



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KONSTRUKCE A APLIKACE KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ V KONTEXTU PRŮMYSLU 4.0

DESIGN AND APPLICATION OF COLLABORATION ROBOTS ACCORDING OF I4.0

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Salaj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Jakub Salaj**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**
Akademický rok: 2023/24

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

Konstrukce a aplikace kolaborativních robotů v kontextu Průmyslu 4.0

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podrobný popis současného stavu v oblasti konstrukce kolaborativních robotů (též kobotů), včetně vhodných periferních zařízení a koncových efektorů, ze kterých se tvoří robotizovaná technologická pracoviště, která jsou společná pro práci s člověkem. Součástí BP je i uvedení příkladů z praxe několika provedení robotizovaných pracovišť libovolné technologie (manipulace s materiálem a pod.), kdy nejméně jedno autorem BP nalezené bude komentováno co do provedení, funkce a účelu, s ohledem na zásady Průmysl 4.0.

Cíle bakalářské práce:

Systémový rozbor řešené problematiky robotizace procesů s koboty a člověkem.

Rešerše známých řešení (tj. stávajících, praxí ověřených).

Nalezení a popis stávajících i nových, pokrokových způsobů v oblasti konstrukce a aplikace kobotů.

Principy a zásady Průmyslu 4.0.

Kolaborativní roboty v kontextu zásad P4.0.

Vyhodnocení a vlastní závěry sledované problematiky.

Vlastní závěry a/nebo doporučení pro další rozvoj řešené problematiky.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá kolaborativními roboty a jejich uplatněním v rámci výrobních technologií se zaměřením na potenciál v implementaci principů Průmyslu 4.0. V teoretické části práce byl proveden systémový rozbor problematiky robotizace výrobních procesů kolaborativními roboty a také systémový rozbor kobotů jako technologické soustavy a požadavků, které jsou kladeny příslušnými normami na jejich bezpečný provoz. V rešeršní části byla demonstrována nabídka konstrukčních řešení trojice nejvýznamnějších výrobců kobotů a koncových efektorů. Hlavním rešeršním cílem bylo vyhledání a popis úspěšných implementací v praktických výrobních aplikacích. Dílčím cílem této práce bylo vyhodnocení pracoviště kobotu v kontextu Průmyslu 4.0. Vyhodnocovaným pracovištěm byla stanice měření elektrického odporu palivového filtru při jeho výrobě, jejíž fungování bylo v práci popsáno a vyhodnoceno pomocí SWOT analýzy. V závěru práce bylo na základě získaných poznatků formulováno celkové vyhodnocení sledované problematiky a doporučení pro její další rozvoj.

ABSTRACT

Presented bachelor's thesis deals with collaborative robots and their application in manufacturing with a focus on the implementation of Industry 4.0 principles. In the theoretical part of the thesis, a system analysis of the robotization of production processes by collaborative robots was carried out, as well as a system analysis of cobots as a technological system and the requirements that are set by the relevant standards for their safe operation. In the literature review, a range of design solutions offered by three major manufacturers of cobots and end effectors were demonstrated. The main research objective was to describe successful implementations in practical manufacturing applications. A sub-objective of this thesis was to evaluate the cobot workplace in the context of Industry 4.0. The evaluated workplace was a station for measuring the electric resistance of the fuel-filter during its production, whose operation was described and evaluated by means of a SWOT analysis. In the conclusion of the thesis, based on the obtained findings, an overall evaluation of the monitored issue and recommendations for its further development were formulated.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kolaborativní roboty, koboty, Průmysl 4.0, štíhlá výroba, kolaborativní pracoviště.

KEYWORDS

Collaborative robots, cobots, Industry 4.0, lean manufacturing, collaborative workspace.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SALAJ, Jakub. *Konstrukce a aplikace kolaborativních robotů v kontextu Průmyslu 4.0*. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157794>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Radku Knoflíčkovi za poskytnutí cenných rad, ochotu a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Též děkuji firmě Mann+Hummel (CZ), v.o.s. a Ing. Miloši Obůrkovi za exkurze do výrobních prostor společnosti.

Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za neutuchající podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 20.05.2024

Jakub Salaj v.r.

OBSAH

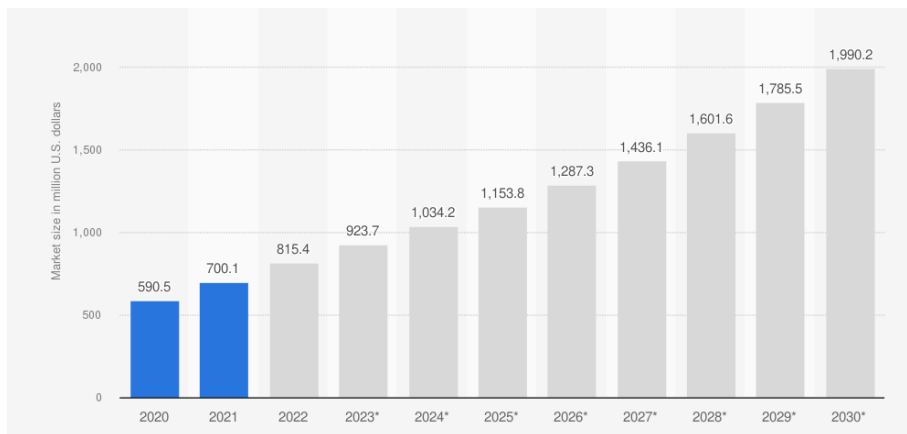
| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Systémový rozbor řešení problematiky robotizace procesů s koboty a člověkem | 2 |
| 2.1 | Použitá terminologie | 2 |
| 2.2 | Systémový přístup k robotizaci výrobních pracovišť | 4 |
| 2.3 | Systémový rozbor koncepce, úlohy a aplikace | 5 |
| 2.4 | Systémový rozbor kobotu jako technologické soustavy | 6 |
| 2.4.1 | Subsystém MW | 7 |
| 2.4.2 | Subsystém HW | 11 |
| 2.4.3 | Subsystém SW a BW | 12 |
| 2.4.4 | Subsystém programátora a obsluhy | 13 |
| 2.5 | Systémový rozbor kobotu jako bezpečné soustavy | 14 |
| 2.5.1 | Legislativní rámec a příslušné normy | 14 |
| 2.5.2 | Analýza rizik | 15 |
| 2.5.3 | Bezpečnostní prvky pro zajištění bezpečnosti při práci s kolaborativními roboty | 16 |
| 3 | Rešerše známých řešení | 19 |
| 3.1 | Rešerše nabídky vybraných výrobců kolaborativních robotů a jejich konstrukční řešení | 19 |
| 3.1.1 | FANUC | 19 |
| 3.1.2 | ABB | 20 |
| 3.1.3 | Kuka | 21 |
| 3.2 | Rešerše nabídky koncových efektorů a jejich konstrukční řešení | 22 |
| 3.2.1 | Kolaborativní mechanické úchopné efekторы | 22 |
| 3.2.2 | Pneumatické koncové efekторы | 23 |
| 3.3 | Rešerše aplikací kolaborativních robotů | 24 |
| 3.3.1 | Manipulační úlohy | 24 |
| 3.3.2 | Bin picking | 25 |
| 3.3.3 | Montáž | 25 |
| 3.3.4 | Povrchové úpravy | 26 |
| 3.3.5 | Obsluha strojů | 27 |
| 3.3.6 | Inspekce kvality | 28 |
| 3.3.7 | Paletizace | 30 |
| 3.3.8 | Lepení a dávkování adhezivních médií | 30 |
| 3.3.9 | Svařování | 31 |
| 4 | Principy a zásady Průmyslu 4.0 | 34 |
| 4.1 | Historie | 34 |
| 4.2 | Klíčové koncepty Průmyslu 4.0 | 34 |
| 4.2.1 | Smart factory | 34 |
| 4.2.2 | Kyber-fyzikální systémy a IoT | 34 |
| 4.3 | Kolaborativní roboty v kontextu zásad Průmyslu 4.0 | 36 |
| 5 | Vyhodnocení konkrétního pracoviště kobotu s ohledem na zásady I4.0 | 37 |
| 5.1 | O koncernu Mann+Hummel | 37 |
| 5.2 | Deskripce a vyhodnocení pracoviště kobotu na výrobní lince palivových filtrů | 37 |
| 5.2.1 | Úvod do místní problematiky | 37 |
| 5.2.2 | Layout celé výrobní linky a pracoviště kobotu | 38 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.2.3 | Deskripce pracovní činnosti kobotu | 38 |
| 5.2.4 | Specifikace aplikace inspekce kvality a rozhodovací mapa procesu..... | 39 |
| 5.2.5 | Objekt manipulace..... | 41 |
| 5.2.6 | Kobot..... | 41 |
| 5.2.7 | Koncový efektor..... | 41 |
| 5.2.8 | Vyhodnocení pracoviště v kontextu zásad I4.0..... | 42 |
| 5.3 | Identifikace dalších příležitostí automatizace v kontextu I4.0 | 43 |
| 5.3.1 | Výrobní linka palivových filtrů pro nákladní automobily | 43 |
| 5.3.2 | Stanice vstřikovacích lisů..... | 44 |
| 6 | Vyhodnocení a vlastní závěry sledované problematiky | 45 |
| 7 | Doporučení pro další rozvoj řešené problematiky | 46 |
| 8 | Závěr | 47 |
| 9 | Seznam použitých zdrojů | 49 |
| 10 | Seznam zkratk, obrázků a tabulek..... | 55 |
| 10.1 | Seznam zkratk | 55 |
| 10.2 | Seznam tabulek | 55 |
| 10.3 | Seznam obrázků..... | 55 |

1 ÚVOD

V této bakalářské práci je analyzována problematika kolaborativních robotů a jejich potenciálu v rámci Průmyslu 4.0 (dále jen „I4.0“). Kolaborativní roboty (též koboty) jsou specifickým typem robotů, které mohou kolabovat nebo koexistovat v rámci sdíleného pracovního prostoru s člověkem.

Motivací pro zvolení tohoto tématu bylo mimo jiné zjištění, že kolaborativní roboty jsou stále častěji implementovány ve výrobních kapacitách různých firem, protože nachází uplatnění v široké škále aplikací a oproti běžným PRaM nabízí řadu benefitů. Dle současných predikcí má trh kolaborativních robotů ještě před sebou značný růst (viz Obr. 1), lze tedy očekávat, že v následujících letech bude na trhu řada firem, která bude hledat možnosti, jak tuto technologii uplatnit i ve své výrobě, aby zůstala konkurenceschopná.



Obr. 1 Predikovaný růst kapitalizace trhu s kolaborativními roboty do roku 2030 v milionech USD, převzato z: [1].

Dalším současným trendem, který rezonuje řadou společností jsou principy I4.0, a proto je zajímavou otázkou, jak mohou být koboty integrovány do širšího ekosystému I4.0, který zahrnuje kyber-fyzikální systémy (CPS), internet věcí (IoT) a pokročilé analytické nástroje pro zpracování velkých dat. Tyto technologie jsou zásadní pro koncept tzv. chytrých továren, které jsou schopné autonomní komunikace a optimalizace procesů v reálném čase.

V teoretické části práce je proveden systémový rozbor problematiky robotizace výrobních procesů s koboty a člověkem, jejich samotné konstrukce vč. subsystémů a také požadavků na bezpečnost kolaborativních pracovišť. V rešeršní části práce jsou představena nabízená konstrukční řešení kobotů a koncových efektorů od vybraných dodavatelů, hlavním těžištěm rešeršní části je demonstrace jejich uplatnění v praxi ověřených aplikacích. Dílčím cílem práce je poté vyhodnocení vybraného pracoviště v kontextu I4.0, které jsou v práci též představeny. Vyhodnocovaným pracovištěm je stanice na výrobní lince palivových filtrů měřící elektrický odpor součástek. Ve vyhodnocení je provedena deskripce fungování linky a činnosti kobotu, specifikace objektu manipulace, kobotu a koncového efektoru, zjištěné skutečnosti jsou vyhodnoceny pomocí SWOT diagramu. V rámci téže výroby se nacházejí i další příležitosti k implementaci kobotů. V práci jsou proto sestaveny prvotní návrhy na jejich optimalizaci právě za použití kobotů. Na základě zjištěných poznatků této práce jsou formulovány závěry ke sledované problematice, doporučení pro její další rozvoj a potenciální směřování další výzkumné činnosti.

V rámci rešerše úspěšných implementací kolaborativních robotů jsou popsány zkušenosti z jejich nasazování ve společnosti Mann+Hummel (CZ), v.o.s., s jejímž svolením bylo podrobena i jedno z pracovišť podrobnější analýze.

2 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY ROBOTIZACE PROCESŮ S KOBOTY A ČLOVĚ- KEM

Pro pochopení problematiky, jak přistupovat ke kolaborativním robotům při jejich uplatnění v průmyslové praxi, byl zvolen systémový rozbor. Takový přístup je klíčovým nástrojem pro dosažení optimálních výsledků při robotizaci procesů [2].

Pro systémový rozbor je klíčové užívat sjednocené terminologie, ta je definována níže. Přednostními prameny jsou normy platné v České republice a v případě jejich absence je subsidiárně využito zahraničních norem nebo jiné odborné literatury.

Systémový rozbor byl aplikován:

- na přístup k robotizaci pracoviště (viz kapitola 2.2),
- stanovení koncepce, úlohy a aplikace (viz kapitola 2.3),
- kobota jako technologickou soustavu (viz kapitola 2.4),
- kobota jako bezpečnou soustavu, tedy z pohledu plnění zákonných a normových požadavků na bezpečný provoz (viz kapitola 2.5).

2.1 Použitá terminologie

Robot

Robot je termín českého původu, který použil prvně ve svém díle R.U.R. spisovatel Karel Čapek, které ve kterém byl popisován humanoidních robotů sloužící lidem, autorství je nicméně připisováno jeho bratru, Josefovi [3]. Tento termín poté převzal Isaac Asimov při pojmenování nově vznikající disciplíny, robotiky [4].

V současné technické praxi roboty chápeme jako stroj pracující do jisté míry samostatně na určených úkolech. Úkony vykonává v různém spektru interakcí s okolím a zadavatelem [5].

Průmyslový robot

Průmyslové roboty jsou z pohledu bezpečnosti regulovány normou ČSN EN ISO 10218-1, která je definuje jako: „*automaticky ovládaný, reprogramovatelný víceúčelový manipulátor, programovatelný ve třech nebo více osách, který může být buď pevný nebo mobilní, určený k použití v průmyslové automatizaci*“ [6].

Kolaborativní robot (dále též kobot)

Termín kolaborativní robot byl převzat z anglické terminologie, ale v českých technických normách je definován pod pojmem spolupracující robot dle normy ČSN EN ISO 10218-2 [7] jakožto: „*robot navržený pro přímou spolupráci s člověkem uvnitř určeného pracovního prostoru spolupráce*“.

Související norma ČSN EN ISO 10218-1 kolaborativního robota jako takového nedefinuje, ale připouští tzv. provozní spolupráci, kterou chápe jako speciální druh provozu, kdy dochází k interakci mezi člověkem a robotem, kteří sdílejí pracovní prostor spolupráce (viz dále) [6].

Pracovní prostor spolupráce

Pracovní prostor spolupráce je chápán v souladu s definicí dle ČSN EN ISO 10218-2 jako: „*pracovní prostor uvnitř zabezpečeného prostoru, kde robot a člověk provádějí úkoly současně během výrobního provozu* [7].“ Zabezpečeným prostor je určen perimetrem bezpečnostní ochrany.

Machineware (dále též MW)

Pojmem machineware chápeme fyzické vybavení robotu, tj. pohybový mechanismus robota, pohonné jednotky, zdroje a rozvody energie a další nadstavby, např. koncové efekторы [8].

Hardware (dále též HW)

Hardwarem rozumíme výpočetní a řídicí jednotky, elektronické součásti a komponenty, dále také periferní zařízení [9].

Software (dále též SW)

Softwarem v *sensu largo* rozumíme množinu programů a procesů, které jsou spojeny s fungováním hardwaru [10]. V kontextu kolaborativních robotů jej chápeme v *sensu stricto* jakožto řídicí systémy, na nichž je možno spouštět jednotlivé programy umožňující kontrolu pohybu, navigaci v prostoru a plán aktivit [8].

Brainware (dále též BW)

Koncept „*brainware*“ nebo též „*brainware computing*“ je nový koncept navržen profesorem Eui-Nam Huh a Md Imtiaz Hossainem z jihokorejské Kying Hee univerzity. Ve svém článku navrhuje koncept jednotlivých mozkovent (tj. expertních, znalostních center), které budou umístěné na centrálním cloudovém úložišti, jejichž kopie budou do robotem lokálně staženy v případě potřeby a poté, co již nebudou třeba, budou opět smazána, ale nasbíraný *dataset* bude moci být využit ke zlepšování globálního modelu [4].

Koncový efektor

Koncovým efektozem v souladu s normou ČSN EN ISO 10218-1 je myšleno: „*zařízení speciálně navržené k mechanickému rozhraní, které robotu umožňuje vykonávat svůj úkol*“ [6].“

Nástrojový střed

TCP je klíčovým parametrem pro fungování kobotu v souladu s normou ČSN EN ISO 10218-1 jej chápeme jako bod stanovený ve vztahu k souřadnicovému systému mechanického rozhraní.

Bezpečnostní rychlost

Bezpečnostní rychlosti norma ČSN EN ISO 10218-1 dělí na dvě úrovně, a to na monitorovanou bezpečnostní rychlost, kterou definuje jako: „*bezpečnostní funkce, která způsobí ochranné zastavení, když souřadnicová rychlost bodu vzhledem k TCP nebo rychlost jedné nebo více os převyšuje specifikovanou mez hodnoty.*“ Konzervativnější úroveň je poté omezená bezpečnostní rychlost, která je definována jako: „*funkce monitorované bezpečnosti, která omezuje rychlost robota na 250 mm/s nebo menší*“ [6].

Kvazistatický kontakt

Kvazistatickým kontaktem rozumíme sevření části těla ramenem kobotu a jinou fixní nebo pohybující se překážku [11].

Přechodový kontakt

Přechodovým kontaktem rozumíme kolizi mezi kobotem a částí lidská těla, kdy ale není žádná část těla sevřena, a tedy je možné uhnout [11].

2.2 Systémový přístup k robotizaci výrobních pracovišť

K robotizaci výrobních pracovišť dochází napříč světem zejména z ekonomických důvodů, neboť přináší snížení nákladů a zmetkovosti, a naopak zvýšení produktivity, a tedy významně vstupuje do konkurenceschopnosti každého podniku.

V současné době mnoho firem zkoumá problematiku robotizace výrobního pracoviště, a to buď s pomocí běžných průmyslových robotů nebo právě s pomocí kobotů.

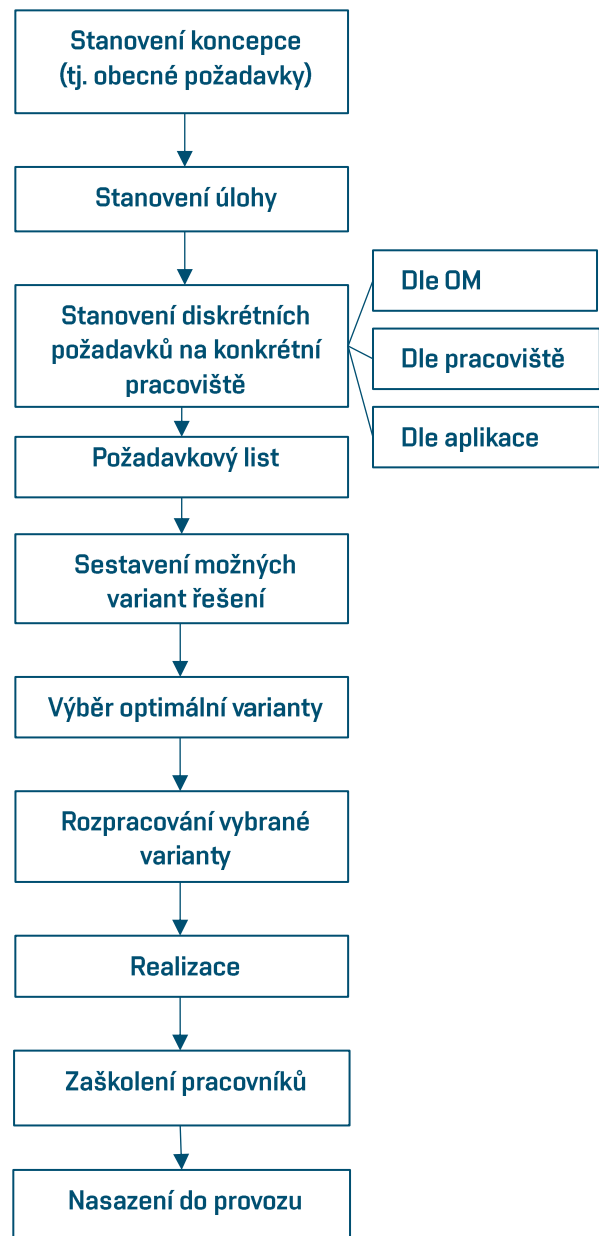
V obou případech je vhodné zvolit systémový přístup k robotizaci, který lze kodifikovat pomocí vnitropodnikových směrnic a metodik, aby bylo v rámci jedné firmy postupováno totožně.

Příkladem výše uvedené metodiky může být přístup dle Obr. 2, který byl navržen na základě obecných přístupů pro PRaM [12][13] a upraven o poznatky metodiky využívané při navrhování strojních součástí podle Shigleyho [14], dle kterého je nutné učinit množinu apriorních rozhodnutí, které základním způsobem omezí množinu možných řešení a určí směřování řešení. Tato apriorní rozhodnutí jsou vnesena do vstupních obecných požadavků neboli koncepce. Nejčastějšími příklady jsou návratnost investice nebo ovládací rozhraní dle podnikových norem nebo standardů.

Z parametrů úlohy jsou pak stanoveny návrhové proměnné pro danou úlohu vycházející zejm. z objektu manipulace (OM), prostředí a dané aplikace, které jsou spolu s koncepcí shrnuty do požadavkového listu. Pro množinu těchto požadavků jsou sestaveny možné varianty řešení a poté dle zadaných kritérií vybrána optimální varianta.

Pro objektivní posouzení navržených variant je nutné stanovit kritéria a jejich začlenění do hodnotového čísla, na jejichž základě budou vyhodnocovány a optimalizovány [14]. Varianta s nejvyšším hodnotovým číslem je poté zvolena pro realizaci.

Pro výběr těchto kritérií je možné využít systémových přístupů (viz další kapitoly). Jedná se o jeden z možných přístupů k analýzám složitých objektů a procesů, které se na nich realizují [2].

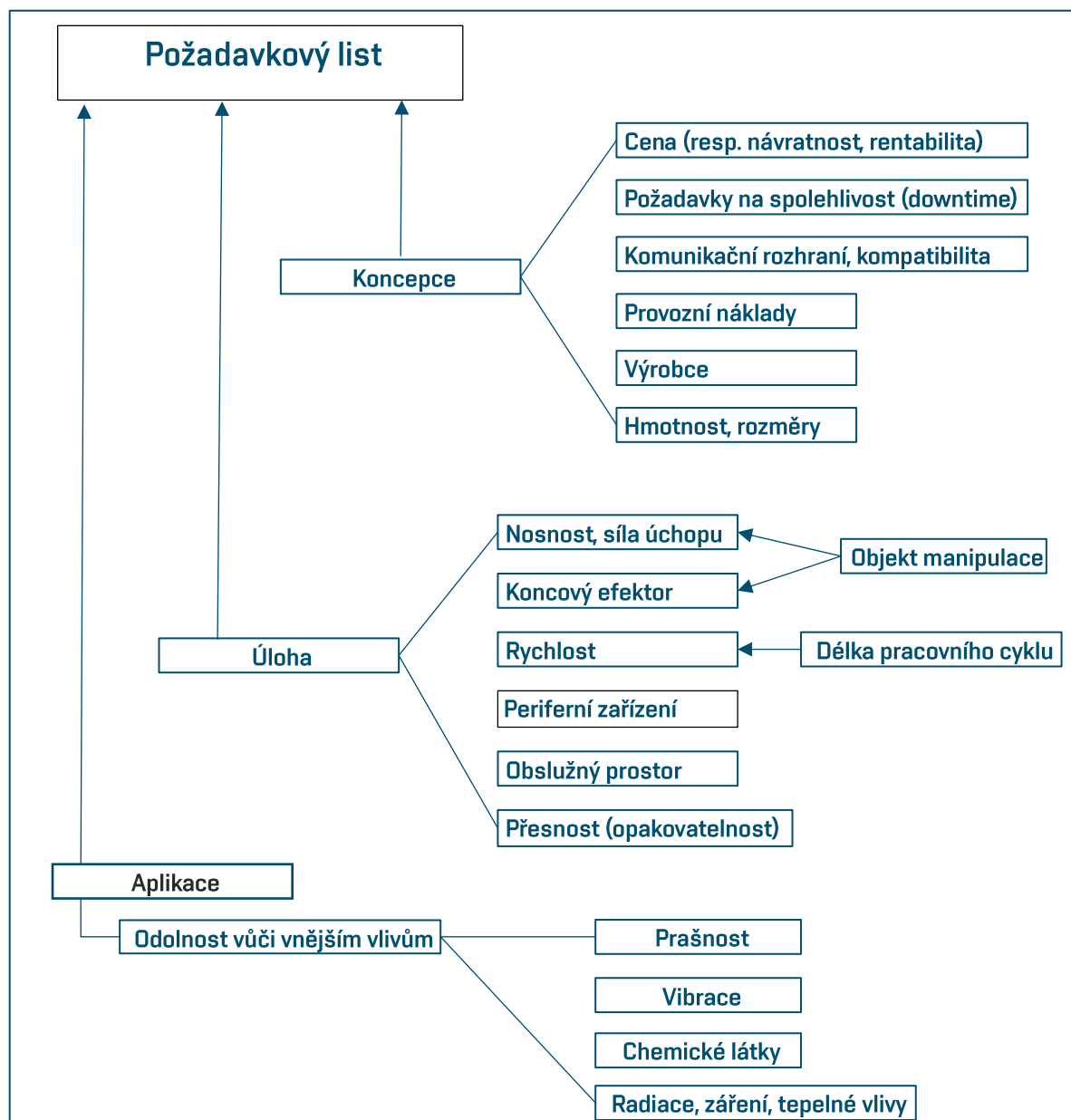


Obr. 2 Systémový přístup k vyhodnocování robotizace pracovišť.

2.3 Systémový rozbor koncepce, úlohy a aplikace

Stanovení koncepce (tj. obecných požadavků), formulace konkrétní úlohy a charakteristiky aplikace jsou prvotními úkony pro robotizaci daného výrobního procesu nebo pracoviště [12]. V praxi je běžné, že nejsou robotizována pouze nově vzniklá pracoviště, ale jsou optimalizována již fungující pracoviště a výrobní systémy. V těchto případech je vhodné zhodnotit proveditelnost v rámci omezení současné realizace.

Systémy konceptu, úlohy i aplikace jsou závislé soustavy, a proto jsou podrobovány rozboru současně (viz Obr. 3).



Obr. 3 Systémový rozbor koncepce, úlohy a aplikace při robotizaci výrobních procesů [12].

Požadavkový list

Požadavkový list je souhrn všech požadavků vycházejících z koncepce, dále z požadavků specifických pro danou úlohu a též aplikačních specifik. Na základě tohoto listu jsou sestavovány možné varianty řešení a hodnotící kritéria, z nichž poté vyhodnocena optimální varianta (viz kapitola 2.2).

V některých zdrojích (např. Klus [5]) se objevují dva požadavkové listy, a to úlohy a pracoviště, vhodnější se ale jeví komplexně zohledňovat obé a uvažovat jejich vzájemný vliv.

Koncepce

Koncepce je souborem všeobecných požadavků. Obsah takovéto koncepce může být u každé realizace velmi odlišný. Někteří investoři nevyužívají výhod jednotné koncepce a všechny příležitosti vyhodnocují jednotlivě, zatímco někteří nad tento rámec mohou stanovovat pravidla jednotné kompatibility, požadavků na spolehlivost, resp. servisní úkony a *downtime* atd. Jednotná koncepce může přinést úspory z rozsahu, pokud je pro tento účel navržena a je-li její nasazení průběžně vyhodnocováno a optimalizováno.

Pracovní úkol

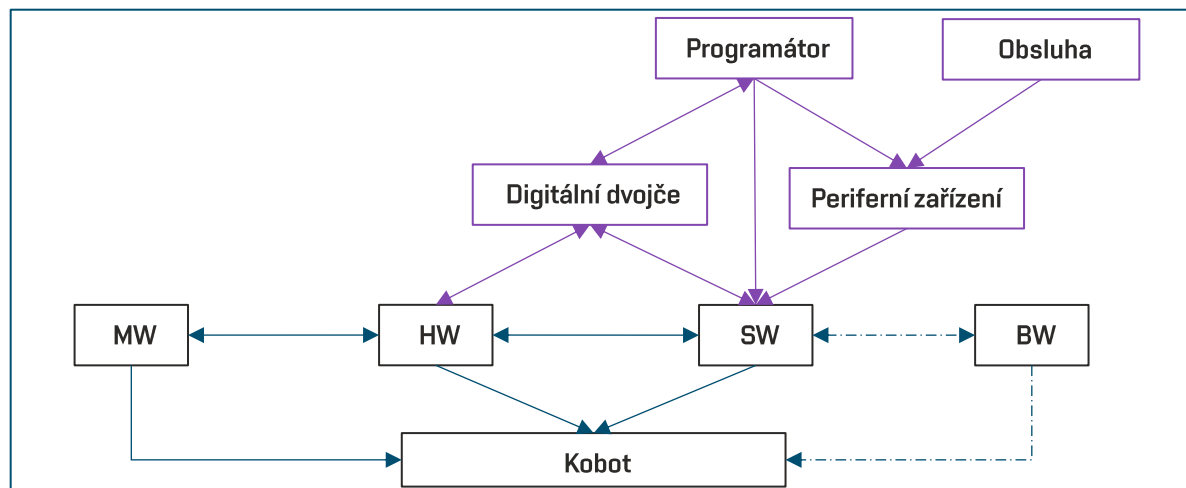
Pracovní úkol je popis souboru činností, které musí kobot vykonat, aby bylo dosaženo cíleného výsledku. V této oblasti je nutné se zaměřit nejen na činnosti samotnou, ale i na objekt manipulace. Tyto skutečnosti se promítají do požadovaných kritérií. Nejběžnější požadavky mohou být: hmotnost kobotu, nosnost, rozměry, velikost pracovního prostoru, požadavky na periferní zařízení (např. systémy strojového vidění atp.) a případně požadované ovládání. Pro určité aplikace je robot programován přímo obsluhou pomocí ručního programovacího panelu a využitím vedení (tzv. *on-line* programování), zatímco v některých aplikacích je robot naprogramován programátorem nebo integrátorem (tzv. *off-line* programování) a od spolupracujícího pracovníka se poté očekává minimální interakce s programem robotu.

Aplikační specifiky

Aplikační specifiky jsou dané konkrétní situací, kde se bude kobot během plnění pracovního úkolu nacházet a zohlednit zejm. negativní vlivy, které by ovlivňovaly funkčnost a spolehlivost celého řešení a je nutné je zohlednit v požadavkovém listě vhodně zvolenými kritérii.

2.4 Systémový rozbor kobotu jako technologické soustavy

Cílem tohoto systémového rozboru je identifikace charakteristik, které umožní naplnění pracovního úkolu dle kritérií v požadavkovém listu. V jeho grafickém znázornění tohoto systému jakožto technologické soustavy (viz Obr. 4) je kladen důraz na jednotlivé technologické prvky tvořící kobotu (modře) a externí interakce (fialově).

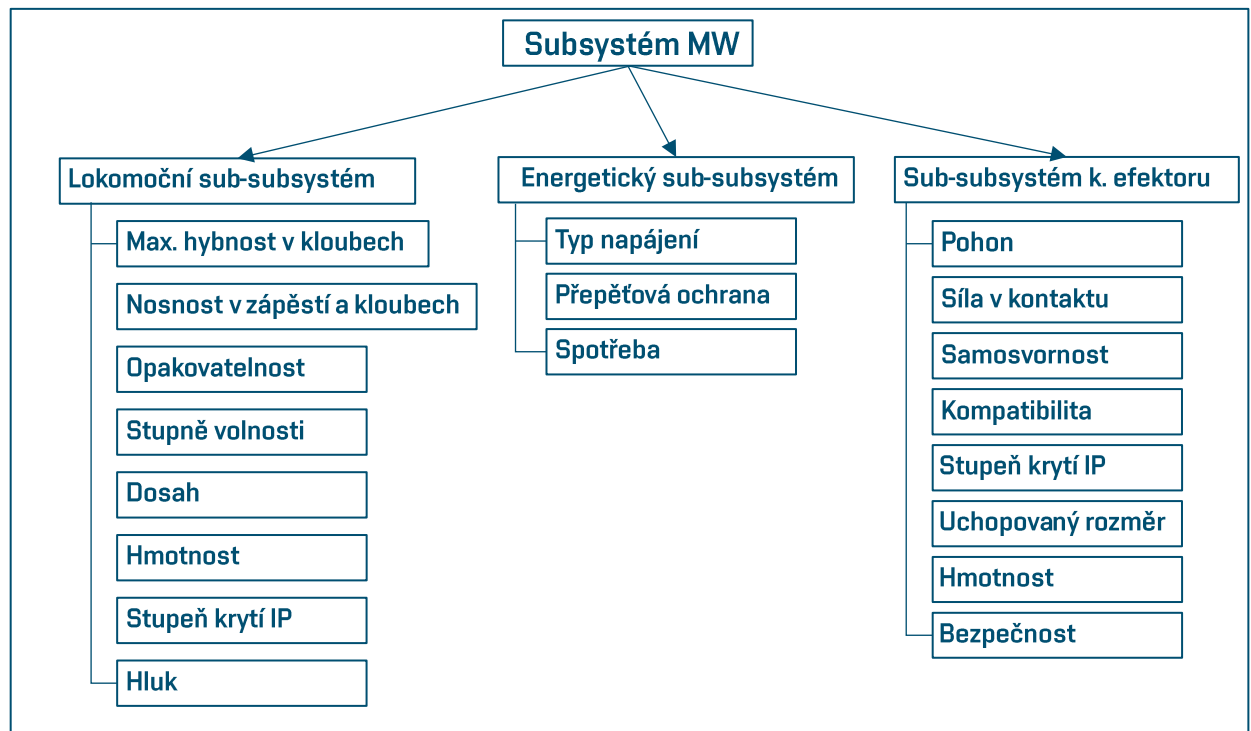


Obr. 4 Systémový rozbor kobotu jako technologické soustavy.

Dále jsou zavedeny jednotlivé sub-systémy, které detailněji popisují charakteristiky nadřazených subsystémů. MW, HW, SW jsou odvislé od nabídky každého výrobce. Jejich kvalita, provedení a uživatelská přívětivost ovlivňují rychlost implementace, spolehlivost a životnost [14][15]. BW zatím není v dnešní technologiích implementován, ale jedná se o perspektivní koncept, u kterého je možné širší rozšíření v budoucnu.

2.4.1 Subsystém MW

Subsystém machineware kobotu lze detailněji rozlišit na tři sub-systémy, a to lokomoční, energetický a koncového efektoru, jejichž charakteristiky (viz Obr. 5) zásadně vstupují do výběru vhodného kobotu pro danou aplikaci dle kritérií v požadavkovém listu [13].



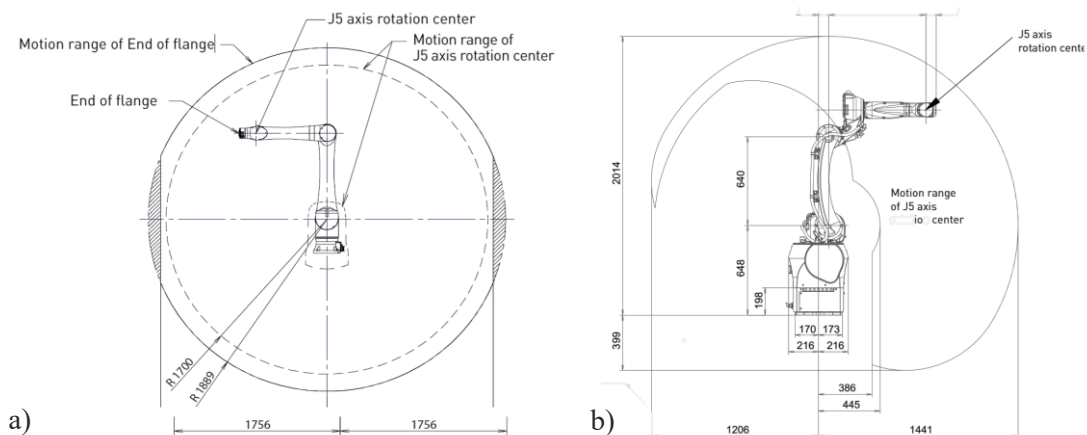
Obr. 5 Rozbor subsystému MW.

Lokomoční sub-systém

Lokomoční soustava ramena kobotu je tvořena kinematicky vázaným prostorovým mechanismem. Tento mechanismus se skládá z daného počtu kinematických dvojic, které poté udávají počet stupňů volnosti celého ramene [15]. Nejběžnější koboty mají 6 stupňů volnosti – též os rotace, neboť jsou všechny kinematické dvojice spojeny rotační vazbou, nicméně mohou se objevovat i v jiných počtech a konfiguracích (viz kapitola 3.1).

Při stanovování požadavků na lokomoční soustavu je nutno zohlednit objekt manipulace, jeho rozměry, hmotnost a přibližné požadavky na pohyb, který s bude objektem prováděn, a také na takt procesu. Z těchto úvah je nutné stanovit požadavky na nosnosti v zápěstí a v osách rotace, které budou v pohybu nejvíce zatíženy, jeli to možné. V rámci optimalizace je vhodné ověřit, jestli nebudou překročeny nejvyšší dovolené hodnoty hybnosti dle specifikací výrobce.

Neméně důležitou charakteristikou každého kobotu je jeho dosah, a to nikoli jen maximální hodnota, ale geometrie celého pole pohybu, neboť některé lokomoční konfigurace umožňují pohyb v rámci téměř kulového prostoru (např. koboty výrobce FANUC řady CRX – viz Obr. 6a), zatímco jiné pouze v rámci velmi přesně definovaných mezí (např. koboty výrobce FANUC řady CR – viz Obr. 6b). Každá z těchto variant má své výhody a nevýhody, které je nutno porovnat v kontextu dané situace.



Obr. 6 Komparace pracovního prostoru a dosahu dvou řad (konfigurací) výrobce FANUC, převzato z: [16].

Neméně důležitou charakteristikou každého kobotu a jeho MW je opakovatelnost polohy, tedy přesnost, s jakou kobot dokáže zopakovat zadanou najetí do zadané polohy. I přesto, že příslušná norma ČSN EN ISO 9283 byla v roce 2014 zrušena, je stále využívána pro měření a zkoušení tohoto parametru. Při zkoušení jsou přípustné obě metody programování, tj. *off-line* i *on-line*. V obou případech je tento parametr vzdáleností těžiště množiny všech zkušebních najetí do polohy (dle normy alespoň 30) od zadaného bodu. Důvody vzniku nepřesnosti mohou být způsobeny:

- vnitřním řízením,
- transformací souřadnic,
- rozdíly mezi teoretickými a reálnými rozměry,
- závadami, třením,
- vnějšími vlivy [17].

Některé konkrétní aplikace nebo aplikační prostředí vyžadující MW určitého stupně krytí vůči vodě a prachovým částicím, které bývají nejčastěji vyjadřovány pomocí IP kódu (z angl. *Ingress protection*), jehož stupně jsou udávány normou ČSN EN 60 529 [18]. Tento kód je ve tvaru IP XX, kdy X vyjadřují číslice odpovídající danému stupni ochrany (viz Tab. 1). První číslice odpovídá ochraně před nebezpečným dotykem a vniknutím cizího tělesa, druhá vniknutí kapaliny. V případě, že dané zařízení není na jednu z těchto vlastností zkoušeno, pak zůstává písmeno X na daném místě. Tento kód může být případně doplněn dodatkovými písmeny, ale v oblasti kobotů nejsou tato dodatková písmena využívána.

Další typy aplikací nebo koncepcí zákazníků mohou požadovat způsobilost práce kobotu v čistých prostorech daných třídou čistoty dle normy ČSN EN ISO 14 644 [19]. Třídy čistoty se pohybují dle ISO mezi 9 (nejnižší čistota) až po 1, požadovaná třída čistoty pro danou aplikaci je většinou již stanovena, jak na straně pracoviště, tak výrobce kobotu, někdy je ovšem předmětem doplňkové výbavy za příplatek k základní variantě.

Stále častější je využití kobotů i v potravinářském průmyslu, které vyžaduje, aby koboty splňovaly požadavky pro práci a stykem s potravinami. V této oblasti jsou nejproblémovějším faktorem lubrikanty, kdy je možné nechat implementovat komponenty mazané potravinářsky nezávadnými mazivy.

V některých aplikacích mohou do požadavkového listu vstupovat i další faktory související s MW kobotu, a to např. odolnosti vůči vibracím, hmotnost nebo hluk.

Tab. 1 Prvky IP kódu a jejich význam, převzato z: [18].

| Prvek | Číslice/ písmeno | Význam pro ochranu zařízení | Význam pro ochranu osob |
|---------------------------------------|---------------------|---|----------------------------------|
| První charakteristická číslice | | Před vniknutím pevných cizích těles: | Před dotykem nebezpečných částí: |
| | 0/X | (nechráněno) | (nechráněno) |
| | 1 | o průměru ≥ 50 mm | hřbetem ruky |
| | 2 | o průměru $\geq 12,5$ mm | prstem |
| | 3 | o průměru $\geq 2,5$ mm | nástrojem |
| | 4 | o průměru $\geq 1,0$ mm | drátem $\varnothing 1$ mm |
| | 5 | chráněno před prachem | drátem $\varnothing 1$ mm |
| 6 | prachotěsné | drátem $\varnothing 1$ mm | |
| Druhá charakteristická číslice | | Proti vniknutí kapaliny (resp. vody) s nebezpečnými účinky: | – |
| | 0/X | (nechráněno) | |
| | 1 | svisle kapající | |
| | 2 | kapající (ve sklonu 15°) | |
| | 3 | kropení (déšť) | |
| | 4 | stříkající | |
| | 5 | tryskající | |
| | 6 | intenzívně tryskající | |
| | 7 | ponoření dočasné | |
| 8 | trvalé ponoření | | |

Energetický sub-systém

Účelem energetického sub-systému je dodávat kobotu energii pro jeho provoz a výkon zadaného úkolu. Napájení probíhá pomocí *controlleru*. Menší koboty jsou bývají často napájeny buď stejnosměrným 24 V napětím, anebo střídavě 230 V, zatímco větší mohou požadovat i třífázové 400 V napětí.

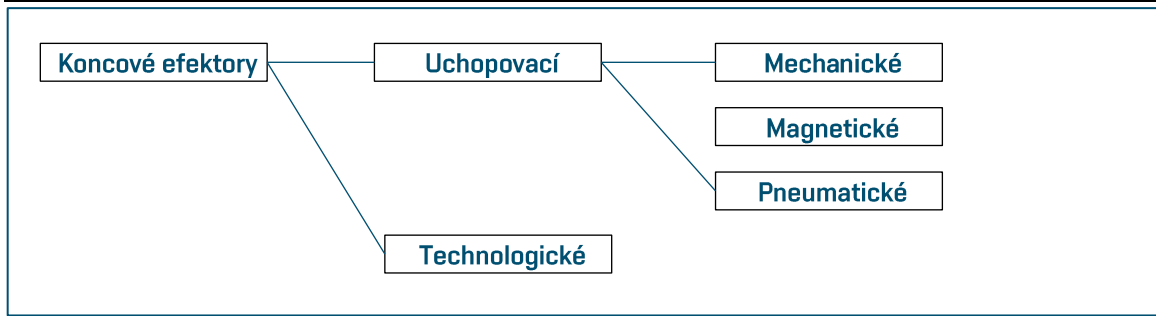
Další možností napájení je pomocí bateriových úložišť, které umožní značnou mobilitu v rámci flexibilních pracovních úkolů při nesériových aplikacích, protože jde uložit *controller* a úložiště na manipulační jednotku umožňující přesun na různá *ad-hoc* pracoviště.

Některé implementační požadavkové listy mohou též požadovat určitou míru spotřeby, aby bylo řešení rentabilní.

Sub-systém koncového efektoru

Koncové efektoru jsou stěžejním prvkem systému kobotu, jehož účelem je realizace vlastního zadaného úkolu, popř. technologické operace [20]. Odtud tedy rozlišujeme tedy základní typy efektorů, tj. uchopovací a technologické nebo kombinované [21][20], které lze ještě dále systematizovat (viz Obr. 7) [21]. Efektory pro HRC musí splňovat požadavky pro bezpečnost ve spolupracujícím prostředí, jsou na ně tedy kladeny vyšší požadavky než na koncové efektoru běžných průmyslových robotů [12], a tedy jsou často nákladnější než nekolaborativní efektoru, které navíc nabízí širší výběr modelů, variant a konstrukčních řešení.

Při robotizaci výrobních procesů je nutno uvažovat, že hmotnost koncového efektoru ovlivňuje nosnost robota, které bude připadat na objekt manipulace, a proto je vhodné při optimalizačních iteracích minimalizovat poměr hmotnosti efektoru ku hmotnosti kobotu [20].



Obr. 7 Rozdělení koncových efektorů [20].

Uchopovací efekторы jsou převládajícím typem, které dále rozlišujeme na mechanické, pneumatické a magnetické podle principu, jak je OM uchopován. Skařupa [20] dělí tyto efekторы též na pasivní a aktivní, ale v současnosti jsou pasivní využívány méně, a proto budou uvažovány pouze efekторы aktivní, tedy takové, jejichž funkci lze aktivně ovládat a řídit podle požadavků úlohy nebo operátora. Tyto efekторы se zpravidla sestávají z přípojovací příruby (*interface* dle ISO 9409 – 1 [22]), těla efektoru, pohonu a úchopových prvků [21]. Interface koncového efektoru slouží k napojení efektoru ke kinematickému řetězci ramene. Tělo efektoru musí mít dostatečnou tuhost a pevnost, aby nebyla ovlivněna funkčnost efektoru a zároveň je primárním uložením činných součástí. Úchopové prvky závisí na konkrétním typu a modelu.

Mechanické efekторы (viz Obr. 8a) mohou být poháněny různými druhy pohonů v současnosti jsou nejběžnější pneumatické a elektrické pohony. Nejčastěji využívanými v mechanických efektorů jsou čelistové, které umožňují spolehlivé uchopení objektů kruhového nebo prizmatického průřezu [20]. Úchopové prvky jsou odvislé od zamýšlené aplikace, ale nejčastěji se využívají dvou- nebo tříčelistové mechanismy, kdy uchopení objektu manipulace je zajištěno pomocí translačního nebo rotačního pohybu chapadel [13].

Hlavní komponentou aktivních **magnetických efektorů** (viz Obr. 8b) je elektromagnet, který je vypínán a zapínán dle spuštěného programu nebo požadavků obsluhy. Nejvhodnějšími objekty manipulace pro tyto efekторы jsou desky z feromagnetického materiálu nebo jiné podobné předměty s hladkým, plochým a čistým povrhem, kdy velikost kontaktní plochy a hmotnost určují požadavky na sílu elektromagnetů [20]. Pasivní variantou je efektor permanentním magnetem, v tomto případě pak musí být využito jiného mechanismu na oddělení OM od manipulátoru, např. vyhazovacím mechanismem nebo stlačeným vzduchem [13].



a) Mechanické efekторы

b) Magnetický efektor

c) Pneumatický efektor

Obr. 8 Demontrace typů uchopovacích efektorů, převzato z: [23][24][25][26].

Dalším, často využívaným typem koncových efektorů jsou **pneumatické** (viz Obr. 8c). Jejich nespornou výhodou je dostupnost stlačeného vzduchu ve většině výrobních hal. K uchycení objektu manipulace jsou využívány přísavky, ve kterých je vytvořen podtlak a umožní manipulaci s objektem. V konstrukci těchto efektorů je pro vytvoření podtlaku nejčastěji využíváno efektorů. Na rozdíl od magnetických

efektorů, které umožňují manipulovat s těžšími OM, pneumatické efektory jsou vhodné spíše pro manipulaci s rozměrnějšími, ale lehkými OM s hladkým a čistým povrhem [20].

Technologickými efektory rozumíme například svářečí, řezací nebo obráběcí výkonové nástavby [20]. Nejčastěji je možné se v robotizovaných systémech setkat s **bodovými svářečkami**, a to pro jejich časté využití v automobilním průmyslu, ty nejsou ovšem běžné u kolaborativních robotů kvůli vysoké hmotnosti, naopak je častější implementace MIG/MAG svářeček, které umožňují svařování větších dílců. Ekonomika takové implementace je značně závislá na specifikách dané výroby.



Obr. 9 Technologický efektor – MIG/MAG svářečka, expozice firmy Robix Automation s.r.o. – MSV 2023 (fotografie autor BP).

Do budoucna lze očekávat zvyšující se uplatnění laserů, a to jak svařování, tak i řezání. V takovém je výhodné využití diodových laserů, kdy rezonátor je umístěn mimo robot a laserový svazek je veden optickým kabelem přímo do hlavy, kde je pouze nasměrován a fokusován do daného bodu, tato konstrukce má velkou přednost v kompaktnosti a flexibilitě [27]. Výhodou **laserového svařování** je vysoká rychlost, přesnost a relativně malá tepelně ovlivněná zóna, zatímco nevýhodou jsou vysoké nároky na koordinační přesnost vzhledem k ohnisku svazku a relativně malé tloušťky, které lze efektivně svařovat [27]. Přesto jím lze svařovat i hůře svařitelné materiály např. titan, měď nebo různé kombinace [28]. Neméně zajímavé jsou i možnosti **laserového řezání**, které sdílí řadu výhod s laserovým svařováním, ale jsou již benevolentnější na volbu parametrů paprsku, a tedy i polohu ohniska [27].

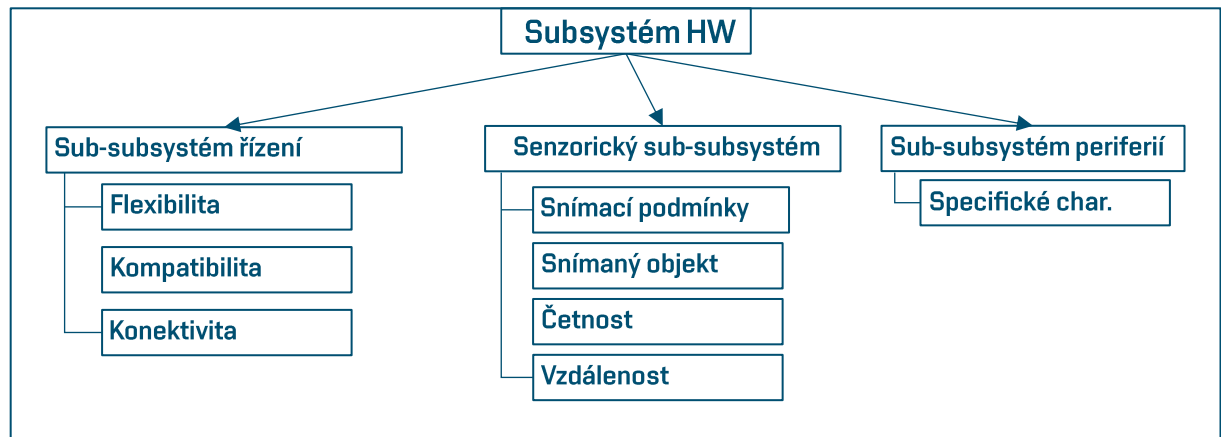
Obrábění, frézování nebo vrtání pomocí robotů je sice teoreticky možné, ale v praxi téměř nevyužívané kvůli nedostatečné tuhosti, a tedy i přesnosti v porovnání s CNC obráběcími centry. Mnohem běžnější je využití robotů pro povrchové operace jako je broušení nebo leštění [13].

Nedílnou součástí koncových efektorů je též **senzorika**, která může být určena k podpoře funkcionality efektoru, k zajištění bezpečnosti nebo k jejich kombinaci [21].

2.4.2 Subsystem HW

Dalším faktorem, který vstupuje do robotizace pracoviště je hardware, kterým je kobot osazen. Hlavním prvkem HW, který je pro každý kobot stěžejní, je řídicí jednotka. Výpočetní výkon současných řídicích jednotek je v současné době natolik vysoký, že koboty jím nejsou ve svém fungování limitovány. Nicméně klíčovou vlastností řídicích jednotek je jejich **konektivita**, a to nejen propojení kobotu a jeho ručního programovacího panelu, ale i datové připojení, a to buď k dalším periferním zařízením, ale i k serveru prostřednictvím drátového nebo bezdrátového připojení, kdy lze využít např. možnosti sítě IoT nebo 5G mobilního připojení [4]. Neméně důležitým aspektem instalovaného hardwaru je jeho

kompatibilita s další infrastrukturou, ke které má být připojena a případná flexibilita v instalaci dalších komponent.



Obr. 10 Systémový rozbor HW.

Nejčastějším **periferním zařízením** kolaborativních robotů je **ruční programovací panel** (též teach-pendant). V případě obdobně jako PRaM musí být u kobotů vybaven vypínačem nouzového zastavení a třípolohovým souhlasným povelovým zařízením [6]. Některé aplikace mohou vyžadovat zvláštní požadavky i na ruční programovací panel, např. zvýšenou odolnosti proti prachu nebo vodě nebo další ovládací prvky.



Obr. 11 Demonstrace moderního ručního programovacího panelu firmy FANUC, převzato: [29].

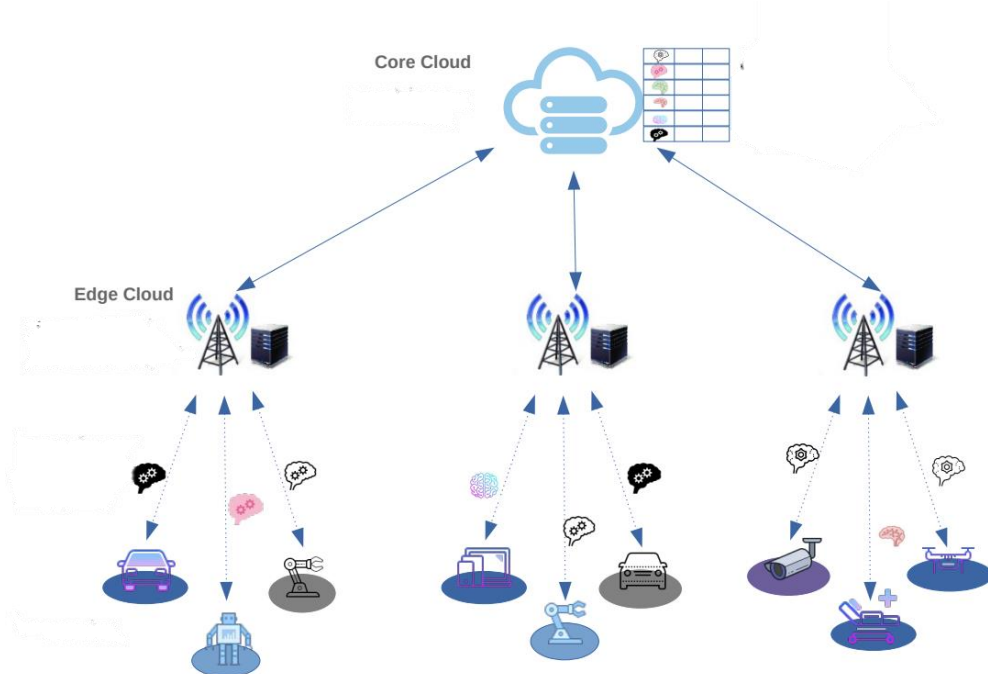
Ke zvláštním periferním zařízením lze zařadit **senzorické prvky** kobotu. Systémy strojového vidění (2D nebo 3D vize) umožňující mimo jiné detekci objektů manipulace a následně koordinovat pohyb robotu pro jejich uchopení. Dalšími možnými senzory jsou silové senzory, které umožňují např. kontrolu funkčnosti ovládacích prvků palubních desek v automobilové výrobě nebo jiných přístrojů.

2.4.3 Subsystém SW a BW

Nabízený SW a rozsah příslušné dokumentace nesmí být opomíjen (byť se tomu tak v praxi často děje), protože určuje, jak jednoduché nebo naopak komplikované bude pro obsluhu s kobotem interagovat nebo pro programátora jej zařadit připojit do technologií dané firmy.

Při zohledňování subsystému SW je klíčové apriorní rozhodnutí, jaký způsobem bude činnost kolaborativního robota programována, zdali pomocí metody **off-line programování**, tedy pomocí nástroje dostupného většinou přímo od výrobce nebo třetí strany, nebo pomocí **on-line programování** pomocí ručního programovacího panelu přímo obsluhou. U obou variant je případně velmi vhodné zvážit, jestli je možné zrealizovat úspory z rozsahu, pokud již s některým z nabízených softwarů má již např. obsluha zkušenosti a je na ně zaškolená, protože již je na pracovišti využíván anebo zvážit potenciál rozšíření na více míst výroby.

V již zmíněném článku (viz s. 3) dvojice autorů z Kyung Hee univerzity byl představen nový koncept BW (viz Obr. 12), jedná se o koncept navazující na model software jako služba (SaaS), který byl úspěšně implementován v IT sektoru, kdy jednorázový prodej licencí nahradily opakující se pronájmy. Koncept BW tento princip do jisté míry kopíruje, ale s implementací cloudových výpočetních center, strojového učení, umělé inteligence a rychlého datového připojení. Navrhovaný model předpokládá centrální cloudová úložiště, kde budou uloženy hlavní kopie mozkoven, které budou distribuovány na okrajová cloudová úložiště a k jednotlivým zařízením, který přistupuje v reálném čase k takové kopie mozkovny, která je vybavena specializovaným modelem pro konkrétní situaci (např. strojové vidění, rozpoznávání řeči, interakci s člověkem). Opačným směrem, tedy od zařízení k centrálnímu cloudu budou proudit metadata, které dané okrajové mozkovny vytvořili pomocí algoritmů strojového učení, a tedy budou tyto poznatky dostupné všem uzlům v rámci sítě [4]. Tento koncept se zatím nachází v návrhové fázi, ale některé zejm. větší firmy mohou v budoucnu začít využívat podobný model např. pro vytvoření různých mozkoven, kdy každá bude spojená s výrobou určitého dílu a BW bude trénován na rozpoznávání příslušné komponenty. Tím bude moci být zvýšena univerzalita výrobních linek zejm. u středně-sériových výrob, kdy se jednotlivá metadata budou ukládat to BW příslušící právě vyráběné komponentě a budou využívána ke stálému zlepšování výroby pomocí AI a strojového učení.



Obr. 12 Navrhovaný koncept BW, převzato z: [4].

2.4.4 Subsystem programátora a obsluhy

Programátor nebo obsluha programuje nebo interaguje s uživatelským rozhraním kobotu tak, aby byl vykonáván zadaný pracovní úkol nebo jejich sada za stanovených podmínek.

Programátor zpravidla vytváří pracovní instrukce *off-line* za pomoci digitálního modelu, který odráží reálné pracovní podmínky díla.

Obsluha s kobotem zpravidla interaguje *on-line* prostřednictvím periferního zařízení a využívá se metody programování učení, který je umožněn mimo jiné režimem vedení, což je velkou předností kobotů oproti PRaM je možnost přepnutí do režimu ručního vedení. V tomto režimu se operátor přímo dotýká nebo drží kobot, který na něj reaguje, mění svoji polohu a natočení v souladu s tímto působením. V režimu učení tak lze naprogramovat relativně snadno a rychle oproti PRaM požadovanou činnost, kterou pak robot může dále vykonávat již samostatně.

2.5 Systémový rozbor kobotu jako bezpečné soustavy

Neméně důležitým aspektem kolaborativních robotů a jejich implementace v rámci výrobních kapacit je nutnost zajištění bezpečnosti. Systém kobot – OM – operátor a pracovní prostor spolupráce musí splňovat zákony a normami dané bezpečnostní požadavky, které jsou pro proces robotizace zcela neopomenutelnými faktory a kritérii.

Pro zajišťování bezpečnosti je hlavním faktorem naplnění legislativních požadavků, a proto budou v následující kapitole uvedeny zásadní předpisy a normy, které do tohoto procesu vstupují. Dle těchto norem je nutné provést analýzu rizik, jejich vyhodnocení a popř. podniknout kroky k jejich minimalizaci (viz kapitola 2.5.2). V souladu se zjištěními je poté zvolen některý z přístupů k zajištění bezpečnosti, které stanovuje příslušná norma (viz podkapitola 2.5.3).

2.5.1 Legislativní rámec a příslušné normy

Přístupem do EU ČR převzala i evropský legislativní rámec v oblasti bezpečnosti práce i bezpečnosti strojních zařízení, které byly implementovány do českého právního řádu skrze zákony a příslušná nařízení vlády. Pro kolaborativní roboty se jedná zejména o:

- zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů;
- zákon č. 102/2001 Sb., zákon o obecné bezpečnosti výrobků, ve znění pozdějších předpisů;
- nařízení vlády č. 118/2016 Sb., o posuzování shody elektrických zařízení určených pro používání v určitých mezích napětí při jejich dodávání na trh;
- nařízení vlády č. 176/2008 Sb., o technických požadavcích na strojní zařízení, ve znění pozdějších předpisů;
- nařízení vlády č. 117/2016 Sb., o posuzování shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při jejich dodávání na trh, ve znění pozdějších předpisů;
- nařízení vlády č. 375/2017 Sb., o vzhledu, umístění a provedení bezpečnostních značek a značení a zavedení signálů.

V České republice jsou platné české technické normy vydávané Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, často se však jedná o tzv. harmonizované normy, které přejímají požadavky stanovené evropskou normou nebo jiným harmonizačním dokumentem. Jejich použití zaručuje uživatelům naplnění požadavků výše uvedené legislativy [30].

Harmonizované normy využívají vertikální integrace, kdy jsou pod obecnější normy vyšší úrovně podřazovány normy specifitější, a jsou tedy děleny na:

- normy typu A – základní bezpečnostní normy,
- normy typu B – skupinové bezpečnostní normy,
- normy typu C – bezpečnostní normy pro stroje [31].

V případě kolize ustanovení norem platí následující právní princip: *Lex specialis derogat legi generali*. Tedy, že v případě neshody mezi normami má ustanovení specifitější normy přednost před normou obecnější. V případě robotů je stanovena následující návaznost norem (viz Obr. 13) [31].

ČSN EN ISO 12100

- Norma typu A
- Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika

ČSN EN ISO 13849

- Norma typu B
- Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů

ČSN EN ISO 10218-1 a -2

- Norma typu C
- Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů

Obr. 13 Vertikální integrace harmonizovaných norem upravující bezpečnost robotů [6][7].

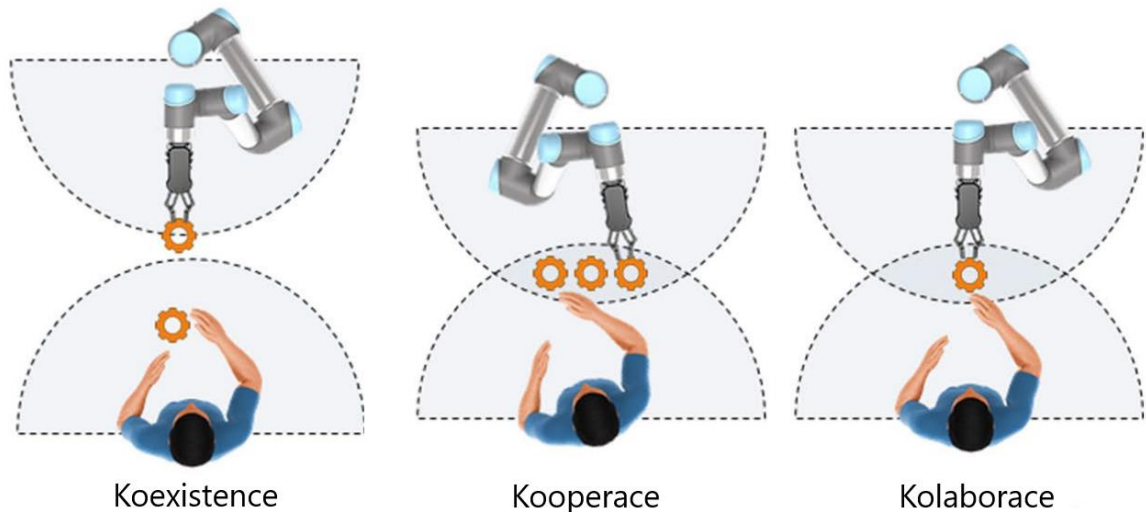
2.5.2 Analýza rizik

Při zajišťování bezpečnosti systému kobot – OM – operátor a pracovní prostor spolupráce je klíčovým prvkem **analýza rizik**. Analýzu rizik vypracovává jak výrobce zařízení a vydává prohlášení o shodě s požadavky pro uvedení výrobku na jednotný evropský trh, ale zejména firma, na jejímž pracovišti bude robot nasazen. V této analýze musí být uvedena a vyhodnocena všechna rizika, která lze při provozu rozumně předpokládat. Významná rizika a příslušnou metodiku stanovují zejména normy typu C: ČSN EN ISO 10218-1 a -2 [6][7], nicméně ne zcela dostatečně (vzhledem k problematice kolaborativních robotů), a proto *International Organization for Standardization* dodatečně vydala technickou specifikaci ISO/TS 15066:2016(E)[11], která tuto metodiku upřesnila pro podmínky kolaborativních robotů. V souladu s těmito normami musí být uvažovány alespoň následující situace, při kterých mohou vzniknout nebezpečí:

- zamýšlená činnost (vč. zohlednění specifické aplikace);
- údržba, tj. manipulace v režimu vedení, učení, ale i čištění a seřizování;
- přístup osob ze všech směrů;
- chybné užití robotu (zde norma uvádí omezení „rozumně předvídatelné“);
- porucha [6].

Na rozdíl od PRaM se u kolaborativních robotů musí být stanovena míra HRC. Podle ní lze formy spolupráce rozdělit na tři druhy, a to koexistence, kooperace a kolaborace (viz Obr. 14). V případě:

- **koexistence** – kobot a člověk pracují ve sdíleném pracovním prostoru, ale na odlišných pracovních úkolech,
- **kooperace** – spolupracují na společném úkolu, ale neprobíhá vzájemná interakce,
- **kolaborace** – probíhá vzájemná interakce mezi kobotem a člověkem [32].



Obr. 14 Formy spolupráce kobotu a člověka, převzato a upraveno: [32].

Oproti PRaM jsou koboty mnohem lépe senzory vybaveny, takže dokáží v případě kolize s člověkem automaticky zastavit, nicméně v analýze rizik musí být vyhodnoceno, s jakými parametry se může kobot pohybovat, aby důsledky takové kolize splňovaly biomechanicky únosné hranice. Tyto hranice nejsou specificky stanoveny v normě ČSN EN ISO 10218, ale pouze v ČR neimplementované ISO/TS 15066:2016(E). V technické specifikaci jsou definovány biomechanické limity pro model lidského těla pro kvazistatický a přechodový kontakt. Z těchto biomechanických limitů je odvozen maximální dovolený tlak a maximální dovolená síla pro oba typy kontaktů. Dalším požadavkem této technické specifikace jsou hodnoty **maximální přenesené energie** na danou část těla, kdy je nutno při analýze rizik zohlednit, s jakými OM bude při pracovních činnostech manipulováno [11]. Při vyhodnocování rizik je nutné také zvažovat riziko singularit a také rizika spojená s koncovým efektem.

Uchopovací efekty pro aplikace v kontextu kolaborativní roboty musí splňovat vyšší požadavky pro bezpečnost než koncové efekty PRaM, protože se mohou dostat do kontaktu s člověkem [12]. Takový koncový efektor musí být dostatečně zakrytý, pro kolaborativní koncové efekty je požadován minimální stupeň ochrany IP 2X, čímž by měla být zajištěna dostatečná ochrana pracovníka, zejm. rukou a prstů před vtažením, sevřením nebo skřípnutím. U většiny technologických efektorů není možné během technologického operace zajistit přítomná nebezpečí, a tedy je nutné tato rizika eliminovat provozními opatřeními.

V rámci analýzy rizik je nutné všechny výše uvedené skutečnosti posoudit v souladu s metodikou dle výše uvedených norem.

2.5.3 Bezpečnostní prvky pro zajištění bezpečnosti při práci s kolaborativními roboty

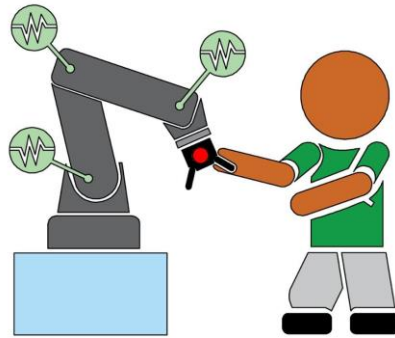
V rámci kolaborativních aplikací lze zvolit různá opatření k zajištění bezpečnosti, jak stanovuje norma ČSN EN ISO 10218-2, a to:

- omezení výkonu a síly konstrukcí nebo ovládním,
- ruční vedení,
- bezpečnostní monitorované zastavení,
- monitorování rychlosti a separace [7][33].

Tato opatření je možné využít samostatně nebo kombinovat, jejich provozní parametry nejsou však stanoveny taxativně, ale musí být stanoveny provozovatelem z analýzy rizik.

Omezení síly a výkonu konstrukcí nebo ovládáním

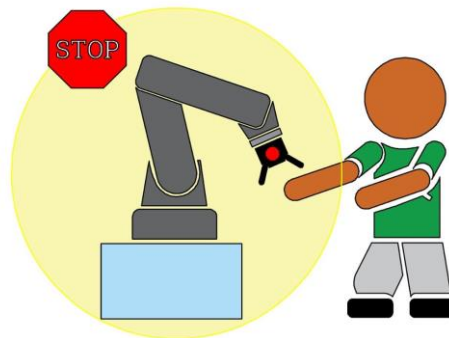
Tuto metodu (viz Obr. 15) v souladu s direktivami technické specifikace ISO/TS 15066 je vhodné volit v případech, kdy nelze vyloučit fyzický kontakt mezi člověkem a robotem včetně OM. V rámci analýzy rizik je nutné stanovit limity síly (resp. tlaku) na potenciální místa na těle v rámci přechodového a kvazi-statického kontaktu, jejichž hodnoty poté musí být zohledněny v provozních parametrech tak, aby se možné kontakty mezi člověkem a robotem nacházely v podlimitních hodnotách [11].



Obr. 15 Omezení síly a výkonu, převzato a upraveno: [34].

Bezpečnostní monitorované zastavení

Další možností adresování rizik spojenými s provozem kobotu je režim bezpečnostního monitorovaného zastavení (viz Obr. 16), který je vhodný v případě, že při běžné činnosti kobotu se člověk nenachází v pracovním prostoru kobotu, jeho přístup však není omezen fyzickými zábranami. V okamžik, kdy pracovník vstoupí do monitorovaného prostoru, kobot se zastaví a po jeho opuštění zase pokračuje v činnosti [6] [21].



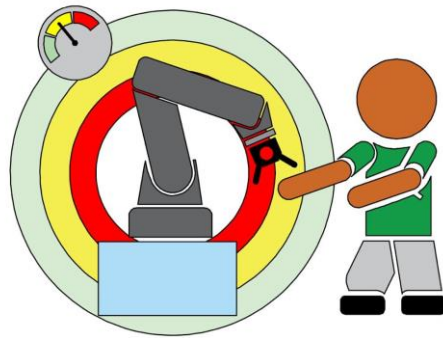
Obr. 16 Bezpečnostní monitorované zastavení, převzato a upraveno: [34].

Monitorování rychlosti a separace

Spojením předchozích dvou metod však lze docílit zajištění bezpečnosti za kompromisu mezi zvýšením výrobní kapacity a zachovanou kolaborativní funkcionalitou. Kobot může pracovat v nekolaborativním režimu, pokud se v dostatečné vzdálenosti nevyskytuje žádný pracovník. V případě, že do monitorovaného perimetru vstoupí člověk, pak je pohyb kobotu upraven podle předem stanovených pravidel (viz Obr. 17) [33].

Mezi pokročilé metody monitoringu rychlosti a vzdálenosti řadíme aktivní nebo též dynamické bezpečnostní systémy, které jsou v současnosti předmětem zájmu řady výzkumných týmů i firem. Tyto pokročilé systémy umožňují nastavit rychlost a výkon jako funkci vzdálenosti pracovníka a manipulaci břemenem a zároveň optimalizovat trajektorii s cílem vyhnout se případným kolizím [33].

V časopise Nature byl publikován článek výzkumného týmu z Nazarbayev University zkoumající hypotézy vnímané bezpečnosti a výrobní produktivity při kolaboraci člověka a kobotu, v závislosti na volbě trasy (fixní nebo variabilní), rychlosti pohybu. Vnímaná bezpečnost byla vyhodnocována na základě dat o průměrném srdečním tepu a jeho variabilitě. Studie prokázala, že užívání fixní dráhy může výrazně snížit produktivitu, pokud bývá často obstruována, ale bývá zaměstnanci vnímána jako bezpečnější, zatímco dynamické plánování může být produktivnější, ale není vnímáno jako tak bezpečné. Výzkumníci též zkoumali, jestli by snížení rychlosti kobotu při zvýšení variability srdečního tepu (tedy s pocitem nebezpečí) nepřineslo benefit, nicméně tato hypotéza byla vyvrácena [35].

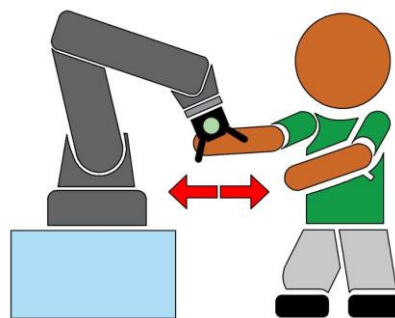


Obr. 17 Monitoring vzdálenosti a rychlosti, převzato a upraveno: [34].

Ruční vedení

U režimu ručního (viz Obr. 18) vedení se nepředpokládá, že by nějaký kobot byl provozován výhradně v tomto režimu, ale pouze jako prostředek k *on-line* programování, údržbě atp. Bezpečnostní požadavky na tento provoz jsou tedy zaměřeny na prevenci neočekávaného pohybu, ovládací panel (resp. souhlasné povelové zařízení) a přechody mezi různými režimy [11].

Při vstupu člověka do pracovního prostoru kobotu musí být iniciováno bezpečnostní monitorované zastavení, režim ručního vedení je aktivován sepnutím souhlasného povelového zařízení do střední polohy (důsledkem však nesmí být neočekávaný pohyb), po jehož uvolnění je opět aplikováno bezpečnostní monitorované zastavení. Po tom, co člověk opustí pracovní prostor, může kobot přejít do jiného režimu. Během celé operace musí mít pracovník dostatečný výhled na pracovní prostor [11].



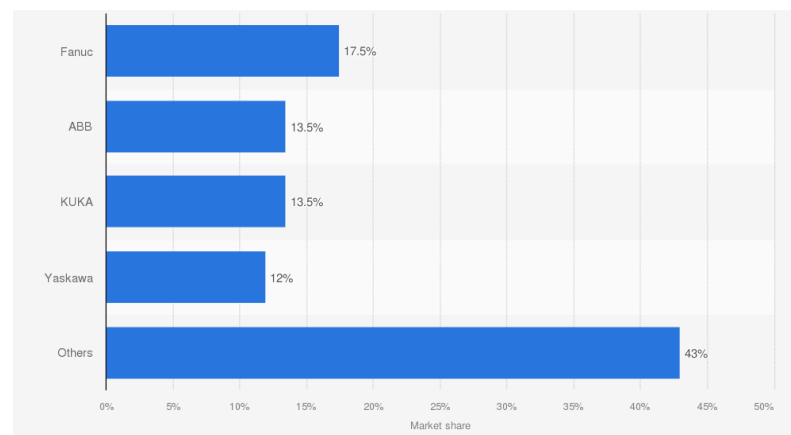
Obr. 18 Ruční vedení, převzato a upraveno: [34]

3 REŠERŠE ZNÁMÝCH ŘEŠENÍ

V oblasti kolaborativních robotů je již řada řešení dostupných na trhu, které se uplatňují v řadě pracovišť, jak kolaborativní (HRC) a nekolaborativních. V této kapitole je demonstrována nabídka kolaborativních robotů vybraných významných světových výrobců (viz sekce 3.1), koncových efektorů, kterými jsou nejčastěji osazovány (viz sekce 3.2), a také jejich známé běžné aplikace v praxi (viz sekce 3.3).

3.1 Rešerše nabídky vybraných výrobců kolaborativních robotů a jejich konstrukční řešení

Oblast kolaborativních robotů je velmi rychle rostoucí s potenciálem rychlých inovací, a proto vzniká značné množství firem, které do odvětví vstupují, takže není možné v této práci postihnout celou tržní nabídku. Z toho důvodu budou popsána portfolia třech největších výrobců, které mají dle odhadů největší podíl na trhu (viz Obr. 19), a to firem Fanuc, ABB a KUKA.



Obr. 19 Odhadovaný tržní podíl výrobců robotů, převzato z: [36].

Do textu práce byly zahrnuty pouze základní údaje, aby čtenář získal povědomí o nabídce těchto výrobců a o základních parametrech nabízených modelových a konstrukčních řad, detailní parametry je nutné získat vždy z aktuálních informačních listů výrobce. V konstrukčních řadách je zpravidla více velikostních modelů, a proto jsou v této práci uváděny krajní hodnoty pro tyto parametry napříč konstrukční řadou.

3.1.1 FANUC

Výrobce FANUC byl prvním výrobcem NC řízených strojů s historií datující se až do roku 1956. V současnosti je jedním z leaderů trhu průmyslových robotů a kobotů. První kobot byl představen v roce 2015, konkrétně model CR-35iA [37]. V současnosti nabízí dvě konstrukční řady – CRX a CR. Tyto řady jsou odlišné základní konstrukcí ramene a opakovatelností polohy, ale nosností a velikostí se překrývají, kdy největší nosnost nabízí řada CR, a to až 35 kg [16].



Konstrukční řada CRX je řada kolaborativních robotů, která je primárně zamýšlena pro *ad-hoc on-line* programování přímo obsluhou a je výhradně napájena střídavě 230 V, aby bylo pracoviště flexibilní na přemístění a nebylo nutné řešit dosah sítě vyššího napětí [16].

Konstrukční řada CR je zaměřená na náročnější aplikace a má odlišné uspořádání kinematického řetězce oproti řadě CRX a zároveň v rámci samotné řady CR. Tato řada se vyznačuje již napojením na třífázové napětí, ale vyšší nosností a přesností [37].

Při porovnání nabídky obou řad (viz Tab. 2) lze pozorovat, že řada CRX jsou koboty zamýšlené pro online programování, neboť jsou lehčí, méně přesné, mají nižší nosnost a jsou více mobilní. Naopak

řada CR je zamýšlená primárně pro *off-line* programování, protože nabízí vyšší opakovatelnost, ale vykoupené hmotností a nižší flexibilitou.

Tab. 2 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů společnosti FANUC řad CRX a CR [16] [37].



| Parametr | Koboty řady CRX | Koboty řady CR |
|-----------------|---|---|
| Vzhled: |  |  |
| Počet os: | 6 | 6 |
| Max. nosnost: | (5 – 25) kg | (4 – 35) kg |
| Max. dosah: | (994 – 1889) mm | (550 – 1831) mm |
| Hmotnost: | (25 – 135) kg | (48 - 386) kg |
| Opakovatelnost: | $\pm (0.03 - 0.05)$ mm | $\pm (0.01 - 0.03)$ mm |

3.1.2 ABB

Švédský výrobce ABB nabízí kolaborativní roboty třech konstrukčních řad: YuMi (v jedno- a dvouramenné variantě), GoFa a SWIFTI (viz Tab. 3 a Tab. 4).



Řada YuMi je složena pouze ze dvou modelů, kterými jsou velmi lehké a flexibilní koboty, oproti nabídce FANUC jim postačuje stejnosměrné napájení 24 V, a tedy je lze účinně napájet i bateriovými úložišti. Jejich primárním zamýšleným účelem je přesná manipulace s lehkými objekty, protože je dodáván s integrovaným koncovým efektozem – gripperem. Tyto efektozy obsahují mimo jiné i kamery, které snímají uchopované předměty i prostor kolem, aby optimalizovali svoji dráhu pohybu v reálném čase [38].

Tab. 3 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů firmy ABB řady YuMi modelů 14 050 a 14 000 [38]

| | YuMi IRB 14050 (jednoramenná varianta) | YuMi IRB 14000 (dvouramenná varianta) |
|-----------------|---|--|
| Vzhled: |  |  |
| Počet os: | 7 | 14 |
| Max. nosnost: | 0.5 kg | 0.5 kg |
| Max. dosah: | 559 mm | 559 mm |
| Hmotnost: | 9.5 kg | 38 kg |
| Opakovatelnost: | ± 0.02 mm | ± 0.02 mm |

Analogicky k řadám jiných výrobců vznikla řada GoFa, která je koncepčně míněna pro čistě kolaborativní aplikace, kdy hlavními inzerovanými výhodami je citlivý a responzivní režim vedení a jednoduché programování, zatímco řada SWIFTI je míněna pro *off-line* programování pro samostatnou práci v režimu bezpečnostního monitorovaného zastavení (eventuelně monitoringu vzdálenosti a rychlosti), kdy nabízí rychlosti pohybu TCP v intervalu (5 – 6) m/s (podle jednotlivých modelů), zatímco u řady GoFa je to pouze 2.2 m/s [38].



Tab. 4 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů ABB řad GoFa a SWIFTI [38].

| Parametr: | Řada GoFa CRB 15000 | Řada SWIFTI CRB 1100 a 1300 |
|-----------------|---|---|
| Vzhled: |  |  |
| Počet os: | 6 | 6 |
| Max. nosnost: | (5 – 12) kg | (4 – 11) kg |
| Max. dosah: | 6. osa: (950 – 1 520) mm příruba: (1 050 – 1 620) mm | (475 – 1 400) mm |
| Hmotnost: | (28 – 51) kg | (21 – 79) kg |
| Opakovatelnost: | ± 0.02 mm | $\pm (0.02 – 0.03)$ mm |

3.1.3 Kuka

Kuka je německý výrobce spadající do čínského konsorcia Midea Group. Nabízí kolaborativní roboty ve dvou řadách LBR iisy a LBR iiwa, kdy tato řada se vyznačuje mnohem vyšší opakovatelností než předchozí jmenovaná, což je ale kompenzováno nižším dozsahelem [39].

Tab. 5 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů výrobce Kuka řad LBR iisy a LBR iiwa [39].

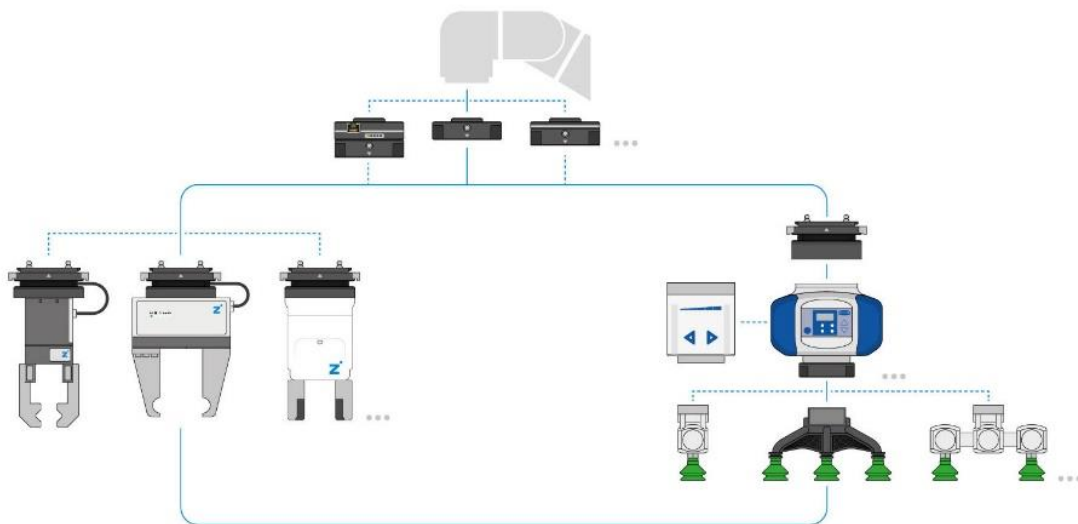
| Parametr: | LBR iisy | LBR iiwa |
|-----------------|---|--|
| Vzhled: |  |  |
| Počet os: | 6 | 6 |
| Max. nosnost: | (3 – 15) kg | (7 – 14) kg |
| Max. dosah: | (760 – 1300) mm | (800 – 820) mm |
| Hmotnost: | (22.8 – 46.3) kg | (23.9 - 32.7) kg |
| Opakovatelnost: | $\pm (0.01 – 0.05)$ mm | $\pm (0.01 – 0.015)$ mm |

3.2 Rešerše nabídky koncových efektorů a jejich konstrukční řešení

Koncové efekty a jejich parametry jsou neméně důležité pro požadovanou aplikaci jako samotný kobot, a proto v této kapitole bude demonstrována základní nabídka koncových efektorů, které lze pro kolaborativní aplikace využít. V případě koncových efektorů je zásadní, jestli se bude jednat o kolaborativní aplikaci spolupráce člověka a robota nebo pouze běh v režimu bezpečnostního monitorovaného zastavení, v takovém případě lze využít koncové efekty určené pro PRaM v případě, že to potvrdí i analýza rizik. V této práci budou přednostně demonstrovány efekty umožňující HRC, přestože jsou v praxi méně časté.

Koncové efekty se na kolaborativní roboty připevňují pomocí příruby (též lící desky nebo interface), která je zpravidla dle normy ČSN EN ISO 9409-1 [22].

V případě aplikací, kde je nutnost časté výměny koncového efektoru je vhodné využít systémů, které umožňují rychlou výměnu pomocí vlastních adaptérů, které jsou napojeny na interface a do *controlleru* kobotu. Příkladem takovéto technologie je systém adaptérů a efektorů společnosti Zimmer Group (viz Obr. 20) [24].



Obr. 20 Demonstrace funkcionality a flexibility řešení MATCH od Zimmer Group. Převzato z: [40].

3.2.1 Kolaborativní mechanické úchopné efekty


Mechanické úchopné efekty jsou nejčastěji užívanými efekty, které jsou instalované při řadě běžných aplikací kolaborativních robotů, např. při manipulaci s materiálem, *bin pickingem* a montáži (viz kapitoly 3.3.1 a 0).

V Tab. 6 jsou komparovány základní technické parametry nejčastěji užívaných modelových řad kolaborativních mechanických úchopných efektorů, a to od výrobců Schunk a Zimmer Group.

Jak již bylo zmíněno v určitých aplikacích, kde nedochází ke HRC je možné využít i efekty, které jsou určené pro PRaM, umožňuje-li to analýza rizik. V takovém případě je vhodnější volit nekolaborativní efekty, protože v tomto segmentu je tržní nabídka širší a lze najít zajímavé cenové úspory oproti kolaborativním variantám.

I přesto, že v nekolaborativních variantách jsou relativně běžné i pneumatické úchopné efekty, pro kolaborativní aplikace výrobci Schunk a Zimmer Group nabízí výhradně elektricky poháněné efekty, protože jsou osazeny senzory, které snímají sílu a působící moment, které v případě nebezpečí dají podnět k zastavení.

Tab. 6 Přehled základních technických parametrů vybraných modelových řad koncových efektorů vybraných výrobců [23] [24][40].




| | Výrobce Schunk | Výrobce Zimmer Group | |
|----------------------|---|--|---|
| Řada: | Co-act EGP | LWR50L-03 | LWR50L-02 |
| Vzhled: |  |  |  |
| Posuv čelisti: | (6 – 10) mm | 10 mm | (40 – 60) mm |
| Pohon: | elektrický | elektrický | elektrický |
| Hmotnost: | (0.62 – 1.2) kg | 0.76 kg | 1.6 kg |
| Min. uchopovací síla | (35 – 65) N | 50 N | (15 – 20) N |
| Max. uchopovací síla | (140 – 230) N | 190 N | (165 – 180) N |

3.2.2 Pneumatické koncové efekty

V oblasti pneumatických koncových efektorů pro kolaborativní roboty je významným dodavatelem německá firma Schmalz. Tyto efekty jsou nabízeny ve třech základních modelových řadách (viz Tab. 7) a poté jsou nabízena otevřená řešení, které mohou být kompletně přizpůsobena aplikačním požadavkům.

Řešení ECBPMi a EVBPI jsou efekty, na které výrobce nabízí řadu nástaveb, které umožňují přizpůsobení řešení požadované aplikaci. FXCB nenabízí příslušenství jako předchozí řešení, ale jedná se naopak *all-in-one* produkt, který je určen zejména na manipulaci s rozměrnějšími OM.

Tab. 7 Přehled základních technických parametrů modelových řad koncových efektorů výrobce Schmalz [26].

| | ECBPMi | EVBPI | FXCB |
|-------------|---|--|---|
| Vzhled: |  |  |  |
| Max. průtok | 1.6 l/min | 12 l/min | 525.90 l/min |
| Hmotnost: | 224 g | 386.3 g | 2 kg |

3.3 Rešerše aplikací kolaborativních robotů

Kolaborativní roboty byly již úspěšně implementovány na řadě pracovišť. V následující kapitole jsou popsána nalezená řešení a pracoviště kobotů, která jsou seskupena podle jejich úlohy.

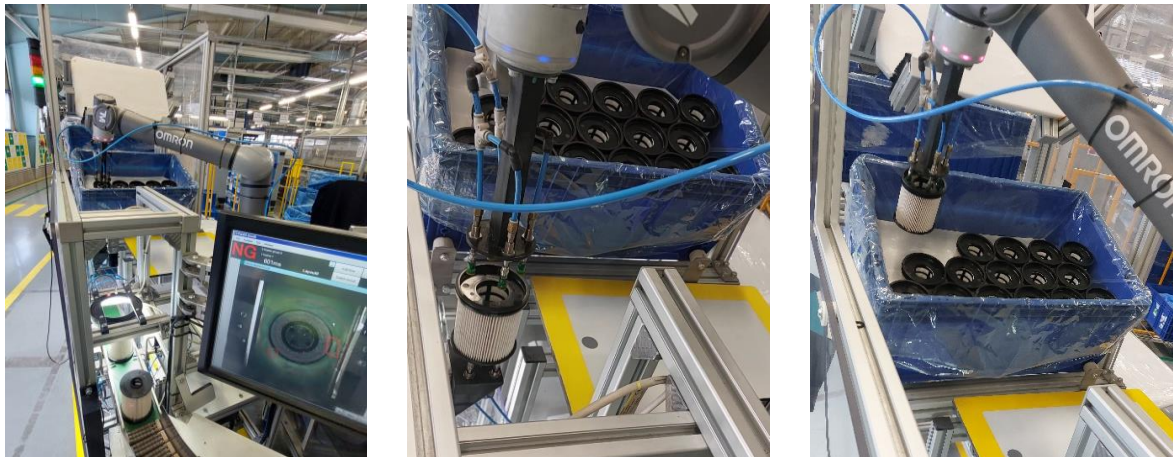
3.3.1 Manipulační úlohy

Manipulace s objekty je nejčastější aplikací kobotů, ale i průmyslových robotů obecně. Z pohledu se zaměstnavatele a zaměstnance jedná o nekvalifikované práce, u kterých je často požadován třísměnný nebo nepřetržitý provoz na výrobních linkách, takže automatizace každé takové pozice představuje značné úspory, jak mzdové, tak i administrativní. Další výhodou robotizace manipulace s objekty je značná rozměrová a ergonomická flexibilita a dle OM navržený koncový efektor, který umožní efektivní uchycení. V případě zaměstnanců je jejich schopnost omezena biomechanickými limity a zákoníkem práce, a tedy zaměstnavatel musí zajistit dostatečnou ergonomii a pracovní podmínky, protože jinak vystavuje zaměstnance nebezpečí pracovního úrazu nebo nemoci z povolání, což by znamenalo další náklady.

Jak bylo zmíněno v úvodu, v této podkapitole jsou mimo jiné popsány se souhlasem společnosti Mann+Hummel (CZ), v.o.s. úspěšné aplikace kolaborativních robotů ve výrobním závodě v Nové Vsi.

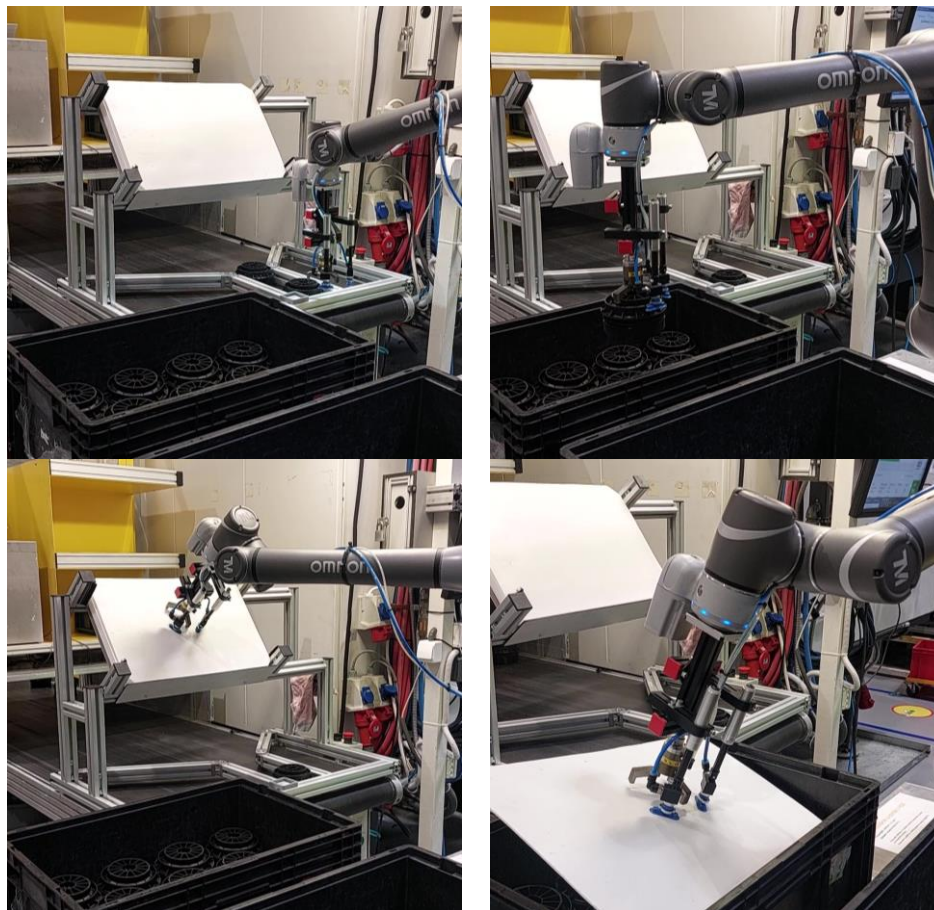
Ve zmíněném závodě jsou koboty nejčastěji využívány právě pro manipulaci s výrobky při balení k expedici, mimo jiné proto, že se jedná o styčné body automatizovaného výrobního procesu na výrobní lince a manuální expedice. Kolaborativní funkcionalita je tedy žádaným aspektem, neboť se v pracovním prostoru pohybují zaměstnanci, kteří odebírají již naplněná balení a vkládají prázdná, které kobot ihned plní dalšími výrobky.

Jedno z konkrétních pracovišť, kde jsou koboty pro tuto aplikaci využívány, je výrobní linka filtračních elementů do palivových filtrů (viz Obr. 21). V tomto případě je výrobek podroben automatizované vizuální kontrole, která má odhalit výrobní vady na dosedacích plochách filtračních elementů, po níž jsou filtry speciálním pneumatickým prvkem uchopeny a otočeny vzhůru požadovanou stranou. Kobot je o přítomnosti připraveného výrobku informován přes PLC systém, který uchopí a umístí na volné místo v balení.



Obr. 21 Manipulace s vyrobeným filtračním elementem na výrobní lince v závodě spol. Mann+Hummel (foto autor BP).

Dalším z pracovišť, kde je kolaborativní robot aplikován při manipulaci, je balení výrobků ze vstřikovací lisů (viz Obr. 22). V tomto případě bylo využito i strojové vidění pro automatizovanou detekci výrobku, přesto se nejedná o *bin picking* (viz dále), neboť jsou výrobky z lisu vedeny pouze do jedné pozice, odkud jsou uchopovány a přemisťovány do expedičních balení. Na demonstrovaném případě lze pozorovat zajímavou konstrukci koncového efektoru, kdy se jedná o kombinaci mechanického uchopovacího efektoru (tj. gripperu pro uchopování výrobků) s pneumatickým, pro uchopování kartonu oddělujícího jednotlivé vrstvy výrobků v balení.



Obr. 22 Kobot jako obsluha vstřikovacích lisů v závodu spol. Mann+Hummel (foto autor BP).

3.3.2 Bin picking

Bin picking je oproti běžné manipulační úloze odlišný v implementační náročnosti. V tomto případě je nutné, aby byl kobot vybaven systémem strojového vidění a rozpoznávání objektů. Kobotu je předložena přepravka s neuspořádanými objekty, které musí být nasnímány a je nutné vyhodnotit nejlépe uchopitelný objekt, stanovit dráhu a polohu uchopení, ověřit, zdali byl objekt skutečně uchopen, a poté jej přemístit na požadované místo. Jedním z nabízených řešení, umožňující *bin picking* za pomoci strojového vidění, je GRASP od brněnské společnosti SANEZOO (viz Obr. 23).



Obr. 23 Demontrace bin pickingu – expozice firmy SANEZOO Europe – MSV 2023 (foto autor BP).

3.3.3 Montáž

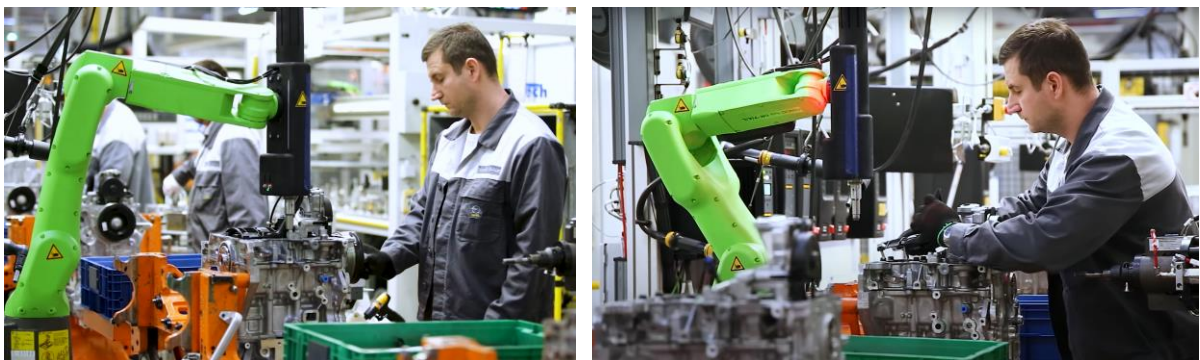
Pokročilejší aplikací kolaborativních robotů je montáž komponent na požadovaná místa ve výrobku, např. osazování elektrotechnických komponent do těla zařízení (viz Obr. 24). V tomto případě se jedná o manipulaci např. PCB deskami, křemíkovými bázemi pro výrobu mikročipů nebo LCD panely, které

vyžadují vysokou přesnost a šetrnost (vzhledem k citlivosti komponent) a v případě mikročipů i vysokou úroveň čistoty. Tyto požadavky mohou koboty naplnit lépe než lidský zaměstnanec.



Obr. 24 Démonstrace montáže PCB desek do přípravku – expozice Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky ČVUT v Praze – MSV 2023 (foto autor BP).

Dalším případem aplikace v kobotů v montáži, v tomto případě šroubových spojů, je z maďarského závodu automobilky Opel, který se zaměřuje na výrobu tří a čtyřválcových benzinových motorů. V případě montáže šroubových spojů je výhodou robotizace tohoto procesu vysoká přesnost utahovacího momentu, kterým má být požadovaný spoj dotažen a zároveň nejsou přenášeny vibrace do rukou pracovníka jakožto ergonomického aspektu. „Největší výzvou [projektu robotizace montážního úkonu] byla otázka, jak zajistit bezpečnost pracovního nástroje tak, aby nemohl ohrozit zaměstnance,“ říká ředitel závodu [41].

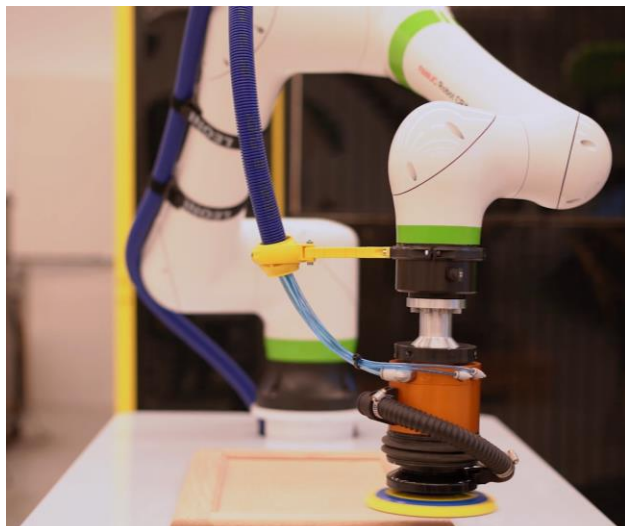


Obr. 25 Aplikace kobotu na montážních lince v závodě automobilky Opel v maďarském Szentgotthárdu, převzato z: [41].

3.3.4 Povrchové úpravy

Povrchové opracování jsou výjimkou mezi obráběcími operacemi, které lze efektivně robotizovat (viz Obr. 26). V ostatních případech nemohou roboty dosáhnout požadované přesnosti v porovnání s CNC obráběcími centry [42]. S těmito procesy se pojí vysoký přenos vibrací do rukou zaměstnance, které jsou negativně vyhodnocovány z pohledu bezpečnosti práce, a zaměstnavatelé se snaží tato rizika snížit na minimum, jedním z možných řešení je aplikace kolaborativních robotů, které navíc mají konstantní pracovní rychlosti na celém povrchu s konstantní přitlačnou silou, a tedy dosahují velmi konzistentního povrchu po celé součásti.

V současnosti ve společnosti Mann+Hummel probíhá výzkum možnosti uplatnění kobotů pro čištění nežádoucího reziduálního povlaku v útrobach polymerového těla filtru (koncept řešení viz Obr. 27).



Obr. 26 Demonstrace aplikace kobotu pro broušení nábytku, převzato z: [43].



Obr. 27 Pracovní stanice kobotu v rámci testování čištění útroby těl filtrů ve společnosti Mann+Hummel (foto autor BP).

3.3.5 Obsluha strojů

V současné době je vysoká priorita kladena i na robotizaci vkládání a vyjímání obrobků do CNC obráběcích center [42], neboť kolaborativní roboty nejsou vhodné pro přesné obrábění, jedná se tedy o spojení výhod obou zařízení, vysoké obráběcí přesnosti a automatizovaného chodu.

Robotizace obsluhy CNC obráběcího centra byla oceněna jako klíčový trend Průmyslu 4.0 v příslušné kategorii zlatou medailí na MSV 2021, a to konkrétně exponátu OkumaArmroid (viz Obr. 28), t.č. unikátního propojení funkcionality výrobního stroje a robotu [44]. V tomto případě se nejednalo o kolaborativního robota, ale o PRaM integrovaný přímo do stroje. Výhodou tohoto řešení je možnost využití funkcionality robotu i k podpůrným technologickým aplikacím.



Obr. 28 Exponát MSV 2021 OkumaArmroid, převzato z: [45].

Na MSV 2023 již byla ukázána možnost alternativní implementace, a to v případě, že požadovaný výrobní stroj není dodáván osazen robotem nebo je již zakoupen a robotizace se provádí až dodatečně, a to pomocí kolaborativního robotu (viz Obr. 29), který je ke stroji umístěn dodatečně. Vzhledem k nízké hmotnosti a vysoké flexibilitě kolaborativních robotů lze celé řešení umístit na vozík spolu s *controllerem*, a tedy je možné kobotu umístit a naprogramovat k danému výrobnímu stroji, kde bude mít zrovna nejvyšší ekonomický přínos. V demonstrované aplikaci kolaborativní robot uchopí obrobek, který je

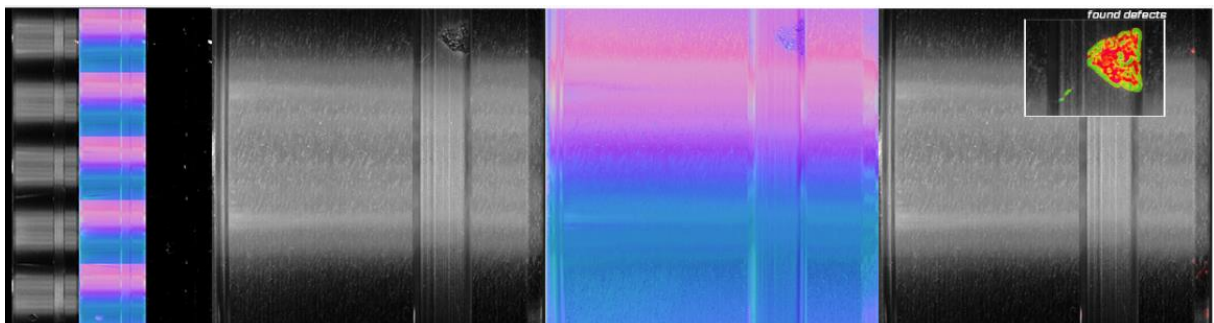
upne, zavře dveře a spustí obráběcí program. Po jeho dokončení je obrobek vyzvednut, umístěn na určené místo a proces se opakuje.



Obr. 29 Demonstrace aplikace kobotu na obsluhu strojních zařízení. Expozice fy FANUC - MSV 2023 (foto autor BP).

3.3.6 Inspekce kvality

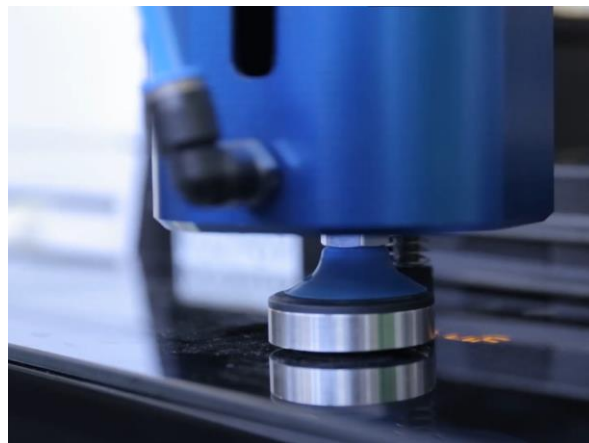
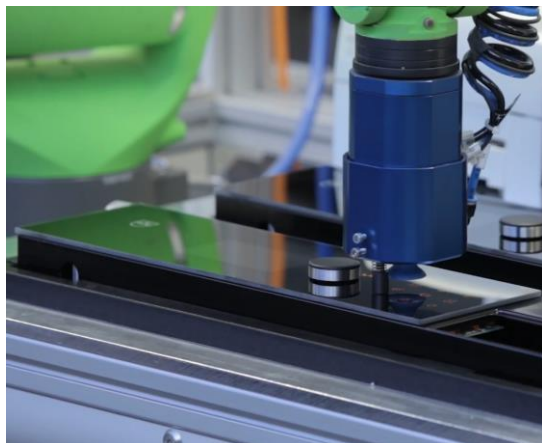
Inspekce kvality je dalším z procesů, jejichž vhodnou robotizací lze dosáhnout vyšší efektivity než v případě zaměstnanců. Brněnská společnost SANEZOO je v současnosti významným inovátorem v oblasti inspekce kvality různých komponent pomocí robotů a za pomoci strojového vidění a umělé inteligence. Na MSV v roce 2023 získala společnost zlatou medaili v kategorii: „*Inovace v automatizační technice a Industry 4.0*“ za inovace v oblasti kamerového snímání a rozpoznávání výrobků a komponent. Tento startup využil příležitosti, které přinesl Průmysl 4.0, a to zejména využití vícekanalových hlubokých neuronových sítí. Tyto sítě jsou po vytrénování schopny identifikovat i jinými metodami obtížně detekovatelné vady, a to pomocí AI vyhodnocením množství snímků za různých nasvícení a úhlů pohledu (viz Obr. 30 - vlevo) [46]. Z těchto snímků je vytvořena mapa povrchu (v prostřední části), která je analyzována neuronovou sítí. Neuronová síť na mapě případně identifikuje defekt (v pravé části snímku) a součástí je předání k detailnější inspekci [47]. Takto komplexní snímání přináší mnohé výhody a na rozdíl od jiných přístupů (alespoň dle marketingových materiálů společnosti) umožňuje vyhodnocení i leštěných a broušených povrchů. Vyhodnocovat lze nejen obrobky, ale i výlisky, výkovky a odlitky [46].



Obr. 30 Vyhodnocení rotačního obrobku. Převzato a upraveno z: [47].

Inspekci lze dále provádět i u fyzických ovládacích komponent (viz Obr. 31). V takovém případě kolaborativní roboty mají velkou výhodu v sensorové vybavenosti a dokážou změřit, zdali komponenta klade požadovaný odpor, popřípadě může být jejich citlivost ještě navýšena dodatečným silovým senzorem na interface koncového efektoru. Ve švýcarské společnosti V-ZUG, která je výrobcem luxusních domácích spotřebičů do kuchyní a koupelen, jsou kolaborativní roboty využity k inspekci funkčnosti ovládacího panelu, a to nejen tlačítek, ale i dotykových prvků nebo rotačních ovládacích prvků.

Patrick Meyer, ředitel pro výrobu a analýzu procesů, se vyjádřil k využití kolaborativních robotů následovně: „Abychom ustáli tlak na cenu produktů, musíme přicházet s chytrými automatizačními řešeními za pomoci principů lean. Můj team má na starost zajišťovat implementaci výrobních zařízení – od malých až po celé automatizované linky. Práce s kolaborativními roboty patří mezi ně, chceme totiž být inovativní a nepromarnit příležitosti digitalizace a Průmyslu 4.0“ [48].



Obr. 31 Závod pro výrobu domácích spotřebičů V-ZUG AG nahradil zaměstnance kontroly ovládacího panelu kolaborativním robotem, převzato z: [48].

Dalším případem aplikace kolaborativních robotů v inspekci kvality je kontrola svarů karoserie v automobilovém průmyslu (viz Obr. 27), kdy v belgickém závodu Audi. V tomto případě byl jeden z klíčových aspektů k volbě tohoto řešení byl nedostatek prostor v rámci závodu, a proto byla klíčové slučování procesů do jedné pracovní jednotky, a proto došlo ke sloučení činnosti čištění svarů lidskými pracovníky a jejich současnou inspekci kolaborativním robotem. Koboty kontrolují svarové spoje na karoserii, zejm. jejich vzhled, délku, pozici a porozitu, a to i v oblastech, kam by se běžný zaměstnanec téměř nebo vůbec nedostal [49].

Patrick Danau, generální ředitel Audi Brussels S.A./N.V., robotizaci procesu v závodu popsal: „[Při robotizaci] používáme princip ‚3D‘. Ten říká, že pro automatizaci vyhodnocujeme zejm. úkony, které jsou špinavé, náročné a nebezpečné.¹ V posledních letech jsme narazili do čtvrtého ‚D‘ – demografie, proto jsme se začali zajímat o kolaborativní roboty.“ Geert de Coppel, inženýr pro koboty v karosárně, dodává: „Jednou z výhod kobotů je, že není třeba vyhrazeného prostoru, což šetří náklady, mohou koexistovat se svými lidskými kolegy a přináší i takové ergonomické benefity, že s nimi mohou pracovat i zaměstnanci s lehkými postiženími“ [49].



Obr. 32 Inspekce kvality svarů v belgickém závodu automobilky Audi při jejich současném odstraňování strusky a nečistot pracovníky, převzato z: [49].

¹ Z angl.: „Dirty, Difficult or Dangerous“

3.3.7 Paletizace

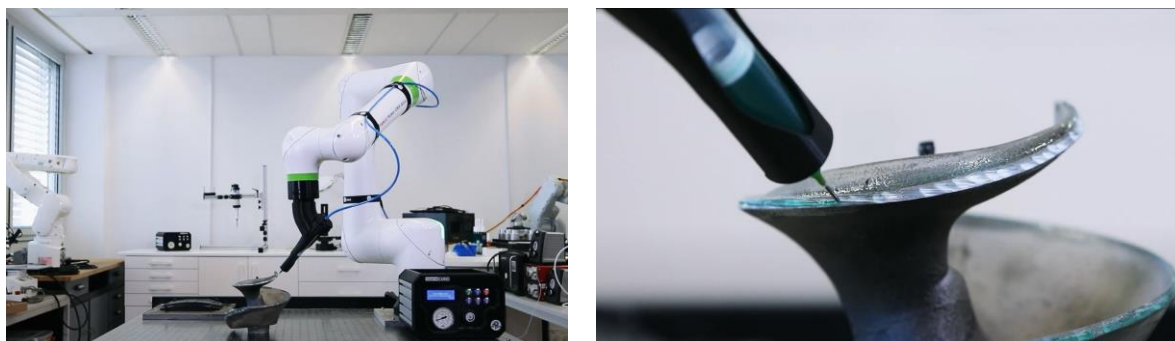
Častým dalším využitím kobotů je v paletizačních úlohách. V logistických prostorách často není možné zamezit přístupu lidí do pracovního prostoru, a proto využívány právě koboty, které lze ručním vedením zkalibrovat na velikost a umístění palety, a poté již proces probíhá automatizovaně. Samotnou paletizaci lze doplnit např. lepením etiket jako je tomu na demonstrovaném pracovišti (viz Obr. 33), kde probíhá paletizace kartonů s vínem a jejich etiketace před umístěním na paletu.



Obr. 33 Demonstrace použití kobotu pro paletizaci kartonů vína a etiketizaci, převzato z: [50].

3.3.8 Lepení a dávkování adhezivních médií

V posledních dekádách narůstá význam lepených spojů. Lepené spoje nahrazují jiné typy, např. šroubové, nýtové, svarové nebo se využívá jejich kombinace. Výsledkem je snížení hmotnosti, nákladů, a naopak zvýšení životnosti spoje [14][51]. Tento trend se projevuje v oblasti kolaborativní robotiky (viz Obr. 34). Kolaborativní roboty umožňují instalaci aplikačního koncového efektoru, který aplikuje lepidlo dle požadavků dané aplikace, kterého lze umožňují *on-line* programovat a flexibilně měnit typy lepených součástí. Robotizace lepených spojů se nejčastěji využívá u velkosériových výrob, protože se s sebou nese řadu výzev, které musí integrátor vyřešit, aby výroba dosahovala požadovaných standardů.



Obr. 34 Demonstrace využití kobotů jako aplikátorů lepidel, převzato z [51].

Mezi hlavní výzvy robotizace aplikace adheziv patří:

- správné množství,
- v odpovídající kvalitě,
- na požadovaná místa.

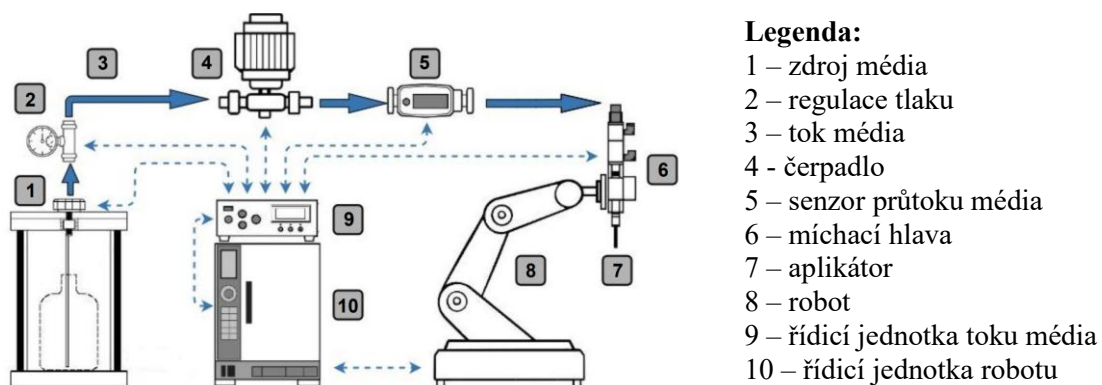
Aplikaci zajišťuje dávkovací sub-systém (viz Obr. 35). Adhezivum je dávkováno ze zdroje, kterým může být tlaková nádoba nebo IBC kontejner, ale i originální balení, jejichž hlavní funkcí je zajistit zachování správné viskozity lepidla, např. vyhřevem, míšením nebo doplňováním. Adhezivum je poté vedeno tlakovými hadicemi, jejichž vlastnosti musí odpovídat požadavkům konkrétního média. Zpravidla se využívají hadice, jejichž vnitřní výstelka je často z teflonu nebo jiného polymeru, který je chemicky inertní vůči danému médiu. V některých případech je též nutné, aby byly hadice vyhřívány a byla zajištěna optimální teplota média od zdroje až k aplikátoru. Z vnější strany musí být tlakové hadice odpovídajícím

způsobem chráněny textilním nebo ocelovým opletem, aby byly dostatečně chráněny před vnějšími vlivy. [52]

Samotný princip strojového dávkování lepidla může být trojího typu: **gravimetrický, volumetrický a tlakový**. V případě gravimetrického dávkování je dávkování založeno na odměřování hmotností a nejčastěji se uplatňuje u mísených adheziv. Volumetrické je nejčastěji využívaným principem dávkování, protože se jedná o nepřesnější metodu, nicméně je nutné systém kalibrovat na každé nové médium, a proto jsou relativně vyšší nároky na údržbu oproti ostatním. Naopak nejlevnější variantou, ovšem méně přesnou je dávkování tlakové, které množství odměřuje jako časovou jednotku působení určitého tlaku. [52]

V případě dvou a vícesložkových adheziv jsou ve finální fázi převedeny do míchací hlavy, kde míchače zajistí smíšení do výsledné směsi dle požadavků výrobce. Míchače mohou být statické, tedy potrubí obsahující spirály, které proudy médií promísí, které se nejčastěji využívají jako jednorázové. Dalším typem jsou staticko-dynamické směšovací systémy, které mají spirály jako u statických míchačů, které jsou navíc elektricky nebo pneumaticky ovládnuty a rotovány, které jsou upřednostňovány zejména pro vysoké rozdíly ve viskozitě nebo směšovacím poměru. Poslední variantou jsou dynamické směšovací systémy, které se využívají pouze pro velmi specifické aplikace, které zkompenzují mimo jiné vysoké vstupní náklady. [52]

V poslední fázi lepidlo přichází do aplikátoru, který může být kontaktní nebo bezkontaktní. V případě kontaktních aplikátorů jsou nejčastěji využívány jehlové nebo komorové ventily. Pro bezkontaktní aplikace adheziv jsou nejčastěji využívány různé typy trysek [53].



Obr. 35 Schéma sub-systému dávkování adhezivních médií, převzato a upraveno z: [52].

3.3.9 Svařování

Svařování je často využívanou technologickou operací v současné strojírenské výrobě. Negativní vliv na zdraví zaměstnanců a jejich nedostatek na pracovním trhu se projevuje ve zvýšené poptávce na robotizaci těchto technologických procesů.

Svary jsou jedním z typů nerozebíratelných spojů. Principem svařování je přivedení tepelné energie do místa svarového spoje, které vede k vzniku svarového spoje a vzniku svarových napětí a deformací. Může se jednat o napětí teplotní a/nebo strukturní, které může po určitém čase odeznít, tedy se jedná o napětí přechodné, nebo setrvat, v takovém případě hovoříme o napětí zbytkovém [14]. Samotný svarový spoj je založen na principu atomárních nebo molekulárních vazeb. Současné technologie umožňují svařovat široké spektrum materiálů, od běžných svařovacích ocelí k nezelezným kovům nebo i plastům. Svarový spoj je považován za kritickou část výrobku, který musí být podroben detailní kontrole, jestli splňuje požadované mechanické vlastnosti [54].

V praxi se nejčastěji setkáváme se svařováním odporovým, obloukovým a svařováním svazkem paprsků.

Bodové svařování

Bodové svařování je technologií řazenou do odporového tlakového svařování. Bodové svařování je pravděpodobně nejčastěji robotizovaným procesem z technologie svařování, neboť je často využívána ve velkosériových výrobcích, např. při svařování karoserií v automobilovém průmyslu a vyznačuje se vysokou výkonností za relativně krátké pracovní časy a zároveň tato technologie neklade vysoké požadavky na dodatečné periferie ani přídavný materiál [55], i přes to všechny je bodové svařování primárně doménou PRaM nikoli kobotů, a to zejm. z důvodu vysoké hmotnosti efektoru a faktu, že je využíván na off-line naprogramovaných výrobních linkách a systémech, a tedy kolaborativní funkcionalita není vyžadována.

Obloukové svařování

Technologie svařování obloukem je výrazně obtížněji robotizovatelná a kolaborativní roboty v této technologii umožňují robotizovat procesy, které by za použití PRaM nebylo ekonomické robotizovat, a to zejm. ve středních a nižších sériích.

Principem obloukového svařování je elektrický výboj hořící v ionizovaném plynu a vzniklé teplo taví svařovaný materiál. Obloukové svařování je souhrnem mnoha různých metod, ale v praxi kolaborativních robotů se setkáváme zejm. s těmito: MIG a MAG, tedy svařování tavnou elektrodou v inertním nebo aktivním plynu.

Svařování metodou MIG/MAG má velmi široké spektrum aplikací: od lehkých po středně těžké svařence z konstrukčních i korozivzdorných ocelí, ale i neželezných kovů. Na rozdíl od bodového svařování existuje mnohem více faktorů, které je ovlivňují výslednou kvalitou, a to zejména délka oblouku, úhel mezi hořákem a materiálem a poté svařovací parametry (tedy svařovací proud, napětí, rychlost a složení ochranného plynu). Svařovací parametry by měly být stanoveny svařovacím technologem, ale délku oblouku a úhel hořáku musí nastavit obsluha ručním vedením (viz Obr. 36). Zde jsou vysoké požadavky na kvalifikovanost obsluhy, neboť existuje množství vad, které mohou vzniknout. Mezi ně se řadí: trhliny, dutiny, pevné vměstky, neprůvary a další [53][56].

Nevýhodou robotizace MIG/MAG svařování je absence okamžité vizuální zpětné vazby o stavu oblouku a svarové lázně, jak je tomu u svářeče. Na to ovšem reagují technologie aktivního řízení oblouku (např. řešení Weldguide od společnosti ABB), které sledují hodnoty impedance obvodu a na základě naměřených dat koriguje dráhu, aby bylo zajištěno optimálních svařovacích podmínek po celé délce svaru [53].

Na Obr. 36 je demonstrován pracovní proces koutového svařování přímého svaru kolaborativním robotem, a to v podmínkách on-line programování obsluhou, tedy pravděpodobně v podmínkách nízkosériové výroby. V iniciační fázi obsluha navede na první bod, který je uložen do paměti, poté převede do robota do koncového bodu, bod je opět uložen, poté co je dokončeno nastavení softwaru, je možné spustit sekvenci a poté opakovat pro potřebný počet kusů.

Tuto technologii využívají např. ve společnosti Last Arrow Manufacturing LLC, kde se zabývají zakázkovým svařováním pro své zákazníky a využívají kolaborativní robot od společnosti FANUC ve spolupráci s integrátorem LINCOLN Electric, kde koboty byly nainstalovány na vozíky, aby je možné bylo flexibilně umisťovat ve výrobních prostorách. „Pokud nevyrobíte 100 % výrobků zcela automatizovaně, můžete kobotu využít jako partnera vašemu současnému operátorovi. Jen část výroby může být automatizovaná. Vaši svářeči se mohou zaměřit na práci, ve které jsou opravdu dobří, např. skládání a upínání svařence a kobot vykoná zbytek operací, zejména těch repetitivních,“ říká Matt Bowling, ředitel a spolujahitel. V případě Last Arrow Manufacturing využití kolaborativních robotů zkrátilo dobu výroby a snížilo náklady [57].



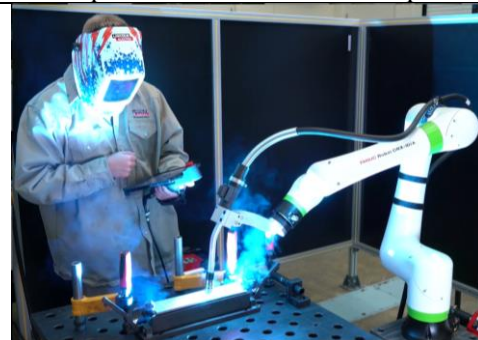
Inicializace + uložení prvního bodu do paměti



Ruční převedení robota do druhé pozice



Uložení druhého bodu do paměti



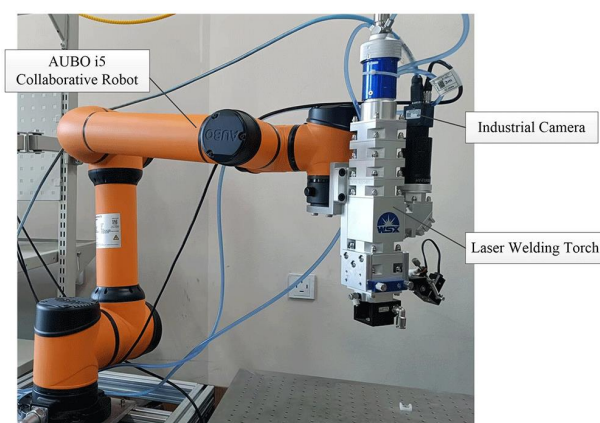
Nastavení parametrů sváření a spuštění sekvence

Obr. 36 Demonstrace sváření stanovením počátečního a koncového bodu a svářecích parametrů, převzato z: [58].

Svařování svazkem paprsků

Svařování svazkem paprsků, zejm. lasery je velmi zajímavou oblastí, kde stále probíhá rozsáhlý výzkum pro potenciální využití.

Největší výzvou laserového svařování je správné stanovení fokusační vzdálenosti a také korektní navedení svazku do spáry, což je hlavním rozdílem od laserového řezání, kde tento problém odpadá. Oba zmíněné faktory je velmi náročné zajistit, a proto jsou vyvíjeny systémy na bázi strojového vidění, které by dokázaly korigovat dráhu robota a zajistili správné směřování svazku. Na této technologii (viz Obr. 37) pracuje např. výzkumná skupina Qiao, Li, Luo a Wang z čínské technické univerzity v Dalianu, jejíž výsledky jsou zatím v předběžně publikovány v rámci recenzního řízení [59]. Praktické uplatnění kolaborativních robotů v oblasti laserového svařování, tedy bude probíhat se zdokonalováním technologií navádění.



Obr. 37 Systém automatického navádění a fokusování laserového svářecího svazku, převzato z: [59].

4 PRINCIPY A ZÁSADY PRŮMYSLU 4.0

4.1 Historie

Pojem Průmysl 4.0 vzešel na světlo světa z příspěvku profesorů Henninga Kagermanna, Wolf-Deitera Lukase, Wolfganga Wahlster, vedoucích významných německých inovačních vládních institucí a spolkové vlády, který prezentovali na veletrhu v Hannoveru v roce 2011 [60]. V tomto příspěvku byla představena vize čtvrté průmyslové revoluce a výzva k započetí transformačního procesu německé ekonomiky.

V jejich příspěvku byly předchozí revoluce chápány následovně:

- 1. průmyslová revoluce jako implementace výrobních strojů v 18. století;
- 2. průmyslová revoluce jako počátek masové výroby s pomocí elektrické energie,
- 3. průmyslová revoluce jako využití elektronických a IT systému v automatizaci a výrobních procesech [60].

4.2 Klíčové koncepty Průmyslu 4.0

Autorské trio vyzývá v rámci **čtvrté průmyslové revoluce** k ještě silnější automatizaci průmyslu. Dále vyzývá k vývoji inteligentních dohledových a autonomně rozhodujících systémů, aby bylo možné celý dodavatelský řetězec optimalizovat a přibližovat k dodávkám „právě na čas“, a to zejm. pomocí vertikální integrace vnitřních produktových systémů a nových business modelů nabízejících optimalizační potenciál v logistice a výrobě. Dalším klíčovým směrem vývoje v rámci této revoluce je IoT, tedy forma komunikace machine-to-machine (M2M) umožňující větší výrobní interoperabilitu, též pomocí kyberfyzikálních systémů [60].

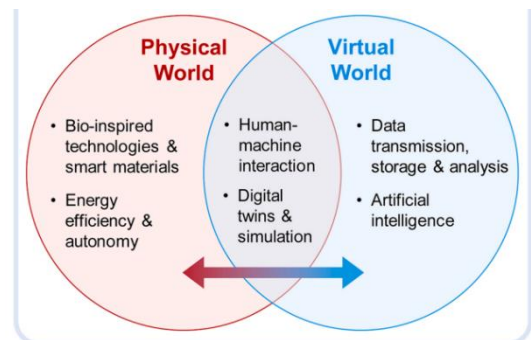
4.2.1 Smart factory

Jedním z obrátů I4.0 je pád paradigmatu, že stroje jsou určeny k výrobě výrobku, ale nyní naopak výrobek sám svoji výrobu determinuje a optimalizuje na základě informací a dat z celé vertikály výrobního řetězce a interních systémů firmy, a to vše v reálném čase bez zásahu lidského elementu [61].

Naopak v chytrých továrnách I4.0 se počítá, že zaměstnanci budou uvolněni z rutinních činností a budou se requalifikovat na kreativní práci s vyšší přidanou hodnotou [62].

4.2.2 Kyber-fyzikální systémy a IoT

Spojení fyzikálního a virtuálního systému přináší potenciální využití synergií k efektivnějšímu fungování. Pojem kyber-fyzikální systémy lze v současnosti chápat zejm. jako automatizované systémy, které umožňují propojení mezi fyzickou realitou a výpočetní a komunikační infrastrukturou (viz Obr. 38). Prvky CPS v kontextu I4.0 by neměly být designovány jako samostatné produkty a stroje, ale výrobci by se měli zaměřit na možnosti propojení, co největšího množství takovýchto zařízení do komplexních CPS sítí [63]. Za demonstrace CPS v kontextu průmyslové praxe a I4.0 můžeme považovat následující technologie: digitální dvojčata, virtuální zprovoznění, IoT a cloudové technologie, zejm. v oblasti AI, strojového učení, Big Data, a do jisté míry i kolaborativní aplikace.



Obr. 38 Vizualizace vybraných principů I4.0 jako synergií kyber-fyzikálních systémů, převzato a upraveno z: [62].

Digitální dvojčata a virtuální zprovoznění

Jedním z klíčových prvků I4.0, jak již bylo zmíněno jsou digitální dvojčata a virtuální zprovoznění. V obou případech se jedná o formu CPS systému. Digitální dvojče chápeme jako propojení fyzického

díla a virtuálního modelu, které v reálném čase komunikují a ovlivňují se navzájem. Fyzické dílo předává virtuálnímu dvojčeti naměřená data, která jsou zpracována, a na jejich základě je modifikována činnost fyzického díla [55]. V současnosti vzestup digitálních dvojčat lze přičítat zejm. potenciálům v oblasti prediktivní údržby a komplexní analýzy činnosti stroje vedoucí k optimalizačním doporučením [64][65]. Digitální stín je variantou digitálního dvojčete, kdy datový tok probíhá pouze jednosměrně, digitální model pouze stínuje reálné dílo. Tuto variantu lze využít v případech, kdy obousměrná komunikace není třeba nebo její nasazení by přinášelo vyšších nákladů nežli úspor.

Trend digitálních dvojčat mimo jiné potvrzuje i udělení zlaté medaile na MSV 2022 v kategorii Inovace v automatizační technice a Industry 4.0 exponátu společností Lisovna Škoda Auto, Cerebrica a TWINZO, které vyvinuly platformu umožňující řídit fungování lisovny právě pomocí vizualizace probíhajících procesů, prvků a objektů, vše v reálném čase. Prvkem I4.0 je zde využití umělé inteligence sbírající data z reálného prostoru, které data vyhodnocuje v oblasti predikcí a efektivnímu plánování [66].

O digitálních dvojčatech mluvíme tehdy, když reálné dílo i virtuální model již existují, ale pro efektivní návrh výroby dle I4.0 a jeho optimalizace lze využít virtuálních prototypovacích prostředí, které souhrnně nazýváme virtuální zprovoznění.

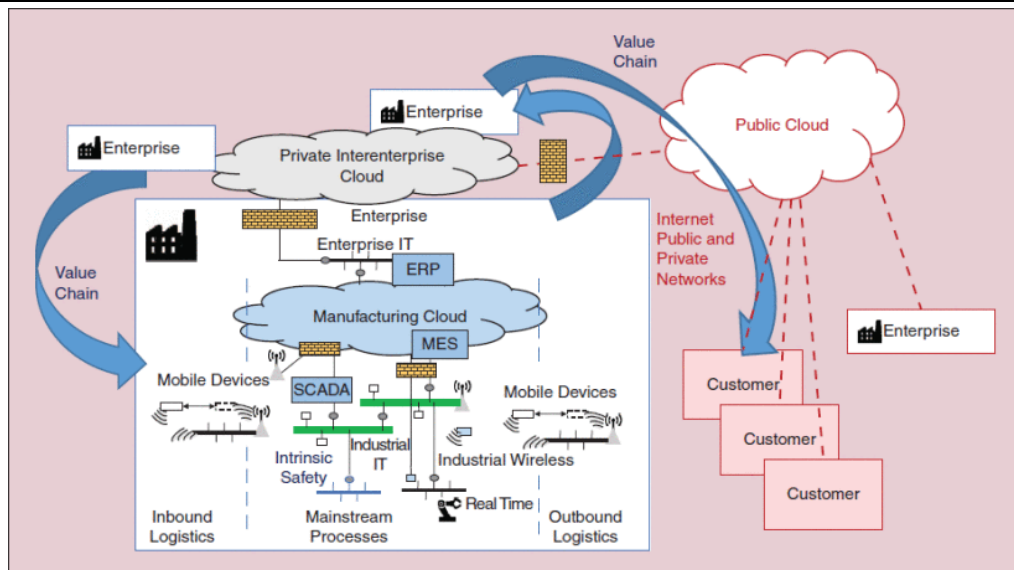
Virtuální zprovoznění umožňuje simulace všech funkčních celků výrobního systému, a tedy i odhalení nedostatků, jak koncepčních, technologických nebo řídicích ještě před samotnou instalací a nasazením [55].

Internet of Things a cloudové technologie

Rychlý vývoj v komunikačních technologiích minulých dekád umožnil vznik technologie IoT. Tento koncept byl poprvé představen na MIT, t.č. za použití rádiové komunikace. V dnešní době je IoT postaven na jiných komunikačních protokolech, jako je Wi-Fi, Bluetooth (zejm. nízkoenergetické varianty LE), RFID, NFC, 5G a LTE, ale i na novějších konceptech jako je Zig bee nebo Z-wave [67]. I přes tyto zdánlivé změny zůstává základní princip nezměněn, a tím je výměna informací o výrobních procesech (v případě I4.0) spolehlivě, včas a standardizovaným způsobem [68]. Zejména poslední jmenované je v současnosti největší výzvou, neboť většina výrobců tvoří vlastní uzavřené ekosystémy, které nepřijímají exogenní zařízení, a proto je nutné využívat různých systémů a bran (např. SCADA – supervisory control a data acquisition) a poté je směřovat do správného serveru (viz Obr. 39). Jak je vidět v obrázku, část vnitropodnikových ERP systémů (např. SAP4HANA, Oracle a další) již pracují na principu cloudových služeb, které jsou ještě navíc mohou být rozdělené podle dat, které jsou v nich obsaženy, protože část dat je nutné sdílet s dceřinými a mateřskými společnostmi, obchodními partnery, státními autoritami a veřejností.

Vysoká interkonektivita, produktivita, otevřenější business modely díky IoT zdánlivě otevírají dveře perspektivní budoucnosti, ale také se otevírají dveře pro nové, bezprecedentní útoky a hrozby. Podle Munirathinama [69] bude až 25 % kyberútoků v budoucnu skrze IoT infrastrukturu, proto bezpečnost, zabezpečení a ochrana dat musí být vždy na paměti při vývoji i integraci IoT systémů.

I přes veškerá rizika jsou potenciální benefity implementace IoT velmi perspektivní, protože množství IoT senzorů může sbírat data a metriky, které doposud nebyly možné a umožní zvyšování produktivity [69].



Obr. 39 Demontrace komplexity IoT a cloudových řešení v kontextu společnosti dle I4.0, převzato z: [68].

Využití Big Data, AI and machine learning

Pomocí IoT je možné sbírat velká množství dat, které je poté potřeba náležitě vyhodnotit, aby bylo možné učinit odpovídající obchodní rozhodnutí. **Big Data** slouží jako základní kámen I4.0 a poskytují organizacím schopnost shromažďovat, zpracovávat a analyzovat obrovské množství strukturovaných i nestruturovaných dat generovaných zařízeními IoT.

Toto množství dat lze využít jako poklad pro algoritmy umělé inteligence a strojového učení. Algoritmy strojového učení jsou podmnožinou umělé inteligence, vynikají schopností učit se z datových vzorců a odpovídajícím způsobem upravovat své modely, což umožňuje systémům vyvíjet se a zlepšovat v průběhu času bez explicitního programování. Tyto technologie umožňují odhalovat vzorce, provádět předpovědi a optimalizovat rozhodovací procesy. Big data a AI v kontextu I4.0 usnadňují získávání informací v reálném čase, prediktivní údržbu a lepší využití zdrojů. [69]

Začlenění umělé inteligence a strojového učení do I4.0 navíc umožňuje vývoj CPS, v nichž stroje spolu spolupracují zcela autonomně.

4.3 Kolaborativní roboty v kontextu zásad Průmyslu 4.0

Problémem současné doby je nepoměrný přístup k výše zmíněným technologiím. V současné ekonomice můžeme nalézt podniky, které pracují na konceptech Průmyslu 5.0 a zároveň jsou zde podniky, do jejichž výrobních portfolií se teprve dostávají technologie úrovně Průmyslu 3.0. Jedním z diferenciálních faktorů je sériovost výroby, neboť při velkosériových výrobách může relativně malé zlepšení znamenat značné finanční úspory, a proto je firma ochotna investovat zdroje adekvátní požadované návratnosti do těchto úspor, zatímco u nízkých sériích se obdobné úspory hledají o dost hůře. Jedním z mála konceptů I4.0, které mají vysokou perspektivu i v takovýchto podnicích, jsou právě kolaborativní roboty. Jednou z jejich klíčových výhod je schopnost přizpůsobit se dynamickému (malosériovému) výrobnímu prostředí. Tyto roboty lze snadno přeprogramovat a přemístit, což výrobcům umožňuje rychle a hospodárně přecházet mezi různými úkoly a zároveň mohou zvýšením efektivity práce umožnit úspory, které lze zpětně investovat do dalších kolaborativních robotů.

Samotné kolaborativní roboty jako prvky I4.0 již v současnosti nabízí široké možnosti napojení do sítí IoT a sběru dat, a tedy i implementace AI a strojového učení v prediktivní údržbě, digitálních dvojčatech a virtuálních zprovoznění. V kontextu malosériových výrob lze dokonce uvažovat o vzniku služeb technických podpor, které by v případě obtíží pomohly na dálku obsluhu s on-line programováním pracovního úkolu a výrazně se snížil čas, který by řešení problému běžně trvalo.

5 VYHODNOCENÍ KONKRÉTNÍHO PRACOVÍŠTĚ KOBOTU S OHLEDEM NA ZÁSADY I4.0

V této kapitole je představen koncern Mann+Hummel a poté detailně demonstrováno a vyhodnoceno pracoviště s ohledem na dříve představené principy I4.0 ve dceřiné pobočce Mann+Hummel (CZ), v.o.s. ve výrobním závodě v Nové Vsi na Třebíčsku.

5.1 O koncernu Mann+Hummel

Počátky firmy Mann+Hummel se datují do 30. let minulého století, kdy se původně textilní výroba ve válečných letech změnila své zaměření na výrobu filtrů. V letech čtyřicátých se firma stala dodavatelem filtrů do proslulého modelu Volkswagen Brouk a s velkou zakázkou byl také nutný přechod na masovou výrobu. Od té doby se společnost stále rozvíjí a je jedním z významných hráčů na trhu, a to zejména pomocí neustálých investic do výzkumu a vývoje a neustálými inovacemi svých produktů a úzkým vztahem se svými zákazníky.

V současnosti má firma celosvětově více než 20 000 zaměstnanců a 80 poboček, které produkují celou škálu produktů od OEM, OES a *aftermarket* produktů pro automobilní a *heavy-duty* průmysl po produktech pro čištění vzduchu veřejných prostor i domácností nebo filtraci vody [70].



Obr. 40 Logo společnosti Mann+Hummel [70].

5.2 Deskripce a vyhodnocení pracoviště kobotu na výrobní lince palivových filtrů

5.2.1 Úvod do místní problematiky

Pracoviště kobotu je umístěno na výrobní lince pro výrobu palivových filtrů. Tato kolaborativní linka je částečně automatizovaná. Nezbytnou část úkonů, které jsou natolik komplexní a obtížně automatizovatelné, provádí operátoři. Kolaborativní robot byl na tuto linku osazen až v rámci výrobní *lean* strategie a optimalizace výrobních kapacit.

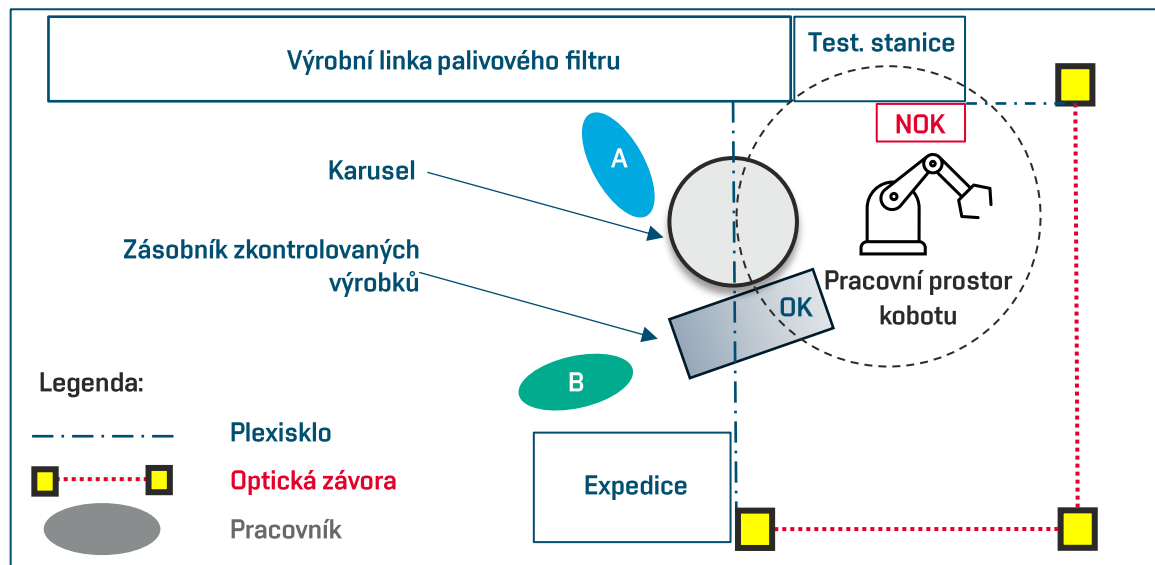
Z důvodu nedostatku místa a byl namísto PRaM zvolen kolaborativní robot pracující v režimu monitorované vzdálenosti a rychlosti. V případě, že se nikdo nenachází ve sdíleném pracovním prostoru, pak pracuje rychlostí vyšší, než je nevyšší dovolená rychlost pro kolaborativní aplikace a v případě, že je překročena optická závora, pak robot sníží svoji rychlost na kolaborativní úroveň. Nejedná se tedy o aplikaci přímo kolaborativní, ale jedná se o koexistenci pracovníků a kobotu.

Funkcí kobotu je automatizace inspekce kvality, a to konkrétně elektrického odporu této součástky. Protože se jedná o palivový filtr, který může být při netěsném napojení vývodů nebo úniku jedné z hadic potřísněn palivem je nutné, aby i plastová součást nebyla nabitá statickým elektrickým nábojem, který by při vzniku jiskry vznítil uniklé palivo. Předchůdcem modelu současného modelu měl kovové tělo, ale současný model má již tělo polymerové, kde je tedy nutné vždy ověřit právě požadovaný elektrický odpor.

5.2.2 Layout celé výrobní linky a pracoviště kobotu

Pracoviště je tvořeno přímou výrobní linkou, na jejímž konci navazuje pracoviště kobotu a na opačné straně pracoviště balení a expedice, celý layout tedy tvoří tvar písmene J.

Prostor kolem výrobní linky je běžně dostupný v některých částech ji obsluhují operátoři. Rozhraní mezi operátory a pracovním prostorem kobotu je ze dvou stran odděleno fyzickou zábranou – plexisklem, které je prostoupeno karuselem, tj. otočným podavačem výrobků ke kontrole, a zásobníkem zkontrolovaných výrobků. Toto fyzické oddělení je nutné kvůli koncovému efektoru, který nesplňuje požadavky pro HRC. Z opačných stran je pracoviště odděleno pouze optickými závorami, protože kobot pracuje v monitorovaném režimu, a tedy při překročení závory sníží svoji rychlost, aby bylo možné např. intergovat s ovládacím panelem.

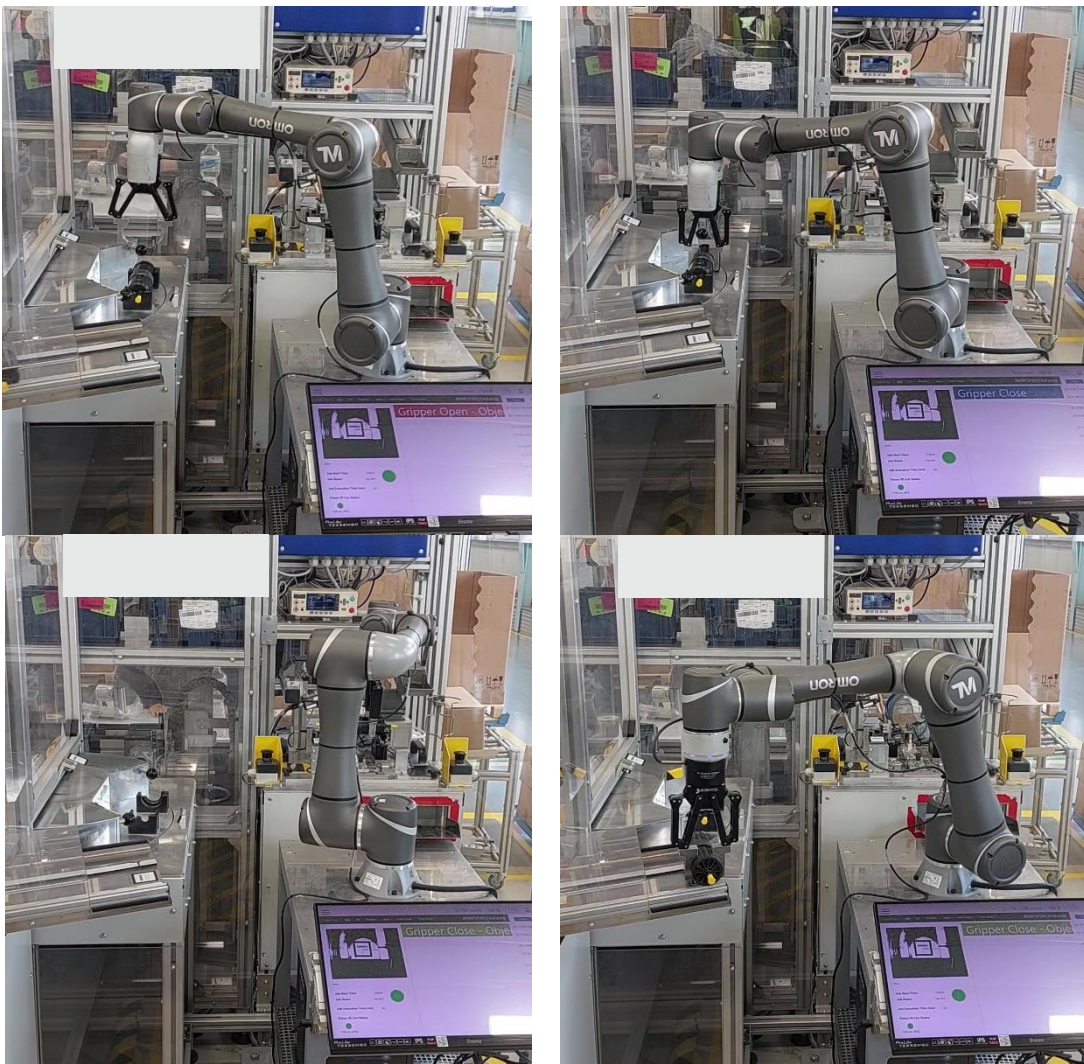


Obr. 41 Layout výrobní linky a pracoviště kobotu.

5.2.3 Deskripce pracovní činnosti kobotu

Pracovní proces na kolaborativním pracovišti probíhá následovně (viz Obr. 42):

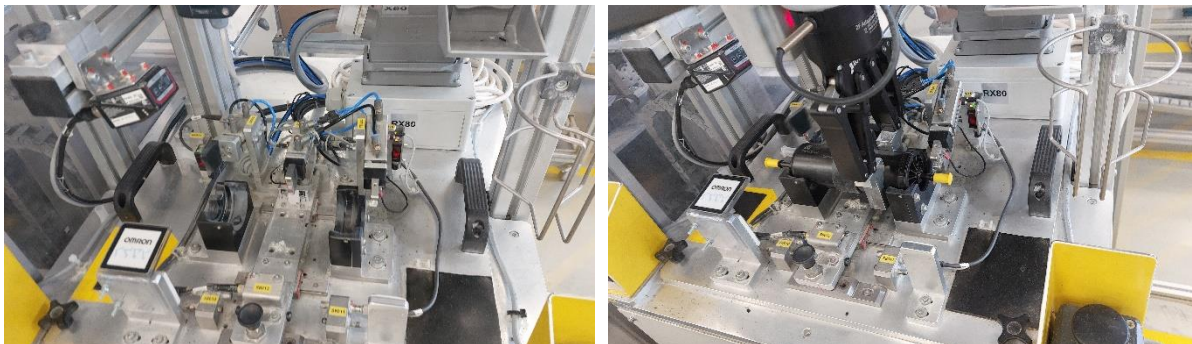
1. Pracovník vyjímá výrobek z pracovní linky, provádí dokončovací operace a vizuální kontrolu, poté výrobek odkládá na otočný karusel o otočením jej přesune do pracovního prostoru kobotu.
2. Kobot čeká, dokud není na jeho straně karuselu přítomen výrobek, který uchopuje, přenáší do testovací stanice. Testovací stanice přiloží na výrobek elektrody, změří elektrický odpor výrobku a proběhne vyhodnocení výsledku.
 - a. V případě kladného výsledku je výrobek přemístěn do odkládacího prostoru, po kterém sklouzne k zaměstnanci B, který provede zabalení a expedici.
 - b. V případě nesplnění technického požadavku je výrobek přemístěn do zásobníku zmetků.
3. Data o kontrolách jsou nahrávána do ERP systému a v reálném čase je monitorována aktivita linka, jestli je vyráběno v souladu s plánem a data jsou zobrazována na obrazovkách nad linkou pro přímou kontrolu mistry.



Obr. 42 Demonstrace pracovního procesu kolaborativního pracoviště (foto autor BP).

5.2.4 Specifikace aplikace inspekce kvality a rozhodovací mapa procesu

Jak již bylo zmíněno, cílem pracoviště je inspekce kvality výrobku. Konkrétně otestovat, zdali vyrobený kus palivového filtru splňuje požadavky na hodnotu elektrického odporu dle technických specifikací. Toto testování probíhá ve specializované testovací stanici (detail viz Obr. 43), kdy je výrobek umístěn do přípravku, poté co senzor zachytí jeho přítomnost, jsou přiloženy elektrody a proběhne měření elektrického odporu.

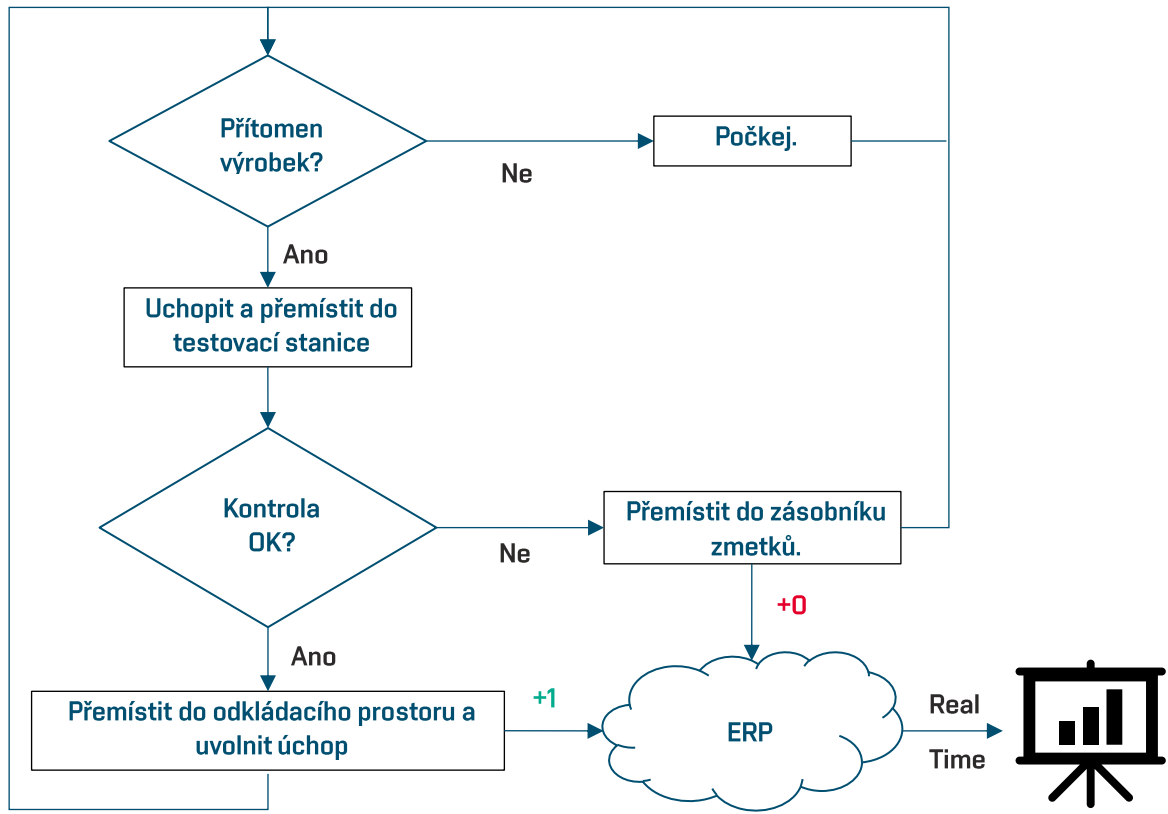


Obr. 43 Detail testovacího přípravku bez a s umístěným výrobkem (foto autor BP).

Hodnota výsledku zkoušky je testovací stanicí předána softwaru, ten na základě výstupu této zkoušky předává kus dále k expedici anebo do zásobníku zmetků k detailnější kontrole.

Rozhodovací mapa kobotu

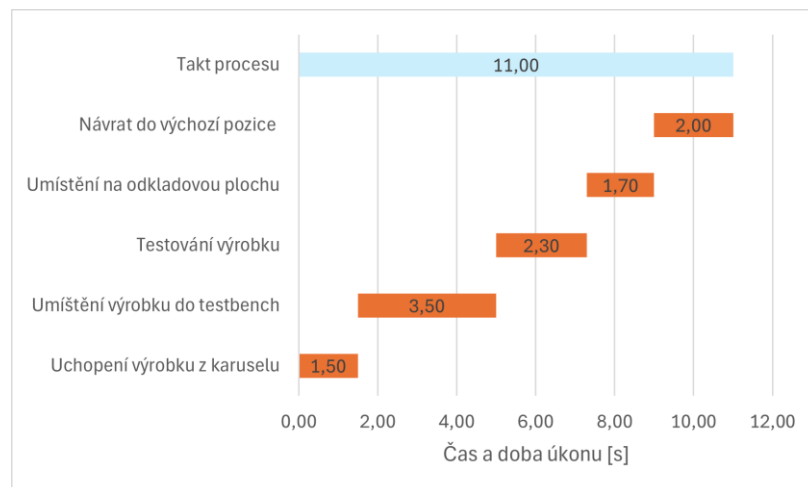
Rozhodovací proces řídicího systému kobotu je ilustrován v rozhodovací mapě na Obr. 44.



Obr. 44 Rozhodovací mapa řídicího systému kobotu.

Ganttův diagram a takt procesu

Protože výrobní linka předcházející kolaborativnímu pracovišti má relativně vysoký takt produkce, musí být dosaženo stejného taktu i u pracoviště kobotu (viz Obr. 45), aby zde nevznikalo úzké hrdlo v rámci výrobního procesu.



Obr. 45 Ganttův diagram procesu a jeho takt.

5.2.5 Objekt manipulace

Jak již bylo výše zmíněno objektem manipulace je palivový filtr, jehož základní rozměry jsou:

- Délka: 250 mm;
- Vnější průměr: 55 mm;
- Hmotnost: cca 200 g.

Tento model palivového filtru je instalován do osobních automobilů jedné z předních světových automobilek.

5.2.6 Kobot

V této aplikaci byl implementován kobot OMRON TM5-900, jehož technické parametry jsou shrnuty v Tab. 8. Jedná se o univerzální kobot, s integrovanou 5 megapixelovou kamerou, a tedy je vhodný pro aplikace, které vyžadují strojové vidění. Dodavatel ke kobotu dodává i programovací prostředí TMflow, které umožňuje on-line programování při potřebě flexibilních aplikací. V demonstrované aplikaci bylo využito off-line programování.


Tab. 8 Základní technické parametry kobotu OMRON TM5-900 [71].

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Počet os | 6 |
| Max. nosnost: | 4 kg |
| Max. dosah: | 900 mm |
| Hmotnost kobotu: | 22.6 kg |
| Hmotnost controlleru: | 13.5 kg |
| Opakovatelnost: | ± 0.05 mm |
| Napájení: | AC: 100 – 240 V, 50 – 60 Hz |
| Maximální rychlost: | 1400 mm/s |

5.2.7 Koncový efektor

Kobot je osazen mechanickým uchopovacím efektem Robotiq 2F-140, jehož základní technické parametry jsou shrnuty v Tab. 9, který je doplněn tvarovým úchopem přímo dle tvaru výrobku. Tento efektor není určen pro kooperaci pracovník-robot, a proto bylo nutné pracoviště kobotu zabezpečit dle vypracované analýzy rizik.

Tab. 9 Základní technické parametry efektoru Robotiq 2F-140 [72].

| | |
|----------------------|---|
| Konstrukce: |  |
| Posuv čelisti: | 140 mm |
| Pohon: | elektrický |
| Hmotnost: | (0.62 – 1.2) kg |
| Min. uchopovací síla | 10 N |
| Max. uchopovací síla | 125 N |

5.2.8 Vyhodnocení pracoviště v kontextu zásad I4.0

K vyhodnocení pracoviště z pohledu zásad I4.0 jsem vyžil prvky SWOT analýzy, tedy detailní analýzy z pohledu silných a slabých stránek, příležitostí a hrozeb.

Silné stránky

- CPS a IoT jsou zde ve velké míře využity, a to jak k vzájemné komunikaci kobota a testovací stanice, tak i s ERP systémem při vyhodnocování rychlosti výroby a počtu nekvalit.
- Využití strojového vidění pro detekci přítomnosti výrobku.

Slabé stránky

- Relativně vysoká komplexnost celého systému.
- Nízká flexibilita pracoviště.

Příležitosti

- Integrace kontaktních elektrod do koncového efektoru kobota a testovací komponenty přesunout do vozíku kobota, a tím odstranit nutnost přesunu výrobku do testovací stanice a zvýšit tím rychlost taktu.
- V návaznosti předchozí bod robotizovat i balení a expedici, jako je tomu u jiných linek.
- Využití strojového učení a AI k manažerským analýzám výkonnosti linky

Hrozby

- Riziko prostojů v případě poruchy kvůli vysoké komplexnosti systému při nutnosti náhrady některého z prvků.

Shrnutí

Demonstrované pracoviště již inkorporuje některé principy a zásady I4.0 jako je využití IoT a CPS systémů, ale ještě by bylo vhodné zaměřit se na výše uvedené slabé stránky a příležitosti a s pomocí principů I4.0 snížit komplexnost systému (ergo navýšit flexibilitu) a dále se zaměřit na možnosti využití AI a ML dat k manažerským analýzám výkonnosti linky. Dalším doporučením je případné zvážení robotizace navazujícího procesu, tj. balení a expedice.

5.3 Identifikace dalších příležitostí automatizace v kontextu I4.0

Při prohlídce výrobních prostor společnosti byly identifikovány další příležitosti k implementaci kolaborativních robotů v rámci zásad čtvrté průmyslové revoluce.

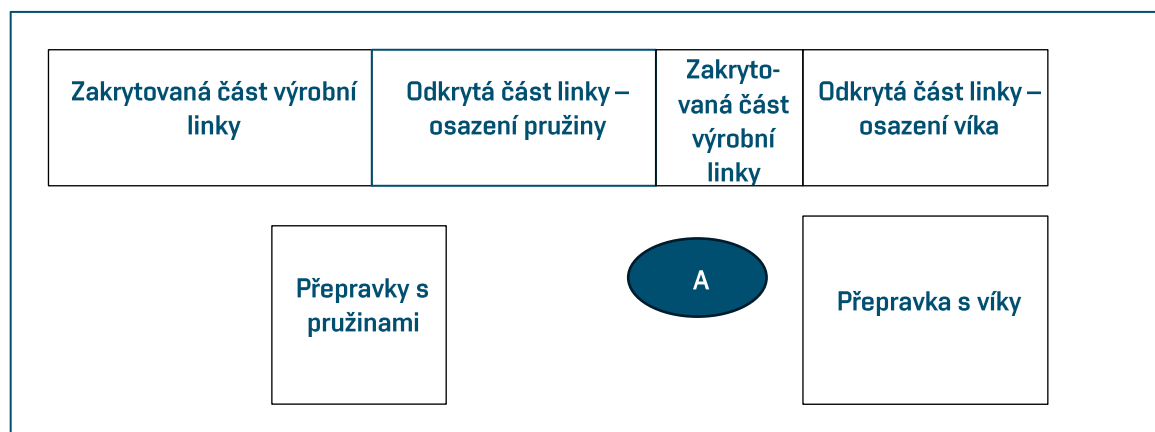
Jedná se prvotní návrhy, na které je nutné navázat postupem navrženým v rešeršní části práce. V této kapitole bude pouze poukázáno na tyto příležitosti a bude navrhována základní koncepce řešení.

5.3.1 Výrobní linka palivových filtrů pro nákladní automobily

Jednou z identifikovaných příležitostí pro implementaci kolaborativních robotů byl úsek výrobní linky pro výrobu palivových filtrů pro nákladní dopravu. V rámci této výrobní linky vykonává operátor A dva pracovní úkony, a to umístění pružiny a víka na filtrační element (viz Obr. 46).



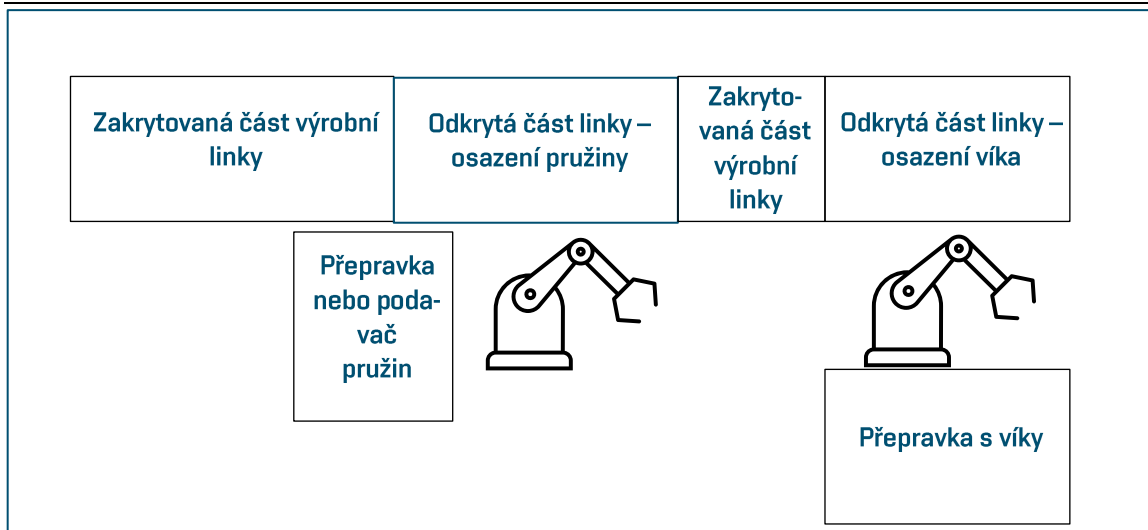
Obr. 46 Demonstrace úkonu osazení pružinou a víkem, (foto autor BP).



Obr. 47 Současný layout pracoviště linky palivových filtrů pro nákladní automobily.

V tomto případě se jedná o zcela rutinní činnosti, kdy jejich automatizaci brání zdánlivě složité procesy, vyhledání a uchopení pružiny a víka, protože nejsou vždy dodávány ve standardizovaných baleních. Nicméně technologie I4.0 už mohou v těchto problémech najít svá uplatnění. Například dříve zmiňované řešení GRASP, které uplatňuje principy strojového vidění a umělé inteligence právě při rozeznávání uchopování volně ložených komponent.

V rámci rozhodovacího procesu o této automatizační lince je nutné ještě vyhodnotit řadu faktorů, mimo přímých úspor a nákladů, je nutno zohlednit i životní fázi této výrobní linky a výrobku. Výhodou tohoto projektu je, že tato linka pracuje ve dvou stejných vyhotoveních, a tedy náklady na konstrukci a vývoj kolaborativního pracoviště by byly pro obě linky sdílené. Pro implementaci bych volil přednostně kolaborativní roboty, jak je tomu i u jiných zdejších pracovišť, aby bylo možné výměnu provádět výměnu přepravek bez nutnosti zastavit pracovní činnost.



Obr. 48 Návrh koncepce pro automatizaci pracoviště pomocí kolaborativních robotů.

5.3.2 Stanice vstřikovacích lisů

Na straně 25 byly demonstrovány koboty obsluhující vstřikovací lisu. Nicméně automatizována nejsou všechna pracoviště, ale pouze ta, která vyrábí tvarově jednodušší výrobky, které jsou skladovány v normalizovaných přepravných jednotkách. Na dalších pracovištích jsou produkovány výrobky, které jsou v současnosti ukládány do specifických manipulačních jednotek, ve kterých jsou dále přepravovány v rámci dalších výrobních procesů.

Tyto manipulační jednotky (viz Obr. 49 – vlevo) nejsou jsou konstrukcí uzpůsobené, aby do nich byly roboticky ukládány vyprodukované součástky. Z toho důvodu je pro firmu zajímavou příležitostí prostřednictvím *re-designu* těchto jednotek do *cobot-friendly* podoby, které by umožnila rozšíření uplatnění kobotů i pro tyto výrobky, a navíc by bylo možné z těchto nových manipulačních plastové výlisky opět vyjmát a využívat koboty i při dalších výrobních fázích.



Obr. 49 Demonstrace současné konstrukce manipulačních jednotek a návrh nového konceptu (foto autor BP).

6 VYHODNOCENÍ A VLASTNÍ ZÁVĚRY SLEDOVANÉ PROBLEMATIKY

Koboty a jejich potenciál v malosériových výroбах

Při tvorbě této bakalářské práce bylo pozorováno, že mnoho malých a středních firem, zejména těch, které neprodukují ve vysokých sériích, má problémy s implementací moderních technologií a prvků I4.0 do svých výrobních postupů, přestože se tyto technologie do obchodní administrativy implementovat podařilo.

Faktorů vstupujících do tohoto rozkolu mezi modernizací a automatizací administrativy a výroby je mnoho. Zatímco administrativa pracuje hlavně s informacemi a daty, tedy formáty, na které byly IT technologie prvotně vyvinuty, výroba pracuje s fyzickými objekty v reálném prostředí, což bylo doposud velmi obtížné efektivně přenášet do počítačově srozumitelné a zpracovatelné podoby. Implementace moderních výrobních technologií má na rozdíl od těch administrativních značně horší škálovatelnost, neboť je často nutné *on-site* přítomnost dodavatele nebo integrátora, což i mnohem vyšší náklady. Dalším faktorem byla IT negramotnost zaměstnanců ve výrobě, u nichž znalost práce s moderními technologiemi dlouho nepatřila do požadovaných dovedností, a tedy bylo velmi náročné najít zaměstnance, kteří by rozuměli jednak výrobnímu procesu a jednak technologiím I4.0, které by měly být do výroby nasazeny.

Hlavním diferenciatorem mezi firmami úspěšně a neúspěšně implementujícími prvky I4.0 do svých výrobních kapacit je sériovost výroby. Pro firmy vyrábějící ve vysokých sériích i velmi nízké jednicové úspory v roční kumulaci znamenají vysoké částky, a tedy tyto firmy byly a jsou do těchto úspor ochotné investovat a často si najmout externí společnost pro tvorbu řešení na míru.

Takovéto úspory, které by opodstatnily vysoké investice se u kusové a malosériové výroby stavují velmi obtížně, a tedy tyto firmy v oblasti moderních výrobních technologií a I4.0 výrazně zaostávají. Kolaborativní roboty jsou právě jednou z technologií, které má potenciál tento *status quo* narušit a zprostředkovat rozšíření I4.0 i zde. Důvody, proč právě kolaborativní roboty mohou najít široké uplatnění v těchto podnicích, spočívají zejména v jejich flexibilitě. Není tedy nutné robotizovat jeden konkrétní úkon na specifickém výrobku, naopak je možné jej uplatňovat *ad-hoc* tam, kde bude v tu chvíli nejvíce vhodný, neboť je možné jej během relativně krátkého časového úseku naprogramovat a uplatnit pro nový úkol. IT technologie už pronikly do všech aspektů života a IT gramotnost je v zásadě paralelou gramotnosti literární, a právě výrobci kolaborativních robotů kladou značný důraz na uživatelskou přívětivost svých ovládacích prostředí, kdy je program kobotu skládán z úkolových bloků a nikoli psaním kódu.

Kolaborativní roboty nejsou pouze vhodné do těchto aplikací, ale své uplatnění nachází v prostorově omezených aplikacích, například dodatečné optimalizaci již fungujícího pracoviště, kde již není vhodné instalovat průmyslový robot, což je omezení týkající se firem všech druhů a velikostí.

Nekolaborativní aplikace

Přestože se pravděpodobně jednalo o motivaci pro vznik kobotů, ukazuje se, že HRC není často u kolaborativních robotů často vůbec uplatňována. Bylo zjištěno, že lidé jsou při přímé spolupráci s koboty ve stresu a samotná realizace je řádově náročnější než v případech, kdy se HRC nerealizuje. To však neznamená, že koboty nepřináší přidanou hodnotu, právě naopak. Koboty mají vysokou přidanou hodnotu v možnosti *on-line* programování prostřednictvím manuálního vedení a možnosti pracovat ve sdíleném pracovním prostoru, pouze neprobíhá přímá spolupráce v rámci provádění pracovního úkolu.

7 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ ROZVOJ ŘEŠENÉ PRO- LEMATIKY

Přenos funkcionality kobotů na PRaM

Vzhledem k výše zmíněnému, tedy že nejvyšší přidanou hodnotu přináší koboty díky možnosti *on-line* programování prostřednictvím manuálního vedení a možnosti pracovat ve sdíleném pracovním prostoru by bylo vhodné prozkoumat možnosti, jak tyto funkcionality přenést i na PRaM, protože v této oblasti je širší nabídka jak robotů, tak i příslušenství a vyšší konkurence.

Kupříkladu FANUC již nabízí řešení pro svou řadu kobotů CR (které nelze v základním provedení manuálně vést), kdy je lze ovládnout joystickem a programovat jejich učení, jak je tomu u řady CRX. Přichází tedy v úvahu, jestli by podobným způsobem nemohly být ovládány i PRaM, pokud by jejich konkrétní aplikace vyžadovala, např. požadavkem vyšší nosnosti než koboty běžně nabízejí (např. v paletizačních úlohách).

Nasadě je však otázka bezpečnosti. Ukazuje se, že je možné PRaM zabezpečit proti nebezpečným statickým a kvazistatickým kontaktům s pracovníky, ovšem jinou technologií, než je tomu u kobotů. Příkladem takového řešení AIRSKIN je rakouské společnosti Blue Danube Robotics [73]. Principem je osazení PRaM měchy s plynem (viz Obr. 50), které se v případě kontaktu zdeformují a senzory detekují změnu tlaku a robot zastaví. Toto řešení tedy umožňuje implementovat PRaM bez fyzického zabezpečení v souladu s technickou specifikací ISO/TS 15066:2016(E).



Obr. 50 Implementace technologie AIRSKIN v saském závodě společnosti Volkswagen, převzato z: [73].

Další možností, jak manuálně vést PRaM a jak je zabezpečit v souladu s požadavky norem, musí být ještě předmětem dalšího výzkumu.

Koboty jako prostředek šíření I4.0 skrze dodavatelské řetězce

Koboty mohou být prostředkem šíření a rozšiřování prvků I4.0 mezi dodavatelskými řetězci jako kontaktní body v rámci logistických center při expedici dodávek. Před kobotou by byla přistavena speditérem paleta z kamionu a pracovníkem by byl odstraněn obalový materiál a inicializována přejímka. Kobota by pomocí IoT identifikovala a jaké zboží se jedná, příjem zanesl do ERP systému a zboží přenesl na dopravník nebo mobilní robot, které by již zboží převezlo do příslušného skladu.

Toto doporučení je v souladu s trendem maximální automatizace logistických center, jejichž hlavními proponenty jsou největší *e-commerce* společnosti, např. americký Amazon nebo česká Alza.

8 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá studiem kolaborativních robotů a jejich uplatnění v rámci výrobních technologií se zaměřením na potenciál v implementaci principů I4.0. V teoretické části byl představen systémový přístup k robotizaci výrobních procesů kolaborativními roboty, a to modifikací přístupu využívaných u PRaM, aby lépe odrážel specifika kolaborativních robotů. Koboty byly dále podrobeny systémovému rozboru z pohledu jednak jako technologické soustavy na jednotlivé příslušné subsystémy, které je tvoří a jejich vlivům na celek, a jednak jako bezpečné soustavy, tedy z pohledu naplnění požadavků na bezpečnost dle příslušných norem, tedy aby byla minimalizována přítomná rizika pro pracovníka ve sdíleném prostoru spolupráce.

V rešeršní části práce byla demonstrována konstrukční řešení modelových řad kobotů třech největších výrobců, a to firem FANUC, ABB a KUKA, a také nabídky příslušných mechanických a pneumatických úchopných koncových efektorů, se kterými jsou nejčastěji využívány. Hlavním přínosem rešeršní části je demonstrace úspěšných implementací kobotů v různých aplikacích, např. manipulaci s výrobky, *bin picking*, montáži, inspekci kvality a dalších. V rámci rešerše úspěšných implementací byly popsány i zkušenosti s jejich uplatněním ve firmě Mann+Hummel.

Dílčím cílem této práce bylo vyhodnocení konkrétního pracoviště kobotu dle principů I4.0, které byly nejprve představeny spolu s klíčovými koncepty, které do problematiky vstupují. Vyhodnocováno bylo pracoviště inspekce kvality v závodu firmy Mann+Hummel při výrobě palivových filtrů, jejichž polymerová těla musí být testována na elektrickou vodivost.

Tato inspekce je prováděna právě kobotem, kterému je pomocí otočného dopravníku zaměstnancem provádějícím dokončovací operaci podán výrobek k inspekci, který je podle výsledku buď vyřazen, nebo pokračuje k expedici. Výsledky jsou poté nahrávány v reálném čase do ERP systému, kde umožňují monitoring průběhu výrobního příkazu a analýzu výkonnosti výrobní linky. Vyhodnocení pracoviště v kontextu I4.0 proběhlo pomocí SWOT analýzy, kdy byly identifikovány silné stránky v podobě komunikace s ERP systémem pomocí IoT protokolu jakožto CPS komponenty a využití strojového vidění. Slabými stránkami byly vyhodnoceny vysoká komplexnost a nízká flexibilita řešení, které by mohly realizovat identifikovanou hrozbu výrobních prostojů při chybě nebo nefunkčnosti některé z komponent. Naopak jako příležitosti byly identifikovány možnosti dalšího zvýšení produktivity integrací měřicích elektrod přímo do koncového efektoru. V rámci exkurze výrobních prostor byly identifikovány i na jiných pracovištích příležitosti k implementaci kolaborativních robotů, a proto jsou v práci představeny úvodní koncepty, které byly firmě doporučeny ke zvážení. Navrženými zlepšeními bylo vytvoření kolaborativního pracoviště na lince palivových filtrů pro nákladních automobilů, které by automatizovalo instalaci pružiny a krytu filtru, a také změna současné konstrukce manipulačních jednotek, která by umožnila kobotu vkládat výrobky, které jsou produkovány vstřikovacím lisem, přímo do manipulační jednotky.

Na základě získaných poznatků byly formulovány závěry ke sledované problematice. Zde bylo identifikováno, že koboty mají vysoký potenciál k rozšíření principů a technologií I4.0 zejména do malosériových výrob, které mají doposud s implementací prvků I4.0 problémy, a to díky vysoké flexibilitě, kdy mohou vykonávat různé úkoly a nikoli jeden konkrétní pracovní proces, jak je tomu u firem s vyšší sériovostí výroby. Pozitivní vliv má také nižší znalostní bariéra, než je tomu u PRaM díky intuitivním *on-line* programovacím prostředím a stále zvyšující se počítačové gramotnosti. V neprospěch kobotů bylo naopak identifikováno, že nejsou často využívány pro přímé HRC aplikace, ale často bývají naprogramovány v režimu vedení nebo *off-line*, a poté jsou využívány pouze v režimu koexistence ve sdíleném pracovním prostoru, a tedy výrobci PRaM se snaží tyto funkcionality integrovat do svých výrobků, např. množnost ručního vedení pomocí dedikovaného ovladače nebo koexistence pomocí technologie AIRSKIN, čímž mohou PRaM do budoucna představovat vyšší konkurenci i v těchto aplikacích. V doporučeních pro rozvoj sledované problematiky bylo shrnuto, že koboty mohou napomoci v šíření I4.0

v rámci dodavatelských řetězců v rámci přejímky a expedice v logistických centrech jako styčné body mezi automatizovanou výrobou a spedicí.

V návaznosti na tuto bakalářskou práci (např. v autorově diplomové práci) by bylo vhodné dále rozpracovat návrhy, které byly v práci doporučeny v rámci vyhodnocovaného pracoviště za pomoci navrženého systémového přístupu pro robotizaci výrobních procesů, do podoby finálního projektu připraveného k financování a realizaci.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NEXT MOVE STRATEGY CONSULTING. *Size of the collaborative (cobot) robot market worldwide in 2020 and 2021, with a forecast for 2022 to 2030 (in million U.S. dollars)*. Online. Statista. 2023, 2023-06-26. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/748234/global-market-size-collaborative-robots/>. [cit. 2024-02-16].
- [2] MAREK, Jiří. *Kompendium znalostí studenta ÚVSSR*. Online. Brno: Ústav výrobních strojů systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 2023. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz/>. [cit. 2024-01-21]. Učebnice Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky, FSI, VUT v Brně.
- [3] ČAPEK, Karel. *R.U.R.* [2. vydání]. Knihy Omega. Praha: Dobrovský, 2020. ISBN 978-80-7390-062-5.
- [4] HUH, Eui-Nam a HOSSAIN, Md Imtiaz. *Brainware Computing: Concepts, Scopes and Challenges*. Online. *Applied Sciences*. 2021, roč. 11, č. 11, s. 5303. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11115303>. [cit. 2024-01-22].
- [5] KLUS, Jiří. *Realizace demonstračních úloh na pracovišti s kooperativním robotem YuMi*. Online, Diplomová práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2022. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/148069>. [cit. 2024-01-21].
- [6] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *ČSN EN ISO 10218-1, Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty*. Praha, 2012.
- [7] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *ČSN EN ISO 10218-2, Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 2: Systémy robotů a integrace*. Praha, 2011.
- [8] KNOFLÍČEK, Radek. *Optimisation methods for driving units of mobile robots*. Online. In: *Automation '99: Sesja II Orprogramowanie, wyposazenie i zastosowania robotów mobilnych*. 1999, s. 227-232. Dostupné z: https://roborepo.pl/wp-content/uploads/2023/04/AUTO-1999-A29_id-153.pdf. [cit. 2024-01-22].
- [9] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. *"hardware"*. Online. In: *Encyclopedia Britannica*. 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/hardware-computing>. [cit. 2024-01-22].
- [10] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. *"software"*. Online. In: *Encyclopedia Britannica*. 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/software>. [cit. 2024-01-22].
- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION [ISO]. *ISO/TS 15066:2016(E), Robots and robotic devices – Collaborative robots*. Ženeva, 2016.
- [12] KÁŇA, Lukáš. *Efektory pro kolaborativní robotizovaná pracoviště*. Online, Diplomová práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/136803>. [cit. 2024-01-21].
- [13] BOTEK, Martin. *Konstrukce a aplikace mobilních robotů vhodných pro průmyslové (výrobní) použití*. Bakalářská práce, vedoucí Radek Knoflíček. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta

strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149170>.

- [14] BUDYNAS, Richard G. a NISBETT, J. Keith. *Shigleyho konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2023. ISBN 978-80-214-5471-2.
- [15] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [16] FANUC. *Collaborative series brochure*. Online. 2021. Dostupné z: https://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/Collaborative%20Robot%20Series%20Brochure%202021_390.pdf. [cit. 2024-03-11].
- [17] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 9283, *Manipulační průmyslové roboty - Technické parametry a souvisící zkušební metody*. Praha, 1999.
- [18] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 60529, *ČSN EN 60529 - Stupně ochrany krytem*. Praha, 1993.
- [19] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 14644-1, *Čisté prostory a příslušná řízená prostředí - Část 1: Klasifikace čistoty vzduchu podle koncentrace částic*. Praha, 2019.
- [20] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Online. 2007. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. [cit. 2024-02-11]. Učební text.
- [21] KOVÁŘÍK, Daniel. *Návrh bezpečného uchopovacího efektoru pro pracoviště se spolupracujícím robotem*. Bakalářská práce, vedoucí Aleš Vysocký. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostava, 2021. Dostupné také z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/144595>.
- [22] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 9409-1, *Manipulační průmyslové roboty - Mechanická rozhraní - Část 1: Lícni desky*. Praha, 2004.
- [23] SCHUNK. *Co-act EGP-C*. Online. 2024. Dostupné z: https://schunk.com/us/en/gripping-systems/parallel-gripper/co-act-egp-c/c/PGR_3995. [cit. 2024-02-13].
- [24] ABB. *Zimmer Group - MATCH collaborative small part gripper ABB Kit*. Online. 2024. Dostupné z: <https://webshop.robotics.abb.com/cz/catalog/product/view/id/448/s/zimmer-group-match-collaborative-small-part-gripper/category/6/>. [cit. 2024-02-13].
- [25] SCHUNK. *EMH Magnetic gripper*. Online. 2024. Dostupné z: https://schunk.com/us/en/gripping-systems/parallel-gripper/co-act-egp-c/c/PGR_3995. [cit. 2024-02-13].
- [26] SCHMALZ. *ROB-SET ECBPi FANUC*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-generators/vacuum-generators-end-of-arm/handling-sets-ecbpi-308297/10.03.01.00505/>. [cit. 2024-02-13].

- [27] SALAJ, Jakub. *Optimalizace laserového svařování AISI 304 a titanu*. Online, Středoškolská odborná činnost, vedoucí Hana Chmelíčková. Uničov: Gymnázium, Uničov, Gymnazijní 257, 2019. Dostupné z: <https://archive.org/details/salaj-laser-welding>. [cit. 2024-02-11].
- [28] CHMELÍČKOVÁ, Hana; HAVELKOVÁ, Martina; HRUBANTOVÁ, Aneta; JÍLEK, Vlastimil; VÁCLAVEK, Lukáš et al. Investigation of Hybrid Lap Welds of Ti6Al4V and Stainless Steel with Bronze Interlayer. Online. *Powder Metallurgy Progress*. 2022, roč. 22, č. 1, s. 43-52. ISSN 1339-4533. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/pmp-2022-0006>. [cit. 2024-02-13].
- [29] FANUC. *CRX Tablet Teach Pendant*. Online. 2021. Dostupné z: <https://crx.fanucamerica.com/wp-content/uploads/2021/01/CRX-Tablet-Teach-Pendant.jpg>. [cit. 2024-02-13].
- [30] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Harmonizované normy*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.agentura-cas.cz/standardizace/uzivani-norem/harmonizovane-normy/>. [cit. 2024-05-13].
- [31] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 12100, *Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika*. Opr. 2. Praha, 2011.
- [32] MALIK, Ali Ahmad a BILBERG, Arne. Developing a reference model for human–robot interaction. Online. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2019, roč. 13, č. 4, s. 1541-1547. ISSN 1955-2513. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00591-6>. [cit. 2024-05-14].
- [33] BI, Z.M.; LUO, Chaomin; MIAO, Zhonghua; ZHANG, Bing; ZHANG, W.J. et al. Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. Online. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021, roč. 67. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102022>. [cit. 2024-03-20].
- [34] IQS DIRECTORY. *Cobots and Collaborative Robots*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/automation-equipment/collaborative-robots.html>. [cit. 2024-05-13].
- [35] TUSSEYEVA, Inara; OLEINIKOV, Artemiy; SANDYGULOVA, Anara a RUBAGOTTI, Matteo. Perceived safety in human–cobot interaction for fixed-path and real-time motion planning algorithms. Online. *Scientific Reports*. 2022, roč. 12, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24622-7>. [cit. 2024-03-22].
- [36] TECHNAVIO. *Major companies in the global industrial robot market in 2019, by estimated market share*. Online. Statista. 2020, 2020-02-2020. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/317178/leading-industrial-robot-companies-globally-by-revenue/>. [cit. 2024-02-16].
- [37] FANUC. *FANUC's history*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.fanuc.co.jp/en/profile/history/index.html>. [cit. 2024-02-16].
- [38] ABB. *Robotics webshop*. Online. 2024. Dostupné z: https://webshop.robotics.abb.com/cz/robots.html?rs_payload_n=0-699&rs_collaboration_n%5B0%5D=collaborative. [cit. 2024-03-11].
- [39] KUKA. *My Kuka: Cobots*. Online. 2024. Dostupné z: https://my.kuka.com/s/category/robots/cobots/0ZG1i000000XZsoGAG?language=en_US. [cit. 2024-03-11].

- [40] ZIMMER GROUP. *Match - End-of-Arm-Ecosystem*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.zimmer-group.com/en-us/technologies-components/robotic/match-end-of-arm-ecosystem>. [cit. 2024-03-11].
- [41] FANUC EUROPE. *FANUC Collaborative robot assists Opel Szentgotthard's production*. Online. 2018. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=uARkiAGON9k>. [cit. 2024-05-20].
- [42] MAREK, Jiří. *Stavba a provoz CNC obráběcích strojů*. Praha: MM publishing, 2023. ISBN 978-80-907452-3-0. Učebnice Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky, FSI, VUT v Brně.
- [43] FANUC EUROPE. *FANUC CRX-10iA robotické broušení dřevěných skříňových dveří*. Online. 2023. Dostupné z: <https://crx.fanuc.eu/cs/collaborative-robot-application-videos/?video=19ci4kn6pd>. [cit. 2023-11-20].
- [44] VELETRHY BRNO A.S. *Zlaté medaile MSV 2021*. Online. 2021. Dostupné z: <https://old.bvv.cz/msv/zlata-medaile-msv/2021/>. [cit. 2024-02-29].
- [45] VELETRHY BRNO A.S. *Okuma Armroid: Zlaté Medaile MSV 2021*. Online. 2021. Dostupné z: <https://old.bvv.cz/msv/zlata-medaile-msv/2022/40-okuma-armroid/>. [cit. 2024-02-29].
- [46] VELETRHY BRNO, A.S. *SANEZOO získala v Brně ocenění za kamerový systém pro inteligentní vizuální kontrolu kvality*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.bvv.cz/msv/aktuality/sanezoo-ziskala-v-brne-oceneni-za-kamerovy-system-pro-inteligentni-vizualni-kontrolu-kvality>. [cit. 2024-02-28].
- [47] SANEZOO EUROPE S.R.O. *CNC TURNING INSPECTION*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.sanezoo.com/cnc-turning-inspection>. [cit. 2024-02-28].
- [48] FANUC EUROPE. *Success Story - FANUC for V-ZUG*. Online. 2018. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=6tK4uY0NNqg>. [cit. 2024-05-20].
- [49] FANUC EUROPE. *FANUC Collaborative Robot at AUDI in Belgium*. Online. 2018. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=P6PQaREiLms>. [cit. 2024-05-20].
- [50] AROBOTICS S.R.O. [@aroboticscz3954]. *AROBOTICS.CZ DEMO LABELING / ETIKETOVÁNÍ NA KARTON FANUC CRX HM s.r.o. Leonardo technology*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=srmqGhoiX3o>. [cit. 2024-05-20].
- [51] FANUC EUROPE. *FANUC CRX at as adhesive solutions*. Online. 2023. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=EuBFmgZ6yDI>. [cit. 2024-05-20].
- [52] RADIL, Filip. *Virtuální zprovoznění robotizovaného pracoviště pro nanášení lepidla*. Diplomová práce, vedoucí Vedoucí práce Jan Vetiška. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky., 2020. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/125107>.
- [53] ADOLT, Lukáš. *Virtuální zprovoznění robotizovaného pracoviště pro obloukové svařování*. Diplomová práce, vedoucí Jan Vetiška. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/129431>.

- [54] VLACH, Jan. *Vliv svařovacích parametrů na kvalitu a mechanické vlastnosti svarového spoje*. Diplomová práce, vedoucí Jaroslav Kubiček. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2019.
- [55] TABARKA, Roman. *Návrh pracoviště pro robotické bodové svařování*. Diplomová práce, vedoucí Jakub Bražina. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149316>.
- [56] HLADÍK, Ondřej. *Virtuální zprovoznění robotického svařovacího pracoviště*. Diplomová práce., vedoucí Jan Vetiška. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148804>.
- [57] FANUC AMERICA CORPORATION. *Welding Cobots Streamline Production for Last Arrow Manufacturing*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xnN9GOWV3d0>. [cit. 2024-03-09].
- [58] FANUC EUROPE. *CRX-10iA kolaborativní robot Manual Teach & ARC Weld*. Online. 2023. Dostupné z: <https://crx.fanuc.eu/cs/collaborative-robot-application-videos/?wvideo=6d9i8dhhrv>. [cit. 2023-11-20].
- [59] QIAO, Xiaoxu; LI, Kai; LUO, Yi a WANG, Xiaodong. Machine vision-based automatic focusing method for robot laser welding system. Online. *Cobot*. 2024, roč. 3. ISSN 2752-5813. Dostupné z: <https://doi.org/10.12688/cobot.17682.1>. [cit. 2024-03-09].
- [60] KAGERMANN, HENNING; LUKAS, WOLF-DIETER a WAHLSTER, WOLFGANG. *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. Online. Düsseldorf: VDI Verlag, 2011. Dostupné z: https://www-live.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf. [cit. 2023-11-16].
- [61] SÁZAVSKÝ, Jakub. *Optimalizace výrobního procesu ve smyslu Průmysl 4.0*. Bakalářská práce, vedoucí Tomáš Mauder. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132465>.
- [62] XU, Xun; LU, Yuqian; VOGEL-HEUSER, Birgit a WANG, Lihui. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. Online. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021, roč. 61, s. 530-535. ISSN 02786125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>. [cit. 2023-11-16].
- [63] JAZDI, N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. Online. In: *2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*. Cluj-Napoca: IEEE, 2014, s. 1-4. ISBN 978-1-4799-3732-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857843>. [cit. 2024-03-10].
- [64] HOLUB, Michal; ANDRS, Ondrej; STEPANEK, Vojtech; KROUPA, Jiri; HUZLIK, Rostislav et al. Experimental study of operational data collection from CNC machine tools for advanced analysis. Online. In: *2022 20th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*. IEEE, 2022, s. 1-5. ISBN 978-1-6654-1040-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ME54704.2022.9983425>. [cit. 2024-02-13].

- [65] VETISKA, Jan; HOLUB, Michal; BLECHA, Petr; BRADAC, Frantisek; BRAZINA, Jakub et al. Industry 4.0 in Educational Process. Online. In: DURAKBASA, Numan M. a GENÇYILMAZ, M. Güneş (ed.). *Digital Conversion on the Way to Industry 4.0*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2021, s. 324-332. ISBN 978-3-030-62783-6. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-62784-3_27. [cit. 2024-02-13].
- [66] Zlaté medaile Mezinárodního strojírenského veletrhu 2022. Online. *MM Průmyslové spektrum*. 2022. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zlate-medaile-mezinarodniho-strojirenskeho-veletrhu-2022>. [cit. 2024-02-29].
- [67] MALIK, Praveen Kumar; SHARMA, Rohit; SINGH, Rajesh; GEHLOT, Anita; SATAPATHY, Suresh Chandra et al. Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art. Online. *Computer Communications*. 2021, roč. 166, s. 125-139. ISSN 01403664. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.11.016>. [cit. 2024-03-10].
- [68] WOLLSCHLAEGER, Martin; SAUTER, Thilo a JASPERNEITE, Juergen. The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. Online. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2017, roč. 11, č. 1, s. 17-27. ISSN 1932-4529. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104>. [cit. 2024-03-10].
- [69] MUNIRATHINAM, Sathyan. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). Online. In: *The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases*. Version of Record 28 January 2020. Advances in Computers. Elsevier, 2020, s. 129-164. ISBN 9780128187562. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.10.010>. [cit. 2024-03-10].
- [70] MANN+HUMMEL. *Webové stránky koncernu Mann+Hummel*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.mann-hummel.com/>. [cit. 2024-03-13].
- [71] OMRON INDUSTRIAL AUTOMATION. *Collaborative robots: TM series*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.ia.omron.com/products/family/3739/specification.html>. [cit. 2024-03-17].
- [72] ROBOTIQ. *2F-85 and 2F-140 Grippers*. Online. 2024. Dostupné z: <https://robotiq.com/products/2f85-140-adaptive-robot-gripper>. [cit. 2024-05-15].
- [73] BLUE DANUBE ROBOTICS GMBH. *AIRSKIN® in moving-line assembly*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.airskin.io/en/blog/airskin-in-moving-line-assembly>. [cit. 2024-04-14].

10 SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratk

CPS – kyber-fyzikální systémy
HRC – spolupráce člověk-robot (Human-robot coloboration)
I4.0 – Průmysl 4.0 (Industry 4.0 / Industrie 4.0)
IoT – internet věcí (Internet of Things)
MSV – Mezinárodní strojírenský veletrh v Brně
OM – objekt manipulace
PRaM – průmyslové roboty a manipulátory
TCP – nástrojový střed (tool centre point)

10.2 Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Prvky IP kódu a jejich význam, převzato z: [18]..... | 9 |
| Tab. 2 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů společnosti FANUC řad CRX a CR [16] [37]..... | 20 |
| Tab. 3 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů firmy ABB řady YuMi modelů 14 050 a 14 000 [38]..... | 20 |
| Tab. 4 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů ABB řad GoFa a SWIFTI [38]..... | 21 |
| Tab. 5 Přehled základních technických parametrů nabídky kobotů výrobce Kuka řad LBR iisy a LBR iiwa [39]. | 21 |
| Tab. 6 Přehled základních technických parametrů vybraných modelových řad koncových efektorů vybraných výrobců [23] [24][40]. | 23 |
| Tab. 7 Přehled základních technických parametrů modelových řad koncových efektorů výrobce Schmalz [26]. | 23 |
| Tab. 8 Základní technické parametry kobotu OMRON TM5-900 [71]..... | 41 |
| Tab. 9 Základní technické parametry efektoru Robotiq 2F-140 [72]. | 41 |

10.3 Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Predikovaný růst kapitalizace trhu s kolaborativními roboty do roku 2030 v milionech USD, převzato z: [1]..... | 1 |
| Obr. 2 Systémový přístup k vyhodnocování robotizace pracovišť..... | 4 |
| Obr. 3 Systémový rozbor koncepce, úlohy a aplikace při robotizaci výrobních procesů [12]. | 5 |
| Obr. 4 Systémový rozbor kobotu jako technologické soustavy. | 6 |
| Obr. 5 Rozbor subsystému MW..... | 7 |
| Obr. 6 Komparace pracovního prostoru a dosahu dvou řad (konfigurací) výrobce FANUC, převzato z: [16]. | 8 |
| Obr. 7 Rozdělení koncových efektorů [20]. | 10 |
| Obr. 8 Demonstrace typů uchopovacích efektorů, převzato z: [23][24][25][26]. | 10 |
| Obr. 9 Technologický efektor – MIG/MAG svářečka, expozice firmy Robix Automation s.r.o. – MSV 2023 (fotografie autor BP)..... | 11 |
| Obr. 10 Systémový rozbor HW..... | 12 |
| Obr. 11 Demonstrace moderního ručního programovacího panelu firmy FANUC, převzato: [29]. | 12 |
| Obr. 12 Navrhovaný koncept BW, převzato z: [4]. | 13 |
| Obr. 13 Vertikální integrace harmonizovaných norem upravující bezpečnost robotů [6][7]. | 15 |
| Obr. 14 Formy spolupráce kobotu a člověka, převzato a upraveno: [32]..... | 16 |
| Obr. 15 Omezení síly a výkonu, převzato a upraveno: [34]. | 17 |
| Obr. 16 Bezpečnostní monitorované zastavení, převzato a upraveno: [34]..... | 17 |
| Obr. 17 Monitoring vzdálenosti a rychlosti, převzato a upraveno: [34]..... | 18 |

| | |
|---|----|
| Obr. 18 Ruční vedení, převzato a upraveno: [34]..... | 18 |
| Obr. 19 Odhadovaný tržní podíl výrobců robotů, převzato z: [36]. | 19 |
| Obr. 20 Demonstrace funkcionality a flexibility řešení MATCH od Zimmer Group. Převzato z: [40]. | 22 |
| Obr. 21 Manipulace s vyrobeným filtračním elementem na výrobní lince v závodu spol. Mann+Hummel (foto autor BP)..... | 24 |
| Obr. 22 Kobot jako obsluha vstřikovacích lisů v závodu spol. Mann+Hummel (foto autor BP)..... | 25 |
| Obr. 23 Demontrace bin pickingu – expozice firmy SANEZOO Europe – MSV 2023 (foto autor BP). | 25 |
| Obr. 24 Demonstrace montáže PCB desek do přípravku – expozice Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky ČVUT v Praze – MSV 2023 (foto autor BP). | 26 |
| Obr. 25 Aplikace kobotu na montážních lince v závodě automobilky Opel v maďarském Szentgotthárdu, převzato z: [41]..... | 26 |
| Obr. 26 Demonstrace aplikace kobotu pro broušení nábytku, převzato z: [43]..... | 27 |
| Obr. 27 Pracovní stanice kobotu v rámci testování čištění útrov těl filtrů ve společnosti Mann+Hummel (foto autor BP)..... | 27 |
| Obr. 28 Exponát MSV 2021 OkumaArmroid, převzato z: [45]. | 27 |
| Obr. 29 Demonstrace aplikace kobotu na obsluhu strojních zařízení. Expozice fy FANUC - MSV 2023 (foto autor BP)..... | 28 |
| Obr. 30 Vyhodnocení rotačního obrobku. Převzato a upraveno z: [47]..... | 28 |
| Obr. 31 Závod pro výrobu domácích spotřebičů V-ZUG AG nahradil zaměstnance kontroly ovládacího panelu kolaborativním robotem, převzato z: [48]. | 29 |
| Obr. 32 Inspekce kvality svarů v belgickém závodu automobilky Audi při jejich současném odstraňování strusky a nečistot pracovníky, převzato z: [49]. | 29 |
| Obr. 33 Demonstrace použití kobotu pro paletizaci kartonů vína a etiketizaci, převzato z: [50]..... | 30 |
| Obr. 34 Demonstrace využití kobotů jako aplikátorů lepidel, převzato z [51]..... | 30 |
| Obr. 35 Schéma sub-systému dávkování adhezivních médií, převzato a upraveno z: [52]..... | 31 |
| Obr. 36 Demonstrace sváření stanovením počátečního a koncového bodu a svářecích parametrů, převzato z: [58]..... | 33 |
| Obr. 37 Systém automatického navádění a fokusování laserového svářecího svazku, převzato z: [59]. | 33 |
| Obr. 38 Vizualizace vybraných principů I4.0 jako synergií kyber-fyzikálních systémů, převzato a upraveno z: [62]..... | 34 |
| Obr. 39 Demonstrace komplexity IoT a cloudových řešení v kontextu společnosti dle I4.0, převzato z: [68]. | 36 |
| Obr. 40 Logo společnosti Mann+Hummel [70]..... | 37 |
| Obr. 41 Layout výrobní linky a pracoviště kobotu. | 38 |
| Obr. 42 Demonstrace pracovního procesu kolaborativního pracoviště (foto autor BP). | 39 |
| Obr. 43 Detail testovacího přípravku bez a s umístěným výrobkem (foto autor BP)..... | 39 |
| Obr. 44 Rozhodovací mapa řídicího systému kobotu. | 40 |
| Obr. 45 Ganttův diagram procesu a jeho takt. | 40 |
| Obr. 46 Demonstrace úkonu osazení pružinou a víkem, (foto autor BP). | 43 |
| Obr. 47 Současný layout pracoviště linky palivových filtrů pro nákladní automobily..... | 43 |
| Obr. 48 Návrh koncepce pro automatizaci pracoviště pomocí kolaborativních robotů..... | 44 |
| Obr. 49 Demonstrace současné konstrukce manipulačních jednotek a návrh nového konceptu (foto autor BP)..... | 44 |
| Obr. 50 Implementace technologie AIRSKIN v saském závodu společnosti Volkswagen, převzato z: [73]. | 46 |