad velikosti rizika [62]	53
Obr. 40) Navrhované pracoviště v RobotStudiu	57
Obr. 41) Založení projektu v RobotStudiu.....	57
Obr. 42) RobotWare pro OmniCore	58
Obr. 43) Tvorba virtuálního kontroléru „From Layout“	58
Obr. 44) Výběr kolaborativního robotu	59
Obr. 45) Přidání koncového efektoru	59
Obr. 46) Importování vlastních objektů.....	60
Obr. 47) a) Tvorba mechanismu, b) Zasunutý válec, c) Vysunutý válec	60
Obr. 48) Tvorba pracovních objektů.....	61
Obr. 49) a) Signály gripperu (část), b) Systémové signály robotu.....	61
Obr. 50) Logika snímače v upínacím přípravku.....	62
Obr. 51) Seznam událostí v „Event Manager“	62
Obr. 52) Část procedury šroubování.....	63
Obr. 53) Část programu v editoru RAPID	64
Obr. 54) Vývojový diagram programu	65
Obr. 55) HMI – Hlavní menu	66
Obr. 56) HMI – Montáž vybrané svítilny	66

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – IRB 14050 Single-arm Yumi (katalog)

Příloha č.2 – Identifikovaná relevantní nebezpečí

Příloha č.3 – Analýza významných nebezpečí

Příloha č.4 – Odhad počátečních rizik u identifikovaných významných nebezpečí

Příloha č.5 – Formuláře pro snížení rizika

Příloha č.6 – RAPID kód (RAPID.txt)

Příloha č.7 – HMI program (Montaz_Svitilen.appm)

Příloha č.8 – Archiv pracoviště z RobotStudia (KolaborativniPracoviste.rspag)

Příloha č.9 – Video simulace (Video_Simulace.mp4)