

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bezpečnost v rámci Průmyslu 4.0

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Zdislava MOKRÁ**
Osobní číslo: **E18B0212P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Bezpečnost v rámci Průmyslu 4.0**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Charakterizujte jednotlivé průmyslové revoluce a klíčové prvky konceptu Průmyslu 4.0.
2. Uvedte příklady robotů využívaných v průmyslu a jejich klíčové prvky pro bezpečnou spolupráci s člověkem.
3. Popište problémy spojené s bezpečností ve výrobě týkající se spolupráce člověka s roboty.
4. Zhodnoťte metody využívané k zajištění bezpečnosti pracovníků při spolupráci robota s člověkem.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

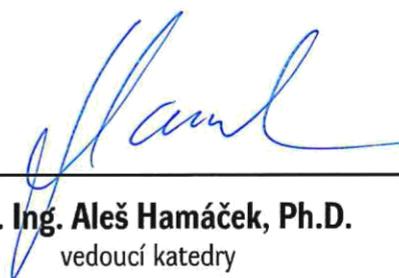
1. MAŘÍK, Vladimír. Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0
2. Elektronické informační zdroje (IEEE, Scencedirect)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Fremr**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou Průmyslu 4.0 a zabezpečením jednoho z jejich klíčových prvků – kolaborativních robotů. Jsou zde definovány jednotlivé průmyslové revoluce a jejich klíčové prvky, s podrobnějším zaměřením na Průmysl 4.0. Další bod je orientován na kolaborativní roboty, jejich zabezpečení a normy/technické specifikace, které se na ně vztahují. Dále jsou uvedeny konkrétní příklady kolaborativních robotů a jejich zabezpečení, jak je prezentuje výrobce. Nakonec jsou uvedeny současné problémy kolaborativní robotiky a hodnocení jejich zabezpečení.

Klíčová slova

průmyslová revoluce, definující rysy Průmyslu 4.0, Průmysl 4.0, Internet věcí, kyberfyzikální systémy v Průmyslu 4.0, průmyslový Internet věcí, big data v Průmyslu 4.0, kolaborativní roboti, zabezpečení kolaborativních robotů, kolaborace člověk-robot, bezpečná kolaborace člověk-robot, bezpečnostní strategie pro HRC, ISO / TS 15066

Abstract

The bachelor's thesis deals with the issue of Industry 4.0 and the safety of one of its key elements – collaborative robots. Individual Industrial Revolutions and their key elements are defined here, with a more detailed focus on Industry 4.0. The next point focuses on collaborative robots, their security and the standards / technical specifications that apply to them. Furthermore, the thesis surveys specific examples of collaborative robots and their security, as presented by the manufacturer. Finally, the current problems of collaborative robotics and evaluation on their security are presented.

Key words

Industrial Revolution, defining features of Industry 4.0, Industry 4.0, Internet of things, cyber-physical systems in Industry 4.0, Industrial Internet of things, big data in Industry 4.0, collaborative robots, safety of collaborative robots, human-robot collaboration, safe human-robot collaboration, safety assurance for HRC, ISO / TS 15066

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Zdislava Mokrá

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Fremrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 JEDNOTLIVÉ PRŮMYSLOVÉ REVOLUCE A JEJICH KLÍČOVÉ PRVKY	11
1.1 PRVNÍ PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE	11
1.2 DRUHÁ PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE	13
1.3 TŘETÍ PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE – DIGITÁLNÍ REVOLUCE	14
1.4 ČTVRTÁ PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE – PRŮMYSL 4.0	17
1.4.1 <i>Problematická definice</i>	17
1.4.2 <i>Internet věcí (IoT) a průmyslový internet věcí (IIoT)</i>	18
1.4.3 <i>Big data</i>	18
1.4.4 <i>Cloudová výroba</i>	19
1.4.5 <i>Kyber-fyzikální systémy</i>	20
2 KOLABORATIVNÍ ROBOTI A JEJICH SPOLUPRÁCE S LIDMI	22
2.1 SPOLUPRÁCE ČLOVĚK-ROBOT	23
2.2 KLASIFIKACE OBECNÝCH BEZPEČNOSTNÍCH NOREM	26
2.3 KOLABORATIVNÍ OPERACE	27
2.3.1 <i>Bezpečnostní monitorované zastavení (SMS)</i>	28
2.3.2 <i>Monitorování rychlosti a odstupu (SSM)</i>	29
2.3.3 <i>Omezení výkonu a síly (PFL)</i>	30
2.3.4 <i>Ruční vedení (HG)</i>	31
2.4 ZABEZPEČENÍ INDUSTRIÁLNÍCH ROBOTŮ	33
2.5 POSUZOVÁNÍ RIZIKA PŘI KOLABORACI	34
2.5.1 <i>Bezpečnostní strategie „před kolizí“</i>	36
2.5.2 <i>Bezpečnostní strategie „po kolizi“</i>	36
3 PŘÍKLADY ROBOTŮ V PRŮMYSLU A JEJICH ZABEZPEČENÍ	39
3.1 UNIVERSAL ROBOTS – SÉRIE UR	39
3.2 FANUC-SÉRIE CR	41
3.3 ABB GoFA A SWIFTI	42
3.4 KUKA-LBR IIWA	43
3.5 OMRON MOBILNÍ ROBOT	45
4 PROBLÉMY SOUČASNÉ KOLABORATIVNÍ ROBOTIKY	46
4.1 HODNOCENÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ	46
4.2 HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ	47
4.3 VÝBĚR VHODNÉHO ZABEZPEČENÍ	48
5 ZÁVĚR	49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50

Úvod

Ústředním bodem této práce je Průmysl 4.0 – také označovaný jako čtvrtá průmyslová revoluce a jeden z jeho klíčových prvků, kolaborativní roboti. Jedním z cílů práce je tedy definovat tento fenomén a seznámit čtenáře s předcházejícími průmyslovými revolucemi a jejich ústředními prvky. Pojem „Průmysl 4.0“ je v poslední době velmi volně používán, proto je jeho původní význam zahlcen zastaralými technologiemi.

Po definici Průmyslu 4.0 je řešena další nově vzrůstající problematika kolaborativní robotiky. V dnešní době je automatizace jednou z nejvíce řešených otázek, s rychlým vývojem přinášejícím neustálé inovace do běžného průmyslu. Kolaborativní roboti se liší od standardních industriálních robotů díky jejich schopnosti bezpečně spolupracovat s lidmi. Integrace lidí do prostoru robota ale přináší spoustu výzev, hlavně z hlediska bezpečnosti. Druhá kapitola poskytuje shrnutí současných poznatků v problematice bezpečnosti a definuje normy vztahující se na kolaborativní roboty.

Dále jsou uvedeni představitelé kolaborativních robotů, kteří se současně používají v průmyslu. Jedná se o roboty firmy Universal Robots, FANUC, ABB, Omron a KUKA. Každá firma využívá jiné možnosti zabezpečení pro spolupráci mezi člověkem a robotem. Coboti disponují určitými parametry, jako například jejich celkový dosah, kolik uzvednou, jejich přesnost při vykonávání repetitivních úkolů a osová rychlost, podle kterých je lze hodnotit.

Zatímco coboti a jejich zabezpečení se aktivně a velmi rychle rozvíjí, normy, legislativa a její aplikace s tímto rozvojem nedrží krok. V poslední kapitole jsou tedy zmíněny současné problémy kolaborativní robotiky a je poskytnuto hodnocení jednotlivých cobotů a bezpečnostních prvků.

Seznam symbolů a zkratek

IoT	Internet of things
IIoT	industrial Internet of things
CPS	cyber-physical systems
HRC	human-robot collaboration
SMS	safety-rated monitored stop
SSM	speed and separation monitoring
PFL	power and force limiting
HG	hand guiding

1 Jednotlivé průmyslové revoluce a jejich klíčové prvky

Pojem „průmyslová revoluce“ může být chápán jako radikální a rychlá změna, přesto se ale odehrává v dlouhodobém časovém měřítku, který probíhá ve všech sociálních sektorech. Před počátkem průmyslové revoluce se vždy vyskytuje určitá „před-fáze“, kdy dochází k vyčerpání možností inovací současně používaných technologií. Zároveň jsou ale nové technologie vyvíjeny. Dají se tedy označit jako odpověď na rozvojovou krizi v globální ekonomice. [1]

1.1 První průmyslová revoluce

První průmyslová revoluce probíhala od osmnáctého století do poloviny devatenáctého století. Soustředila se především na textilní průmysl a parní energii. Byla započatá v Británii, odkud se dále rozšířila do zbytku světa. Je definována jako přechod z ruční výroby k plošné tovární výrobě. Jedná se tedy o nahrazení lidské práce mechanickou prací, která byla poháněna vodní nebo parní energií. [2] [3]

Jak již bylo zmíněno, první průmyslová revoluce byla započatá v Británii, která měla historicky ideální podmínky pro rozkvět textilního průmyslu. První kroky směrem k průmyslové revoluci se děly právě v tomto sektoru. Pro textilní průmysl bylo podstatné vynalezení létajícího člunku roku 1733 Johnem Kayem, což spustilo poptávku po mechanizaci a inovaci textilního průmyslu. Následoval takzvaný Spinning Jenny. Jedná se o jednoduchý stroj ke spřádání textilních vláken, jehož vynález se datuje k roku 1764 Jamesem Hargreavasem. Spinning Jenny měla obdobu ve vodním rámu Richarda Arkwrighta a podmínila k dalšímu vývoji v oblasti. [4] [5]

Dalším z klíčových vynálezů byl nepochybně parní stroj. Thomas Savery je považován za vynálezce prvního prakticky používaného stroje poháněného párou-parního čerpadla. Do té doby byl parní stroj považován za hračku. Parní čerpadlo si nechal patentovat roku 1698. Stroj byl používán především v dolech, kde sloužil k odčerpávání vody. Byl ale velmi neefektivní a nestabilní. První komerčně úspěšný motor, který dokázal přenášet nepřetržitý výkon, vynalezl v roce 1712 Thomas Newcomen, byl inspirován Saveryho modelem. James Watt nakonec značně zlepšil efektivitu Newcomenova motoru přidáním samostatné

nádoby pro kondenzaci, díky které zlepšil množství práce získané na jednotku spotřebovaného paliva. [6] [7]

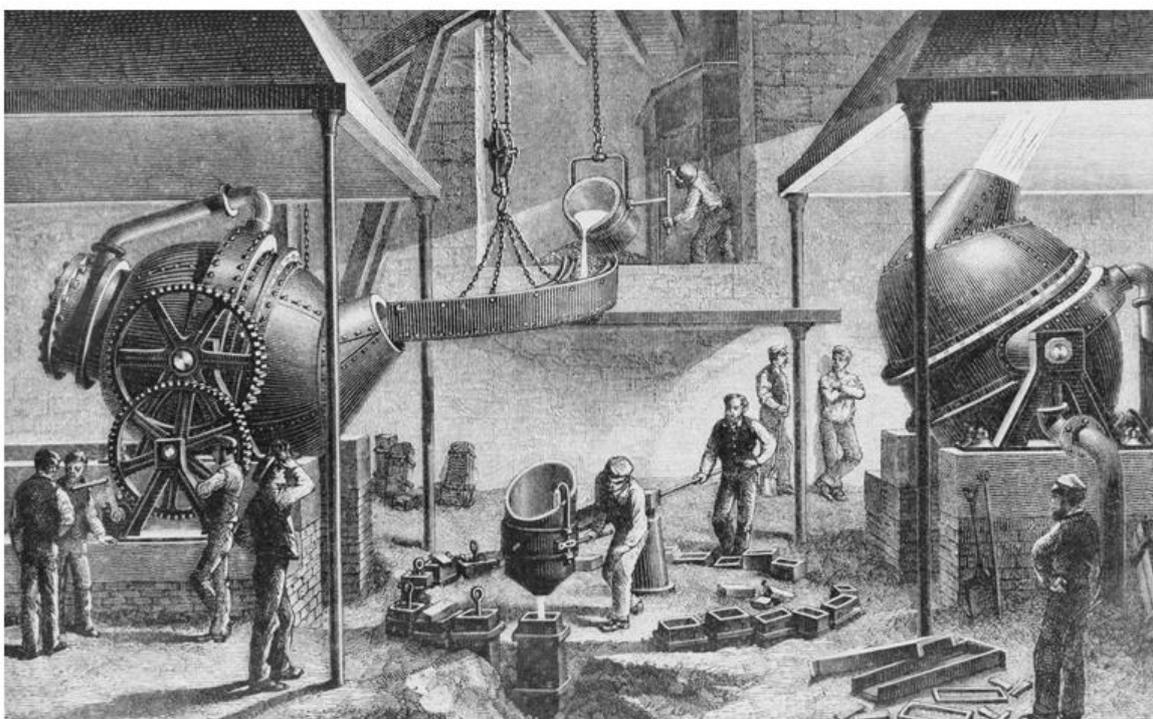
Vynalezení parního stroje se odrazilo také na způsobu transportu. Do té doby byla používána zvířata jako hlavní tažná síla, transport materiálu a zboží byl velmi nákladný a nebezpečný. Roku 1804 byla postavena první parní lokomotiva, komerčně použitelná až roku 1812. První komerčně úspěšný parník byl Clermont, který byl postaven americkým vynálezcem Robertem Fultonem v roce 1807, jeho repliku je možno vidět na obrázku 1. Revoluce v dopravě umožnila rychlý a levný přesun zboží, materiálu ale také myšlenek. [8] [9]



Obr. 1: Parník Clermont-replika [9]

1.2 Druhá průmyslová revoluce

Navzdory značnému překrývání s první průmyslovou revolucí, existovaly na konci 19. a na počátku 20. století narůstající důkazy o nové průmyslové revoluci. Druhá průmyslová revoluce je obecně datována mezi lety 1870 a 1914, zaměřovala se především na výrobu oceli (díky Bessemerovo konvertoru, obrázek 2), automobilový průmysl a elektřinu. Začaly se používat nové různorodé materiály, jako například lehké kovy, nové slitiny a syntetické výrobky. [10]



Obr. 2: Bessemerův konvertor [11]

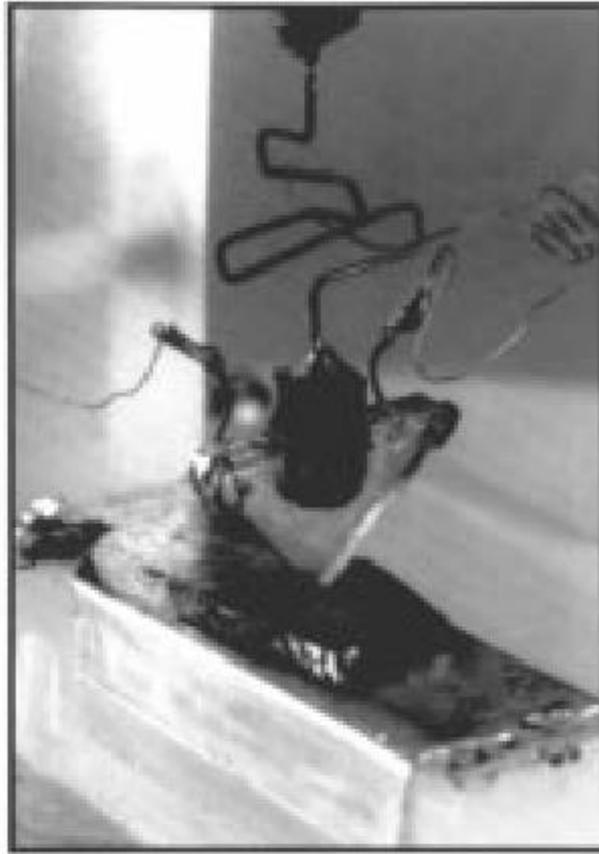
Důsledkem změn výrobních technologií byl vzestup nových technologických systémů, jako jsou telegrafní a železniční sítě, zásobování plynem a vodou a kanalizace, které byly dříve soustředěny do několika vybraných měst. Tyto systémy se po roce 1870 rozšířily a byla přidána řada nových, které jsou vypsány v Tabulce 1. Nejpodstatnější je však elektrická energie a telefon. Druhá průmyslová revoluce zevšednila použití těchto technologií. [12]

Tab.1: Seznam podstatných vynálezů pro druhou průmyslovou revoluci [13]

Rok	Vynálezce	Vynález
1844	Samuel F.B. Morse	Telegraf
		Morseova abeceda
1850	Henry Bessemer	Bessemerův konvertor
	William Kelly	
1853	Elisha Otis	Mechanizovaný osobní výtah
1867	Christopher Sholes	Psací stroj
1876	Alexander Graham Bell	Telefon
1877	Thomas Alva Edison	Fonograf
1879	Edison a Lewis Latimer	Žárovka
1869	George Westinghouse	Vzduchotlaká brzda
1886	Westinghouse a Nikola Tesla	Střídavý proud
1893	Charles a Frank Duryea	Benzínově poháněné auto
1903	Wilbur a Orville Wright	Motorové letadlo

1.3 Třetí průmyslová revoluce – Digitální revoluce

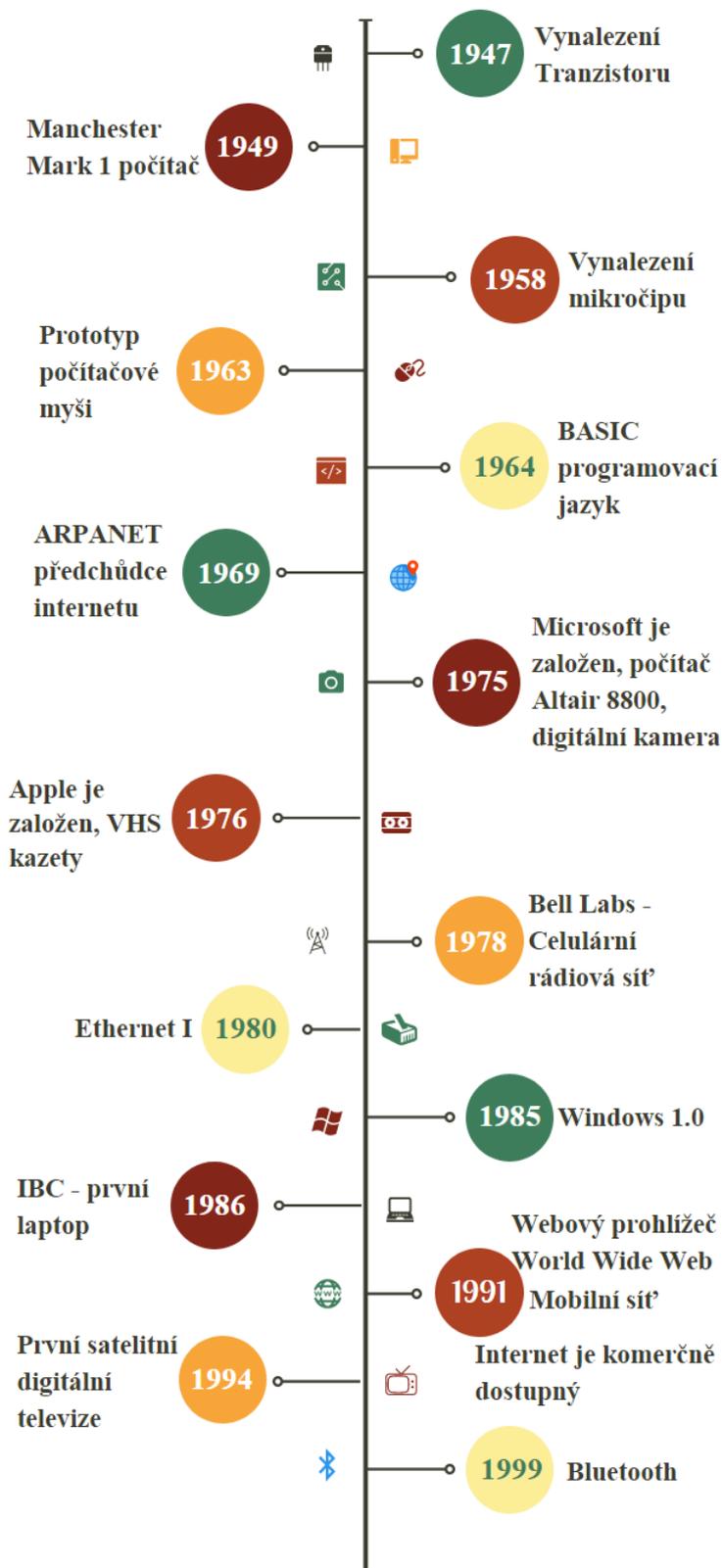
Třetí průmyslová revoluce (také známá jako „digitální“) je označována jako posun od mechanické a analogové technologie k digitální elektronice. Tento posun začal od roku 1980, s vyvinutím a šířením digitálních počítačů, uchováváním digitálních záznamů a rozšířením komunikačních technologií. Přesto je za začátek digitální revoluce považováno vynalezení tranzistoru roku 1947 v Bellových laboratořích, který nepochybně podmínil a umožnil vývoj pokročilé digitální technologie. První prototyp je zachycen na obrázku 3. Vláda, armáda a univerzity začaly využívat počítačové systémy v padesátých a šedesátých letech, přičemž jejich výzkum a investice vedly k rychlému pokroku. V 80. letech se stal počítač běžně používaným přístrojem a do konce tohoto desetiletí se jeho používání stalo pro mnoho pracovních míst nutností. Během tohoto desetiletí byl představen také první mobilní telefon. Sir Tim Berners-Lee následně vynalezl roku 1989 World Wide Web. V roce 1991 byla zavedena komerčně síť WWW a v roce 1996 se internet stal běžnou součástí většiny obchodních operací. Na konci 90. let se internet stal součástí každodenního života pro širokou veřejnost. Počátkem 21. století se digitální revoluce začala šířit po celém rozvojovém světě. Mobilní telefony byly běžně používány, počet uživatelů internetu stále rostl a televize začala přecházet z používání analogových na digitální signály. [14] [15]



Obr. 3: První tranzistor [16]

Hlavním bodem této revoluce je tedy hromadná výroba a široké použití digitální logiky, tranzistorů MOS a integrovaných obvodů a jejich odvozených technologií, včetně počítačů, mikroprocesorů, digitálních mobilních telefonů a internetu. Na obrázku 4 je zobrazena časová osa podstatných vynálezů pro digitální revoluci. [17]

Časová osa digitální revoluce



Obr. 4: Časová osa digitální revoluce [18]

1.4 Čtvrtá průmyslová revoluce – Průmysl 4.0

Obecně byl koncept Průmyslu 4.0 „vynalezen“ v roce 2011 v Německu, kde byl na veletrhu v Hannoveru představen pracovní skupinou na základě mandátu Research Union Economy-Science německého ministerstva školství a výzkumu. Termín „Průmysl 4.0“ byl tehdy použit jako synonymum pro údajnou „čtvrtou průmyslovou revoluci“ a také jako označení strategického plánu, který měl upevnit Německo v posílení své mezinárodní konkurenční pozice ve výrobě. Jedná se o ojedinělý případ, kdy byl začátek průmyslové revoluce ohlášen předem. [19]

1.4.1 Problematická definice

Přestože je pojem „Průmysl 4.0“ často používán a je na toto téma psáno mnoho studií, konceptualizace tohoto jevu je často opomíjena. Studie o implementaci Průmyslu 4.0 často obsahují i zastaralé technologie, jako například CAD (computer-aided design) a CAM (computer-aided manufacturing). [19]

Přesto však byly zmapovány určité technologie, které obsahuje většina z citované literatury. Jedná se o Internet věcí (Internet of things, zkrác. IoT), big data, kyber-fyzikální systémy a cloudovou výrobu. [19]–[23]

Nejčastěji zmiňované technologie jsou tedy cloud a Internet věcí, tudíž nejvíce charakterizují fenomén Průmyslu 4.0. Definice Průmyslu 4.0 se ve velké míře týkají také kyber-fyzikálních systémů a řešení interoperability a kybernetické bezpečnosti. Interoperabilita je schopnost různých systémů mezi sebou spolupracovat, poskytovat si služby a dosáhnout vzájemné součinnosti. Kybernetická bezpečnost se soustředí na zabezpečení daných informací. Tyto pojmy se opakovaně objevují také v souvislosti s „inteligentní výrobou“ a cloudovou výrobou. Dále se objevují pojmy jako 3D tisk a pokročilá robotika, které se i přes svou neustálou relevanci vyskytují v menší míře. [19]

1.4.2 Internet věcí (IoT) a průmyslový internet věcí (IIoT)

Internet věcí je obecně definován jako dynamická globální síťová infrastruktura se schopnostmi vlastní konfigurace na základě standardních a interoperabilních komunikačních protokolů, kde fyzické a virtuální „věci“ mají identity, fyzické atributy a používají inteligentní rozhraní a jsou hladce integrovány do informační sítě. [19]

Prakticky Internet věcí vkládá inteligenci do senzorových zařízení za účelem autonomní komunikace, výměny informací a možnosti učinit inteligentní rozhodnutí. Umožňuje zařízením, aby byla vzdáleně řízena nebo kontrolována pomocí internetové infrastruktury. V případě, že jsou v zařízení umístěné aktivní členy, zařízení se stává součástí kyberfyzikálních systémů. [24] [25]

Průmysl 4.0 používá takzvaný průmyslový Internet věcí (industrial Internet of things – IIoT) k analýze dat z různých průmyslových strojů, procesů a systémů v reálném čase a podle toho přizpůsobuje a automatizuje výrobu. IIoT se dá použít na inovaci výrobních procesů, distribuci, servisu a údržbě ve výrobě. Dále propojuje průmyslová zařízení, která se obvykle skládají ze senzorů, robotů, kolaborativních robotů a akčních členů. Propojení mezi stroji a řídicí infrastrukturou jim umožňuje lehce monitorovat, shromažďovat a měnit data získaná ze zařízení v reálném čase. [26]

1.4.3 Big data

„Big data“ je termín aplikovaný na soubory dat, jejichž velikost je mimo schopnosti zachycovat, spravovat a zpracovávat běžně používanými softwarovými nástroji v rozumném čase. Big data a IoT fungují ve spojení. Data extrahovaná ze zařízení IoT jsou používány k mapování a vzájemnému propojení zařízení. [27]

Big data jsou definována podle takzvaných 7V – velikost, různorodost, rychlost, proměnlivost, důvěryhodnost, vizualizace a hodnota.

1) Volume – velikost. Jedná se o velikost všech zpracovaných dat. Minimální velikost, od které se hovoří o big datech, není pevně stanovena. Jedná se o řádově PB až ZB. [28] [29]

2)Variety – různorodost. Data nejsou jedné kategorie, bývají surová, strukturovaná i nestrukturovaná. Mohou být z různých zdrojů, jako například webové stránky, videa, data získaná ze senzorů, e-maily atd. Díky jejich odlišnosti a nekonvenčnosti je s daty velmi náročné pracovat. [28] [29]

3)Velocity – rychlost. Tato charakteristika označuje rychlost, kterou jsou data generována z různých zdrojů a rychlost jejich zpracování. [28] [29]

4)Variability – proměnlivost. Znázorňuje nekonzistenci toku dat, „jedno slovo může mít mnoho významů“. [28] [29]

5)Veracity – důvěryhodnost. Důvěryhodnost je jedna z nejdůležitějších charakteristik. Nasbíraná data jsou zbytečná, jsou-li neúplná nebo nepřesná. Nepřesnost může vzniknout, když jsou nahromaděná data z různých zdrojů, které mají různé formáty, tudíž i různé poměry signál/šum. [28] [29]

6)Visualization – vizualizace. Jedním z klíčových prvků je převést big data na něco pochopitelného. Jedná se například o grafy, tabulky nebo 3D vizualizace. [28] [29]

7)Value – hodnota. Znázorňuje potenciální peněžní hodnotu, které lze dosáhnout při správné práci s big daty. Mnoho průmyslových odvětví využívá big data při optimalizaci a snížení nákladů pro svou organizaci a zákazníky. [28] [29]

1.4.4 Cloudová výroba

Cloudová výroba je model podnikání, který umožňuje organizacím virtualizovat výrobní zdroje, jako například podnikový informační systém a používat je jako snadno dostupné služby přes internet pomocí cloudu. Cloudová výroba zahrnuje řadu klíčových technologií, jako IIoT a kyber-fyzikální systémy. [30]

Cloudová výroba operuje tedy především pomocí cloudu, využívá výhod cloud computing. Typy cloudových služeb se dělí na IaaS, PaaS a SaaS.

IaaS (infrastructure as a service – infrastruktura jako služba) je nejzákladnější služba cloudu. Pomocí IaaS se pronajímá IT infrastruktura, jako například servery, úložiště a

virtuální počítače bez toho, aniž by se musely fyzicky spravovat. Všechno je pod podmínkou pravidelných plateb. Mezi hlavní výhody tohoto modelu patří flexibilita služby – možnost dokupovat infrastruktury podle potřeby. Klienti také mají plnou kontrolu nad jejich infrastrukturou. Jako hlavní nevýhoda je zde bezpečnost. Přestože má klient plnou kontrolu nad infrastrukturou, neustále je zde hrozba kybernetického útoku. [31]

PaaS (platform as a service – platforma jako služba) je služba, která dodává na vyžádání prostředí pro vývoj, testování, doručování a správu softwarových aplikací. Model PaaS je navržený především pro vývojáře, kterým umožňuje rychlé vytváření webových nebo mobilních aplikací bez starostí o správu infrastruktury serverů, úložiště, sítě a databází potřebných pro vývoj. Tento model má několik výhod, jako například možnost levného a jednoduchého vývoje potřebných aplikací, snížení času kódování a rychlá možnost automatizace. Jako nevýhody se opět nabízí bezpečnost, optimalizace pro různé programovací jazyky (dlouhé odezvy atd) a také operační limitace. [31] [32]

SaaS (software as a service – software jako služba) je způsob dodávání softwarových aplikací pomocí cloudu na základě předplácení. Poskytovatel spravuje aplikaci a infrastrukturu nutnou pro její operaci. Klient se pak pouze připojuje přes internet a využívá software. Jedná se o nejpoužívanější, ze všech tří služeb. Klient se tudíž nemusí starat o úložiště, servery, instalaci a aktualizace softwaru. Hodí se především pro aplikace, které nemusí být často používány nebo pro krátkodobé projekty. Mezi nevýhody patří absence kontroly nad softwarem a jeho přizpůsobením, bezpečnost a limitace. [31] [32]

1.4.5 Kyber-fyzikální systémy

V posledním desetiletí dochází k častějšímu kombinování fyzických a softwarových systémů. V kyber-fyzikálních systémech (cyber-physical systems – CPS) jsou fyzické a softwarové komponenty mezi sebou hluboce propojené. Každá část pracuje v rozdílných prostorových a časových úrovních, vzájemně na sebe působí různými způsoby, které se mění s kontextem. CPS představují vyšší úroveň integrace a koordinace mezi fyzickými a výpočetními prvky. [20]

Jako CPS se dá označit zařízení, které se skládá z řídicí jednotky, která je schopná ovládat senzory a akční členy. Ty interagují s fyzickým světem, zpracovávají získaná data a vyměňují je s jinými systémy nebo cloudovými aplikacemi prostřednictvím

komunikačního rozhraní. Další důležitou charakteristikou CPS je jejich schopnost získávat informace a služby v reálném čase, nezávisle na jejich umístění, pomocí zavedení přístupu k internetu do výrobních strojů. Pro komunikaci je nutné zajistit její stabilitu, spolehlivost, a především bezpečnost v provozu. [26]

CPS jsou používány v mnoha odvětvích, jako například výrobní průmysl, zdravotnictví, zemědělství, chytré domácnosti, doprava a obnovitelná energie. Ve výrobním průmyslu se používá pro automatické monitorování, řízení výroby a sdílení informací. Ve zdravotnictví je lze použít pro dálkové monitorování stavu pacientů. V případě obnovitelné energie umožňují senzory monitorování a řízení sítě, což zvyšuje spolehlivost a účinnost spotřeby energie. V oblasti chytré domácnosti může interakce mezi CPS a inteligentními zařízeními snížit spotřebu energie a zvýšit ochranu domácnosti. V oblasti dopravy tato technologie umožňuje komunikaci mezi vozidly a infrastrukturou a sdílení informací, jako je intenzita provozu a nehody, aby se zabránilo dalším nehodám nebo ucpání silnic. V odvětví zemědělství lze shromažďovat informace o počasí a okolních podmínkách, jako jsou například údaje o zavlažování a vlhkosti, což zvyšuje přesnost systémů řízení zemědělství. [26]

2 Kolaborativní roboti a jejich spolupráce s lidmi

Pojem cobot (collaborative robot – kolaborativní robot) může být definován jako inteligentní stroj, který byl navržen a vyroben za účelem spolupráce s lidmi ve sdíleném prostředí. Za prvního komerčně dostupného cobota je považován produkt firmy Universal Robots, série UR (obrázek 5), který byl prodejní již v roce 2008. Současně existuje přibližně 40 produktových řad robotů od předních výrobců v robotice, jako například FANUC, ABB, Rethink Robotics, KUKA, Feston, Espon, MGS, Motoman, Pmron a MGS Machine. [33]



Obr. 5: Universal robot (UR16e), ABB YuMi [34], [35]

Hlavní rozdíly mezi cobotem a industriálním robotem z hlediska struktury, provozních podmínek, pohybu, ovládacích prvků, komunikace, pracovního prostoru a úrovně složitosti jsou popsány v tabulce 2. Co se týče ovládání, má program v cobotu rozhodovací autonomii, aby vyhověl vstupu člověka v reálném čase. S ohledem na pohyb, se může cobot a člověk interaktivně pohybovat ve sdíleném prostoru za účelem spolupráce. Pohyb cobota je spojen s pohybem člověka pomocí interakcí. Co se týče vzájemné komunikace má cobot rozhraní, aby člověk mohl poskytovat vstupy interaktivně za chodu. V porovnání struktury bývá nespolutracující robot tuhý, těžký a s velkým pracovním vytížením, zatímco cobot je obvykle lehký a struktura je poddajná. Co se týče složitosti, má cobot více funkcí než nespolutracující robot, protože je navržen tak, aby byl schopen reagovat na změny a spolupracovat s lidmi.[33]

Tab. 2: Hlavní rozdíly mezi industriálním nespolutracujícím robotem a cobotem [33]

Nespolutracující roboti	Klíčové prvky	Kolaborativní roboti
Předprogramované	Řízení	Rozhodovací autonomie
Dobře strukturované	Pracovní podmínky	Špatně strukturované s nejistotou
Pohyb s oddělením pracovníků	Pohyb	Současný pohyb člověka a robota
Izolované pracoviště	Pracovní prostor	Ve sdíleném prostoru
Vzdálená interakce	Komunikace	Interakce v reálném čase
Těžké, tuhé a velké pracovní vyžití	Strukturální charakteristiky	Lehký a poddajný
Pevné programy pro zadané úkoly	Složitost	Flexibilní programy pro řešení změn a nejistot

Spolupráce člověka a robota ve sdíleném prostoru vytváří nebezpečné prostředí, které vyžaduje vhodné mechanismy k zajištění bezpečnosti pracovníků. Na rozdíl od průmyslových robotů mají coboti přísné bezpečnostní požadavky, neboť spolupráce člověka a cobota obvykle probíhá ve špatně strukturovaném a měnícím se prostředí. Když robot sdílí pracovní prostor s lidmi za účelem spolupráce, musí být schopen reagovat na tyto změny. Cobot navíc potřebuje pokročilé ovládací prvky, aby se vypořádal s událostmi v jeho blízkosti, například aby se vyhnul srážce s detekovaným objektem. [33]

2.1 Spolupráce člověk-robot

Kolaborativní roboti umožňují přímou interakci mezi pracovníky a roboty, čímž překonávají standardní dělbu práce používanou v továrnách. Tato dělba práce vyžaduje, aby byli roboti uzavřeni v bezpečnostních klecích daleko od pracovníků. Osvobození robota z klece a jeho spolupráce s člověkem přináší ale spoustu výhod. Tyto výhody spočívají například ve snížení námahy a časové náročnosti jednoduchých úkolů, které musí splnit operátor, což zvyšuje produktivitu. Největší výhodou kolaborativních robotů je hlavně možnost spojit výhody automatizace s flexibilitou a kognitivními dovednostmi pracovníků. [36]

Spolupráce člověka a robota (human-robot collaboration – HRC) přináší přesto spoustu výzev. Jednou z nejpodstatnějších a nejdůležitějších je zaručení bezpečnosti pracovníků. Jestliže hlavním cílem HRC je umožnit přímý kontakt mezi operátorem a cobotem (odstraněním klecí), musí toho být dosaženo bezpečným způsobem. [36]

Je proto nutné definovat rozdíl mezi bezpečností, soužitím a spoluprací mezi člověkem a robotem. HRC se dělí na sdílení fyzického pracovního prostoru (nikoli však úkolu) a sdílení fyzického prostoru i úkolu. Za každých podmínek musí být bezpečné chování nekompromisně zaručeno a splněno. Byla tedy navržena vnořená struktura, která se skládá ze tří možných úrovní vzájemné interakce. Jakékoliv vyšší zapojení vyžaduje, aby byly zaručeny vlastnosti nižších úrovní interakce, jak je shrnuto na obrázku 6. [36]



Obr. 6: úrovně HRC [36]

Bezpečnost by měla být nejdůležitější vlastností robota, který může pracovat v blízkosti lidí. Standardní řešení pro zachování bezpečnosti v průmyslovém prostředí, jako například zastavení robota v přítomnosti lidí nebo jeho umístění do klecí, jsou pro účely HRC zjevně nevhodná. Současné normy průmyslové bezpečnosti a technická specifikace ISO / TS15066 omezují celkový okamžitý výkon robotického systému v provozu a určují maximální rychlost pohybujících se robotů v přítomnosti člověka. Mohou ale stále zaostávat v některých aplikacích profesionálního nebo osobního servisu v této oblasti.[37] [36]

Soužití je robotická schopnost sdílet pracovní prostor s lidmi. V takovém případě musí být zaručeny požadavky na bezpečnost člověka. Příkladem soužití je situace, kdy robot a operátor pracují společně na stejném úkolu, aniž by vyžadovali vzájemný kontakt nebo koordinaci. [37] [36]

Spolupráce je případ, kdy robot provádí komplexní úkol s přímou lidskou interakcí a koordinací ve sdíleném prostředí. Je tak možno vidět na obrázku 7. Ve fyzické spolupráci dochází k úmyslnému kontaktu výměnou sil mezi člověkem a robotem. Měřením nebo odhadem těchto sil může robot předvídat záměry lidského pohybu a podle toho reagovat.

Při bezkontaktní spolupráci nedochází k žádné fyzické interakci. Koordinované akce vycházejí z výměny informací, toho lze dosáhnout přímou komunikací, například gesty a hlasovými příkazy, nebo nepřímou komunikací např. očním pohledem. [36]



Obr. 7: Ukázka realizace kolaborativního robota – přímá kolaborace

2.2 Klasifikace obecných bezpečnostních norem

Tabulka 3 uvádí přehled obecných bezpečnostních standardů pro roboty, klasifikované do tří kategorií. [38]

Tab. 3: Klasifikace obecných bezpečnostních norem [38]

Typ	Název	Popis
A	ISO 12100	Obecné zásady pro návrh. Posuzování a snižování rizik. Terminologie a metodologie
	IEC 61508	Funkční bezpečnost elektrických, elektronických, programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností. Obecné požadavky
B		
B1	ISO 13849-1	Bezpečnostní části řídicích systémů. Část 1. Obecné zásady pro návrh. Specifické bezpečnostní aspekty
	IEC 62061	Funkční bezpečnost elektrických, elektronických, programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností
B2	ISO 13850	Funkce nouzového zastavení-zásady pro konstrukci ISO
	ISO 13851	Dvouruční ovládací zařízení. Funkční aspekty a konstrukční principy
C	ISO 10218	Bezpečnostní požadavky na průmyslové roboty
	ISO 10218-1,2	Bezpečnostní požadavky na průmyslové roboty: Část 1 - bezpečnostní požadavky na výrobce robotů (robot a řídicí jednotka). Část 2 - popisuje základní nebezpečí a nebezpečné situace identifikované v těchto systémech a stanoví požadavky na vyloučení nebo přiměřené snížení rizik spojených s těmito nebezpečími
	ISO/TS 15066	Specifikuje bezpečnostní požadavky na kolaborativní průmyslové robotické systémy a pracovní prostředí a doplňuje požadavky a pokyny pro provoz kolaborativních průmyslových robotů uvedené v ISO 10218-1 a ISO 10218-2

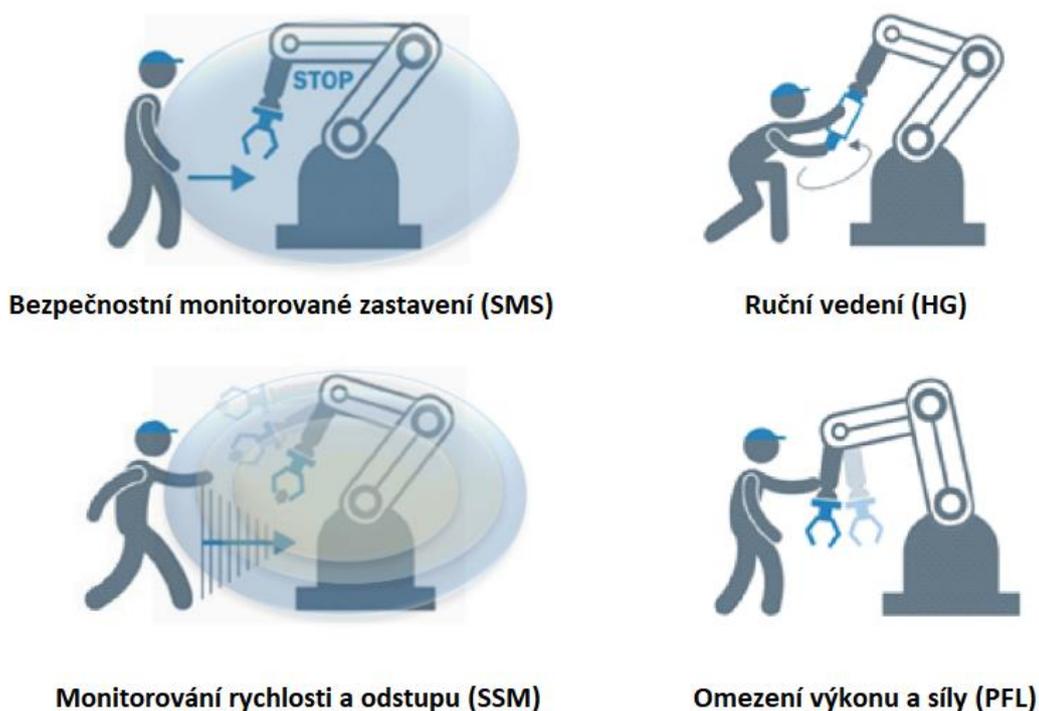
Třída normy typu A shromažďuje základní bezpečnostní normy pro obecné požadavky, používané na strojní zařízení. ISO 12100 a IEC 61508 jsou standardy typu A, které definují základní terminologii a metodiku používanou při návrhu bezpečnosti strojních zařízení. Jedná se o posuzování a snižování rizik a bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných elektronických zařízení. [36]

Třída norem typu B odkazuje na obecné bezpečnostní normy. Je rozdělena do podkategorií B1 a B2. Bezpečnostní normy B1 se zabývají konkrétními bezpečnostními aspekty, například ISO 13849-1 a IEC 62061 odkazují na konstrukci bezpečnostního systému s nízkou složitostí a „bezpečnostní PLC (programmable logic controller)“. Normy B2 zahrnují aspekty zabezpečení, jako jsou ISO 13850 a ISO 13851, které popisují specifické funkční aspekty zařízení pro nouzové zastavení a dvouručních ovládacích zařízení. [36]

Třída normy typu C shromažďuje jednotlivé bezpečnostní normy, které specifikují bezpečnostní protiopatření pro konkrétní strojní zařízení. Pokud jsou k dispozici standardy typu C, mají přednost před standardy typu B a typu A. Dedikované standardy typu C, které regulují bezpečnost průmyslových robotů, jsou rozděleny na dvě části-ISO 10218-1 a ISO 10218-2. ISO 10218-1 shromažďuje bezpečnostní požadavky na výrobce robotů a zabývá se konstrukcí robota a jeho řídicí jednotky. ISO 10218-2 je určena pro systémové integrace a popisuje bezpečnostní požadavky na systém průmyslového robota, který se skládá z průmyslového robota a jakýchkoli doplňkových pomocných zařízení. Technická specifikace ISO/TS 15066 poskytuje další informace a pokyny pro vzájemnou bezpečnou spolupráci mezi člověkem a robotem. [36]

2.3 Kolaborativní operace

V důsledku šíření spolupráce člověka s roboty začal být dbán velký důraz na bezpečnostní standardy robotů, které byly aktualizovány tak, aby zohledňovaly možnosti vzájemné spolupráce. V roce 2016 byla zavedena technická specifikace ISO / TS 15066, která specifikuje bezpečnostní požadavky na kolaborativní systémy průmyslových robotů a pracovní prostředí a dále doplňuje požadavky a pokyny pro provoz kolaborativních průmyslových robotů uvedené v ISO 10218-1 a ISO 10218-2. Pokyny definované v technické specifikaci ISO/TS 15066 identifikují čtyři kolaborativní operace, které lze použít buď jednotlivě, nebo v kombinaci, v závislosti na požadavcích aplikace a konstrukci robotického systému. Jedná se o bezpečnostní monitorované zastavení (safety-rated monitored stop – SMS), monitorování rychlostí a odstupu (speed and separation monitoring – SSM), omezení výkonu a síly (power and force limiting – PFL) a možnost ručního vedení (hand guiding – HG). Tyto operace jsou graficky znázorněny na obrázku 8. [39]



Obr. 8: Kolaborativní operace [33]

2.3.1 Bezpečnostní monitorované zastavení (SMS)

SMS je nejjednodušší typ kolaborace. Operátor provádí manuální úkoly uvnitř oblasti spolupráce (operačního prostoru sdíleného mezi člověkem a robotem). V této oblasti může pracovat buď člověk, nebo robot, současně však ne. Robot se nesmí pohybovat, pokud je operátor přítomen ve sdíleném prostoru. Pohyb robotického systému lze obnovit až poté, co operátor opustí pracovní prostor pro spolupráci. Pokud se v pracovním prostoru nevyskytuje pracovník, robot může pracovat nekooperativně (při plné rychlosti). Tento prostor je zvýrazněn v obrázku 9. [33] [36] [40]

Ve srovnání s tradičními funkcemi bezpečnostního zastavení, využívaném u nespolupracujících těžkých robotů, vyžaduje SMS další funkci „přidržení zastavení“. Jedná se o bezpečnostní monitorované zastavení, které ponechá energii k dispozici akčním členům stroje po ukončení pohybu. Když tedy člověk vstoupí do oblasti spolupráce, robot podstoupí režim „bezpečného zastavení“ a jeho pohyb je pozastaven prostřednictvím vyhrazeného softwaru. Současně zůstává automatický cyklus robota aktivní a program pokračuje od bodu přerušení poté, co pracovník opustil oblast spolupráce. [33] [36] [40]

Typickými aplikacemi cobotů ve výrobě je sbírání a umísťování, kontrola, montážní procesy s asistencí člověka nebo umísťování těžkých předmětů. SMS potřebuje tři funkční moduly. Jedná se o snímací systém pro člověka, snímací systém pro robota a monitorovací systém k vyhodnocení bezpečnosti vzájemné interakce. [33] [36] [40]

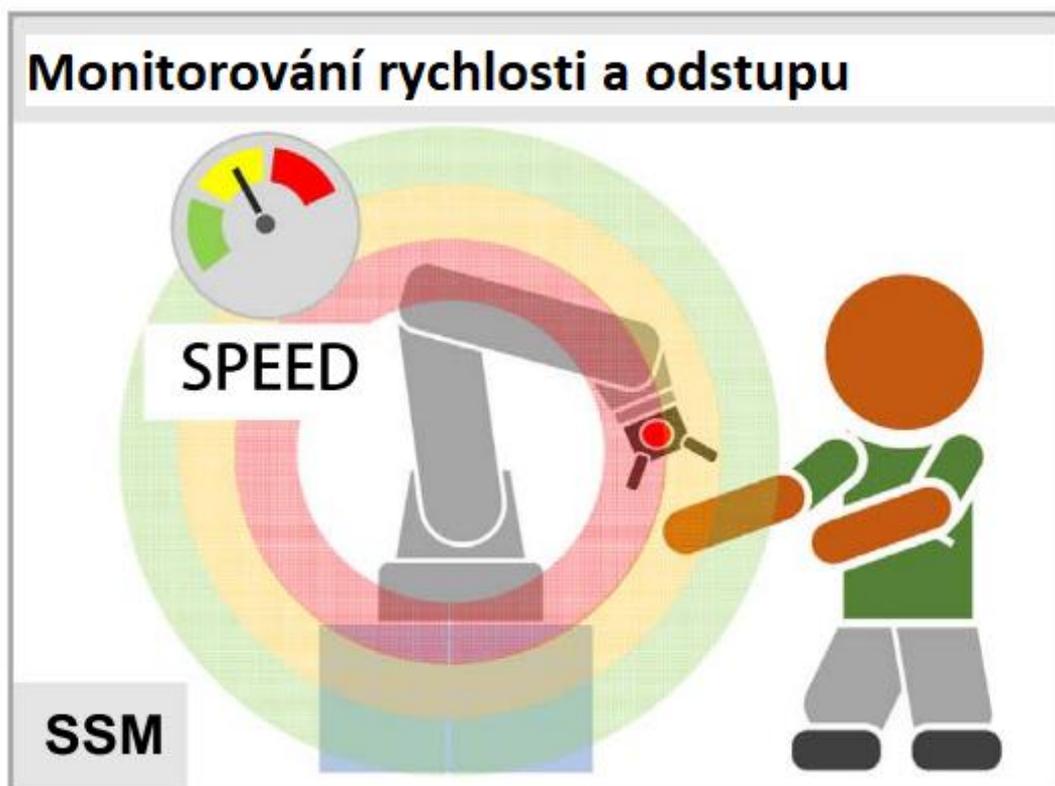


Obr. 9: Bezpečnostní monitorované zastavení [36]

2.3.2 Monitorování rychlosti a odstupu (SSM)

V případě monitorování rychlosti a odstupu (SSM) je možná přítomnost člověka v prostoru robota díky bezpečnostním monitorovacím senzorům, které monitorují okolí robota. Robot pracuje při plné rychlosti, když je člověk v zelené zóně, při snížené rychlosti, když je člověk ve žluté zóně, a zastaví se, když se člověk dostane do rudé zóny. Zmíněné oblasti jsou vyznačeny na obrázku 10. Tyto oblasti jsou kontrolovány skenery nebo kamerovým systémem. V oblastech mimo dosah manipulátoru, kde je nízká pravděpodobnost, že se operátor dostane do kontaktu s robotem, ale může být ohrožen upuštěným manipulovaným předmětem, je robot zpomalen na bezpečnou rychlost. Dojde-li k narušení pracovního prostoru robota, robot se zastaví. Pokud jsou tyto dvě oblasti prázdné, může robot pracovat při maximálních parametrech. [33] [36] [40]

Ochranné separační vzdálenosti a maximální povolené rychlosti mohou být buď proměnné, nebo konstantní. V případě proměnných hodnot lze separační vzdálenosti a rychlosti plynule upravovat v závislosti na vzdálenosti robota a operátora. U konstantních jsou tyto hodnoty určeny na základě posuzování rizika jako nejhorší možné případy. [33] [36] [40]



Obr. 10: Monitorování rychlostí a odstupu [36]

2.3.3 Omezení výkonu a síly (PFL)

Tento přístup ke spolupráci předepisuje omezení síly a výkonu motoru, aby operátor mohl bezpečně pracovat společně s robotem. Implementuje se omezení hnacích sil kloubů, s čímž musí být počítáno již ve fázi návrhu robota. Meze síly a výkonu pro bezpečnou spolupráci jsou uvedeny v ISO/TS 15066. Technická specifikace dále poskytuje informace o přípustných biomechanických zatíženích v případě, že by došlo k vzájemné kolizi. V tomto případě spolupráce může dojít ke kontaktu úmyslném nebo neúmyslném, risk je posuzován podle předem stanovených hodnot. Pokud je detekován neúmyslný kontakt, aktivují se motorové brzdy robota, aby se omezila kontaktní síla. [33] [36] [40]



Obr. 11: Omezení výkonu a síly [36]

2.3.4 Ruční vedení (HG)

V tomto způsobu provozu používá operátor k přenosu příkazů do robotického systému ručně naváděné zařízení. Obsluha se dostane do přímého kontaktu se strojem pomocí naváděcího zařízení. Jedná se o scénář spolupráce, který vyžaduje roboty vybavené funkcemi SMS. Úkol se provádí ručním ovládáním vodicích zařízení umístěných na robotu nebo v jeho blízkosti (graficky znázorněno na obrázku 12). Operátor vstoupí do společného prostoru spolupráce, robot aktivuje bezpečně monitorované zastavení. Poté může operátor uchopit naváděcí zařízení (obrázek 13) a provést úkol, který vyžaduje ruční vedení. Když operátor uvolní ruční naváděcí zařízení a opustí oblast spolupráce, robot obnoví dříve přerušovaný program a pokračuje ve svém úkolu při maximálních parametrech. [33] [36] [40]

Robotické systémy, které využívají způsob ručního vedení, mohou být vybaveny dalšími funkcemi jako například aplikace virtuálních bezpečnostních zón nebo sledovacích technologií. [33] [36] [40]



Obr. 12: Ruční vedení [36]



Obr. 13: Naváděcí zařízení na FANUC robotu [41]

2.4 Zabezpečení industriálních robotů

Aby byly zvýrazněny rozdíly mezi kolaborativními a nekolaborativními roboty, je nutné stručně shrnout i zabezpečení nekolaborativních robotů. Tyto roboti spadají pod stejné normy jako coboti, s výjimkou technické specifikace ISO/TS 15066. Jako nejpodstatnější je opět minimalizování možných zranění pracovníků.

Musí být tedy omezen volný přístup pracovníku do prostoru s robotem. Toho se dosáhne bariérou – uzavřením robota do klece (znázorněno na obrázku 14). Dále jsou použita bezpečnostní zařízení, které reagují na přiblížení pracovníka k robotu a bezpečně ho vypnou. Jedná se o pohybové senzory nebo bezpečnostní nášlapné rohože. Je také možné umožnit pracovníkům přístup, pouze když je celý systém v bezpečném stavu. [42]



Obr. 14: Robot uzavřený v kleci [43]

Další riziko může vzniknout například uvolněním jednotlivých částí a jejich vymrštěním. To by měl brát v potaz už samotný návrh robota. V případě, že k vymrštění dojde, měla by být implementováno dostatečné bezpečnostní opatření, jako například bezpečnostní kryt. [42]

2.5 Posuzování rizika při kolaboraci

Jeden z problémů, který vyplývá z přítomnosti lidí v pracovním prostoru robota, je jejich bezpečnost. Zajištění bezpečné interakce mezi lidským a robotickým protějškem by mělo být hlavním předpokladem jakékoli společné spolupráce. Posuzování rizika je stejné jako u klasických průmyslových robotů, zároveň musí být zohledněna technická specifikace ISO/TS 15066. Je také nutné posuzovat úmyslné a neúmyslné kontakty robota s obsluhou, určit o jaký typ kontaktu se jedná (přechodný, kvazi-stacionární) a stanovit část těla, kde může dojít ke kontaktu a jejich četnost. V první řadě je potřeba zabránit kontaktu robota s částmi těla výše, než je krk, jinak je nutné používat ochrannou helmu a štít chránící oči a obličej. Konstrukce robota, včetně nástroje, musí zajistit, že při pohybu robota nemůže dojít ke skřípnutí části těla mezi pohybující se částmi. Uspořádání pracoviště musí být zajištěno tak, že nemůže dojít ke skřípnutí mezi robotem a částmi pracoviště nebo stěnou. [38] [44]

Jak již bylo zmíněno, je nutné definovat typy kontaktu, které mohou vzniknout při spolupráci. Ty se podle délky jejich trvání dělí na kvazi-stacionární a přechodné. Kvazi-stacionární kontakt může být definován jako kontakt mezi operátorem a částí robotického systému, kde je část těla operátora upnuta mezi pohyblivou část robotického systému a další pevnou nebo pohyblivou část robotické buňky dlouhodobě. Přechodný kontakt znamená kontakt mezi operátorem a částí robotického systému, kde část těla operátora není upnuta a může být odejmuta z pohyblivé části robotického systému. Limity sil těchto kontaktů jsou definovány v technické specifikaci ISO/TS 15066. [45]

Spolupráce mezi obsluhou a robotem ve sdíleném pracovním prostředí může přinášet určitá rizika, jako poškození robota a zranění obsluhy. Tyto rizika jsou uvedena v tabulce níže. [38] [44]

Tab. 4: Seznam potencionálních nebezpečí během kolaborace [38]

Typ rizika	Popis
<i>Nebezpečí ohrožení robotem</i>	<i>Zvláštní pozornost je věnována:</i>
	Vzdálenosti mezi pracovníkem a robotem ve společném pracovním prostoru
	Trajektorií robota a překážkám v dráze robota
	Rychlosti pohybu pracovníka a pomalé reakci robota
	Fyzickému a psychickému stavu pracovníka
<i>Nebezpečí z průmyslového procesu</i>	<i>Zvláštní pozornost je věnována:</i>
	Době trvání procesu a přechodu z jedné akce na další
	Nedostatku ergonomických řešení pro provozní činnosti a údržbu
	Složitosti úkolu v pracovním prostoru spolupráce
	Vlivu operátora
<i>Nebezpečí ohrožení v důsledku poruchy řídicího systému robota</i>	<i>Zvláštní pozornost je věnována:</i>
	Chybě operátora během provozu robota a v době dokončení provozních akcí
	Přítomnosti překážek pro fungování senzorů robota
	Poruše na úrovni řízení a dopadu na řídicí systém zvenčí (kybernetický útok)

Nebezpečí úkolu závisí na specifikaci úkolu, na způsobu, jakým bude robot aplikován, a úrovni vzájemné interakce. Posouzení rizika, které může při spolupráci vzniknout, by mělo být připravené odborníky. Posouzení by mělo zahrnovat informace týkající se stanovených úrovní interakce, typu a charakteru robota, provozního vybavení a velikosti a typu pracoviště. Pro bezpečnou a efektivní spolupráci by dále měli být roboti vybaveni integrovanými programy a dalšími aplikacemi, které jim umožní analyzovat a porozumět lidským záměrům při spolupráci. [38] [44]

Prominentní příklady těchto bezpečnostních strategií jsou detekce kolizí a techniky plánování reaktivního pohybu, aby se zabránilo vzájemným fyzickým kontaktům. Tyto bezpečnostní strategie se dělí na „před kolizí“ a „po kolizi“. Strategie „před kolizí“ znamenají detekci nebezpečí před srážkou během spolupráce monitorováním člověka a robota. Strategie „po kolizi“ znamenají rychlou detekci kolize a minimalizaci zranění člověka a poškození robota. [38][46] [47]

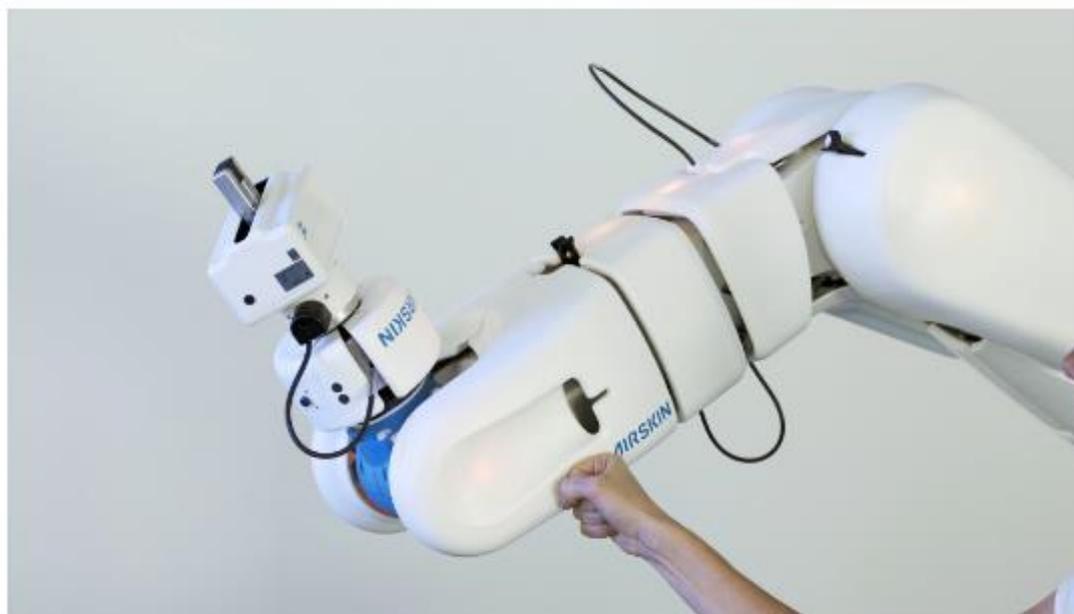
2.5.1 Bezpečnostní strategie „před kolizí“

Přestože je velmi důležité minimalizovat zranění v případě srážky, je také prvně podstatné zabránit srážce mezi člověkem a robotem. Dalším klíčovým prvkem HRC je proto zvýšení bezpečnosti prostřednictvím implementace systémů pro předcházení kolizím. Důsledkem tohoto kroku bylo vyvinutí několika metod pro odhad vzdálenosti od robota k objektu a pro generování alternativních trajektorií nebo změny rychlosti před kolizí. Jedná se například o senzory monitorující prostory okolo robota, přičemž byla robotická ramena opatřena senzory, které byly schopny získávat lokální informace. Systémy umělého vidění, kamery nebo laserové skenery byly také implementovány ke zlepšení HRC bezpečnosti. [48]

2.5.2 Bezpečnostní strategie „po kolizi“

Tyto strategie se soustředí především na minimalizaci zranění pracovníků a snížení energie kolize. Jedná se především o „robotické kůže“, absorpční systémy a odlehčené robotické konstrukce. Systémy mohou být kombinovány mezi sebou, nebo se systémy a strategiemi, které řeší prevenci kolize. [48]

Pokrytí robotů měkkým viskoelastickým potahem („robotická kůže“) je jedním z nezákladnějších stupňů ochrany. Tyto potahy jsou schopny detekovat možnou kolizi při HRC a podle toho zareagovat. Když detekují změny tlaku (povrch je deformován v důsledku kontaktu), aktivuje se funkce bezpečnostního monitorovaného zastavení. Jedním z prominentních komerčně dostupných výrobků tohoto typu je AirSkin, zobrazen na obrázku 15. [48][49]



Obr. 15: AirSkin na robotu [50]

V případě implementace AirSkin je robot vybaven dvoukanálovými tlakovými senzory uvnitř trupu potahu, které detekují změny tlaku kdekoli na povrchu desičky, kterou lze vidět na obrázku 16. Každá podložka monitoruje správnou činnost udržováním vnitřního přetlaku 400 pascalů pomocí integrovaného piezoelektrického mikročerpadla. Všechny podložky jsou zapojeny do série a navzájem sledují svoji vzájemnou přítomnost každé 4 milisekundy. [50]



Obr. 16: AirSkin s vnitřním pohledem [50]

Další z možných bezpečnostních strategií je použití pohony s proměnnou impedancí. Ve standardních průmyslových robotech jsou používány „tuhé“ pohony s velkou impedancí. Tuhý pohon je zařízení schopné pohybovat se do konkrétních poloh a sledovat předem určenou trajektorii. Jakmile je dosaženo cílové polohy, bude pohon držet tuto polohu bez ohledu na vnější síly. To je vhodné pro rychlou, přesnou a stabilní výrobu a pro přesné řízení polohy robota. Vysoká tuhost však není z bezpečnostního hlediska žádoucí, protože při kolizích přináší několik nevýhod. Jedná se například o absenci poddajnosti, zpětný náraz, zvyšování setrvačnosti odrazu atd. Naproti tomu se pohony s proměnnou tuhostí odchyľují od nastavené rovnovážné polohy v závislosti na vnějších silách a mechanických vlastnostech pohonu (setrvačnost, tuhost a tlumicí faktory). [48][51]

3 Příklady robotů v průmyslu a jejich zabezpečení

Přední výrobci v robotice, jako Universal Robots, FANUC, ABB, Omron a KUKA nabízejí své modely a různé bezpečnostní řešení k nim implementované. Jejich souhrn je popsán v níže zmíněných kapitolách.

Dále jsou uvedeny určité technické parametry cobotů. Jedná se o dosah-kam robotické rameno maximálně dosáhne, užitečné zatížení – kolik cobot maximálně uzvedne a jejich váha. Další z podstatných parametrů je opakovatelnost, nebo také přesnost. Jedná se o údaj, který popisuje, s jakou přesností je cobot schopen „dojet“ do stejného místa opakovaně.

Přestože se nabízí porovnávat maximální možnou rychlost, jedná se o parametr získaný měřením lineárního pohybu kloubů, a tak nepředstavuje věrohodně skutečnou rychlost, které se bude dosahovat při běžném provozu. Věrohodnější je tedy používat hodnotu maximální osové rychlosti jednotlivých kloubů. Ty ale někteří výrobci neuvádějí. Je také nutné podotknout, že maximálních hodnot bude cobot dosahovat málokdy, neboť bude omezen hodnotami danými posouzením rizika.

3.1 Universal Robots – série UR

Série UR se dělí podle užitečného zatížení na roboty zátěže 3 kg, 5 kg, 10 kg a 16 kg. Jedná se o lehká šestiosá robotická ramena, určená pro různorodé škály aplikací. Zobrazena jsou na obrázku 17 a jejich parametry jsou vypsány v tabulce 6. Roboti obsahují několik bezpečnostních funkcí, které slouží k omezení pohybu kloubů a středového bodu koncového nástroje. Tyto funkce jsou vypsány v tabulce 5. [52]

Tab. 5: Bezpečnostní funkce UR robota. [53]

Bezpečnostní funkce	Popis
<i>Poloha kloubu</i>	Nastavení horní a dolní meze dovolených poloh kloubů. Každý kloub může mít vlastní mez.
<i>Rychlost pohybu kloubů</i>	Nastavení horního a dolního limitu povolené rychlosti pohybu kloubů. Každý kloub může mít vlastní limit.
<i>Poloha nástroje</i>	Monitorování polohy a orientace nástroje. V případě porušení bezpečnostní roviny nebo limitu bude zahájeno bezpečnostní zastavení.
<i>Rychlost nástroje</i>	Monitoruje rychlost nástroje a lokte. V případě překročení limitu bude zahájeno bezpečnostní zastavení.
<i>Síla nástroje</i>	Funkce neustále vypočítává točivé momenty povolené v každém spoji, aby zůstaly v bezpečné mezi sil pro nástroj i loket.
<i>Hybnost</i>	Nastavení a kontrola maximální hybnosti ramene. V případě překročení bude zahájeno bezpečnostní zastavení.
<i>Výkon</i>	Funkce monitoruje mechanickou práci vykonanou robotem, což ovlivňuje proud v robotickém rameni a jeho rychlost.

Série UR má možnost nastavení bezpečnostní roviny, které omezují polohu robota. Bezpečnostní roviny omezují buď koncový nástroj nebo koncový nástroj a loket. Nedovolí, aby pohyb kloubů překročil jakýkoliv z nastavených limitů (rychlost, poloha kloubů). V případě překročení limitu bude zahájeno ochranné zastavení. Dále mají omezenou maximální rychlost a sílu. Všechny UR modely jsou vybaveny bezpečnostním monitorovaným zastavením, monitorováním rychlosti a odstupem a omezením výkonu a síly. Roboti jsou dále samozřejmě vybaveni tlačítkem nouzového zastavení, které okamžitě zastaví pohyb a odpojí napájení. Toto tlačítko se ale používá pouze v případě nouze. [52]



Obr. 17: UR3e, UR5e, UR10e, UR16e [54]

Tab. 6: Parametry cobotů UR [52]

	UR3e	UR5e	UR10e	UR16e
Dosah [mm]	500	850	1300	900
Užitečné zatížení [kg]	3	5	10	16
Váha [kg]	11,2	20,6	33,5	33,1
Opakovatelnost [mm]	0,03	0,03	0,05	0,05
Max. rychlost [mm/s]	1000	1000	1000	1000
Pohyb os – Nejvyšší rychlost [°/s]				
Podstavec	180	180	120	120
Rameno	180	180	120	120
Loket	180	180	180	180
Zápěstí 1	360	180	180	180
Zápěstí 2	360	180	180	180
Zápěstí 3	360	180	180	180

3.2 FANUC-série CR

Série CR od firmy FANUC je dělena podle užitečného zatížení na roboty zátěže 4 kg, 7 kg, 14 kg, 15 kg a 35 kg. Jedná se o kolaborativní roboty s největším možným zatížením a největším možným dosahem na trhu. Jsou zobrazeny na obrázku 18, seřazeny od nejnižšího zatížení po nejvyšší. [41]

Roboti jsou vybaveni bezpečnostním zastavením v případě kontaktu, monitorovaného pomocí senzorů. Kromě zastavení při kontaktu přichází řada CR s funkcí odtlačení a ochranou proti sevření pro zvýšené zabezpečení. Největší z modelů (CR-35iA) je zabalen do pasivního měkkého krytu. Všechny modely používají způsob programování pomocí ručního vedení. [41]

Řada může být případně dovybavena jakoukoli inteligentní funkcí vyrobenou společností FANUC. Mezi tyto funkce patří FANUC iRVision, 3D vidění s FANUC 3D Vision Sensorem a FANUC Force Sensors. [41]



Obr. 18: CR-4iA, CR-7iA, CR7iA/L, CR-14iA/L, CR-15iA, CR-35iA [41]

Tab. 7: Parametry série CR [41]

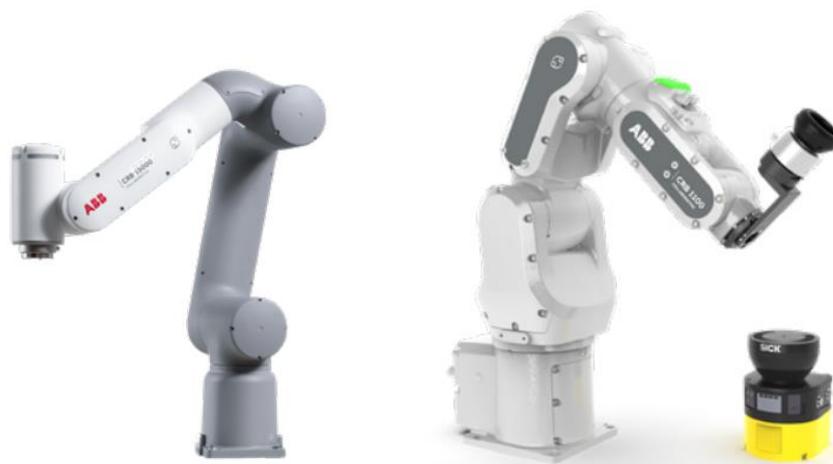
	CR-4iA	CR-7iA	CR-7iA/L	CR-14iA/L	CR-15iA	CR-35iA
Dosah [mm]	550	717	911	911	1441	1813
Užitečné zatížení [kg]	4	7	7	14	15	35
Váha [kg]	48	53	55	55	255	990
Opakovatelnost [mm]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
Max. rychlost [mm/s]	1000	1000	1000	500	800/1500	750

3.3 ABB GoFa a SWIFTI

GoFa má užitečné zatížení 5 kg. Je vybaven omezením výkonu a síly prostřednictvím integrovaných snímačů točivého momentu, umístěného ve všech kloubech. V případě kontaktu s člověkem je robot okamžitě zastaven. Dále je robot přizpůsoben bezpečné kolaboraci pomocí své poddajné a zakulacené konstrukci, sloužící k minimalizování upnutí či nechtěného skřípnutí. [55]

SWIFTI dokáže manipulovat s předměty vážícími až 4 kg. Robot je vybaven bezpečnostním laserovým snímačem, monitorujícím okolí robota. Pokud je pracovník detekován v blízkosti, SWIFTI zpomalí nebo zastaví, aby zajistil bezpečný přístup. Jedná se o funkci monitorování rychlosti a odstupu. [56]

Jedná se o nejnovější coboty ze všech zmíněných. SWIFTI dosahuje největší rychlosti a osově rychlosti ze všech zmíněných robotů. Oba roboti jsou zachyceni na obrázku 19.



Obr. 19: GoFa a SWIFTI od ABB [55] [56]

Tab. 8: Parametry GoFa a SWIFTI [55] [56]

	GoFa	SWIFTI
Dosah [mm]	950	475
Užitečné zatížení [kg]	5	4
Váha [kg]	27	21
Opakovatelnost [mm]	0,05	0,01
Max. rychlost [mm/s]	2200	4320
Pohyb os-Nejvyšší rychlost [°/s]		
Osa 1	125	460
Osa 2	125	380
Osa 3	140	280
Osa 4	200	560
Osa 5	200	420
Osa 6	200	750

3.4 KUKA-LBR iiwa

KUKA nabízí dva modely cobotů s užitečným zatížením 7 kg a 14 kg (obrázek 21). Jejich modely se od výše zmíněných liší počtem os, kterých mají sedm. Vynikají díky zvýšenému počtu os svojí flexibilitou. Ve všech sedmi osách má LBR integrovány společné snímače točivého momentu, které reagují na vnější síly. V případě neočekávaného kontaktu cobot okamžitě sníží svoji rychlost na bezpečnou, čímž omezí případné zranění. [57]



Obr. 21: KUKA LBR iiwa [57]

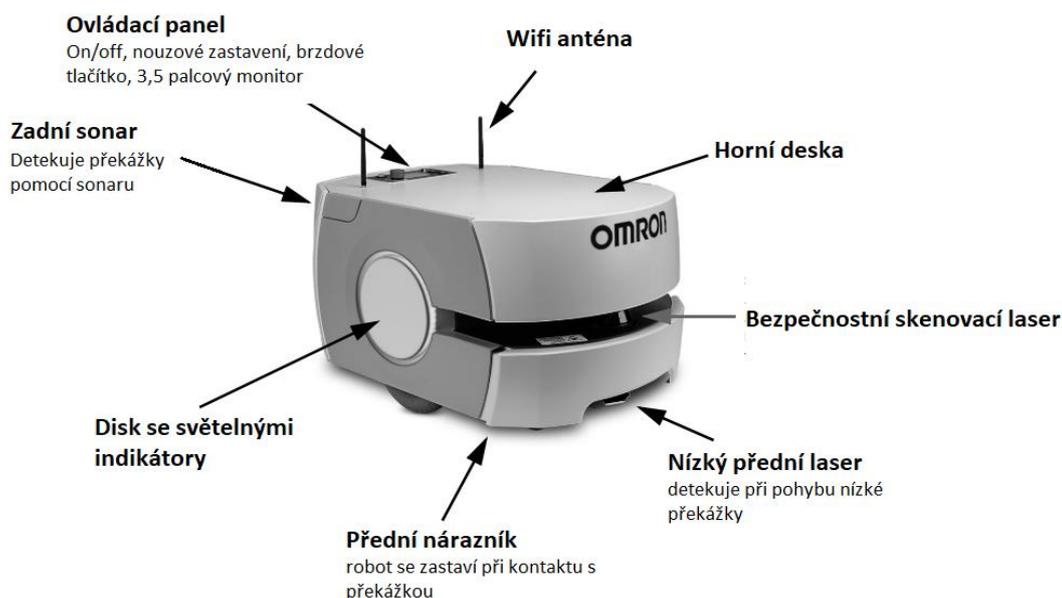
LBR Coboti umožňují programování pomocí ručního vedení a ovládání pomocí gest. Dále jsou vybaveni funkcemi detekce kolize, bezpečné snížení rychlosti a monitorování okolí cobota. Cobot je velmi lehký, jeho pouzdro je vyrobeno z hliníku a je hladké, což minimalizuje možnost zachycení či přimáčknutí. [57]

Tab. 10: parametry LBR iiwa [57]

	LBR iiwa 7 R800	LBR iiwa 14 R820
Dosah [mm]	800	820
Užitečné zatížení [kg]	7	14
Váha [kg]	23,9	29,9
Opakovatelnost [mm]	0,1	0,15
Pohyb os-Nejvyšší rychlost [°/s]		
Osa 1	98	85
Osa 2	98	85
Osa 3	100	100
Osa 4	130	75
Osa 5	140	130
Osa 6	180	135
Osa 7	180	135

3.5 Omron mobilní robot

Omron LD Mobile Robot je samonaváděcí autonomní mobilní robot určený pro přenášení materiálu v náročných prostředích, která mohou zahrnovat omezené průchody, ale i místa s pracovníky a stroji. Používá palubní lasery a další senzory k detekci překážek na své dráze a na základě rychlosti jízdy aktivuje bezpečné zastavení, aby zabránili kolizi vozidla s objekty v jeho cestě. [58]



Obr. 20: Omron LD-90

Tab. 9: parametry Omron cobotů [58]

	Maximální zatížení [kg]	Maximální rychlost [m/s]
LD-90	90	1,35
LD-250	250	1,2

4 Problémy současné kolaborativní robotiky

Hlavním problémem současné kolaborativní robotiky je nedostatek pravidel nebo vodiček, kterými se řídit. Přestože existuje technická specifikace ISO/TS 15066, je nutné podotknout, že je to pouze specifikace, která má čistě informační charakter. Na své zařazení do harmonizovaných technických norem ještě čeká. Na rozdíl od standardních průmyslových robotů, jejichž výroba, instalace a provozování jsou jasně ukotveny ve stávajících normách, si kolaborativní robotika zatím stále hledá svoji cestu. Nejvíce patrné je to právě v oblasti zmiňované bezpečnosti a posuzování rizika kolaborativních robotů a jejich implementací do průmyslu.

Zatímco metodika analýzy rizik a posuzování bezpečnosti strojních zařízení včetně standardních industriálních robotů je legislativně pevně ukotvena a v praxi a je efektivně využívána pro jejich zabezpečení, aktuálně neexistuje standardizovaný postup či metodický návod, který by bylo možno snadno aplikovat pro kolaborativní roboty. Zatímco coboti a jejich zabezpečení se dynamicky rozvíjí, normy, legislativa a její aplikace s tímto rozvojem nadržují krok.

4.1 Hodnocení kolaborativních robotů

Z hodnot a parametrů které výrobci uvádějí je možno coboty mezi sebou porovnat. Z finančního hlediska porovnávání nebudou, neboť při nákupu cobota se musí dokoupit i bezpečnostní prvky, které se liší podle aplikace.

Firma Universal Robots působí na trhu s kolaborativními roboty nejdéle, přičemž model UR5e byl poprvé prezentován roku 2008. Jejich přesnost se pohybuje okolo 0,03 mm, modely s větším užitečným zatížením ji mají okolo 0,05 mm. Coboti nejsou zbytečně těžcí a jejich zabezpečení se jeví vhodné pro HRC. Série má dostatečnou variabilitu v oblasti užitečného zatížení. [33]

FANUC série má největší variabilitu v oblasti užitečného zatížení. Jejich přesnost je velmi dobrá i pro modely s největším možným zatížením, pohybující se okolo 0,03 mm. Za nevýhodu by se dala považovat jejich váha, která by v případě kolize mohla způsobit

značné škody. Jeví se jako ideální možnost pro nepřímou kolaboraci, kdy operátor spolupracuje s cobotem zřídka.

ABB GoFa a SWIFTI jsou nejmladší ze všech zmíněných cobotů, na trh byli uvedeni roku 2021. Jedná se o modely s největší osovou rychlostí k danému užitečnému zatížení s dostatečnou přesností (GoFa 0,05 mm, SWIFTI 0,01 mm). [59]

Cobot od firmy KUKA, přestože vyniká počtem os a svojí flexibilitou, zaostává značně z hlediska přesnosti s hodnotami 0,1 a 0,15 mm. Z hlediska bezpečnosti se ale jeví jako ideální pro přímou kolaboraci s člověkem. Je nutné ale podotknout, že byl cobot poprvé prezentován v roce 2013, tudíž by se dal považovat za zastaralý vůči ostatním zmíněným. [60]

4.2 Hodnocení bezpečnosti kolaborativních robotů

V současné době by se dalo říci, že kolaborace mezi člověkem a robotem je možná a je bezpečná, díky výše zmíněným aplikacím. Každá z možných kolaborativních operací se hodí do jiných podmínek, proto se lehce nedá rozhodnout, jaká je výhodnější.

Bezpečnostní monitorované zastavení by se dalo použít s kombinací ručního vedení. Dá se tímto způsobem naprogramovat dráha a pohyby cobota. Po opuštění prostoru by se cobot znovu spustil při maximálních parametrech. Dále by se bezpečnostní monitorované zastavení dalo použít v případě, kdy by pracovník pravidelně kontroloval cobotovu práci. V tomto případě by byl cobot umístěn za klecí nebo by bylo monitorováno jeho okolí pomocí senzorů, aby mohl detekovat přítomnost operátora. Samozřejmě by zde záleželo na typu úkolu a posouzení rizika. V případě použití klece by se žádné místo použitím cobota nešetřilo. Výhoda je jednoduchost programování a pohodlnost interakce. [61]

Monitorování rychlosti a odstupu může být využito v případě, kdy by cobot něco pracovníkovi podával. Výhoda je, že je přesně definováno, kde a jakým způsobem bude kolaborace probíhat. Cobot by byl ale uzavřen za klecí/oknem, neboť bez přítomnosti operátora v blízkosti by pracoval při maximálních parametrech. Když by se přibližoval k předem definované oblasti kolaborace, zpomalil by a bezpečnou rychlost. Interakce by probíhala například pouze skrze malé okénko. [61]

Nejvíce elegantním a prostorově nejúspěšnějším je definitivně kolaborace PFL. Při této kolaboraci se počítá s kontaktem mezi cobotem a pracovníkem. Cobot nemusí být uzavřen v kleci a ani nemusí monitorovat skenery své okolí. Je ale nejvíce náročný na odhad síly a potřebného zatížení robota, jeho potencionální riziko musí být pečlivě zváženo. Na špatném vyhodnocení odhadů sil může ztroskotat celá integrace robota. Měl by být také pokryt viskoelastickým krytem, aby v případě kolize byly škody co nejnižší.

Přestože se kolaborativní robotika chlubí možným odstraněním klecí okolo robotů a jejich možnou spoluprací s člověkem, dvě z výše zmíněných robotických případů integrace jsou uzavřeny za kryty v klecích.

4.3 Výběr vhodného zabezpečení

Volbu vhodného zabezpečení a výběr cobota vždy určuje jeho aplikace. Kde bude použit? S kým bude interagovat? Jak často? Je nutné zjistit, jak rychlé manipulátory jsou potřeba, aby nedošlo k peněžní ztrátě a cobot měl dostatečnou návratnost. Následně musí být provedeno posuzování rizika podle platných norem, na jejichž základě se určí požadovaná úroveň zabezpečení a soubor doplňků potřebných k eliminaci případného rizika. Podle analýzy rizik se tedy určí způsob zabezpečení cobota a jeho pracoviště.

Je také nutné zohlednit balancování rychlosti a ceny – pokud je požadována vysoká návratnost investice do zařízení, je potřeba najít kombinaci ekonomicky nejvýhodnějšího a zároveň dostatečně rychlého robota s odpovídající úrovní přesnosti (opakovatelnosti). Z tohoto je zřejmé, že cena zabezpečení robotické aplikace může hrát značnou roli v celkových nákladech.

5 Závěr

V práci byl shrnut a definován Průmysl 4.0, s klíčovými prvky jako IoT, big data, kyberfyzikální systémy a cloudová výroba. Dále byla lehce zmíněna historie předcházejících průmyslových revolucí se zvýrazněním vynálezů, které je buď definují, nebo hrály podstatnou roli v jejich spuštění. Jedná se o první průmyslovou revoluci, za jejíž klíčový vynález je považován parní stroj a létající člunek. Druhá průmyslová revoluce se zaměřovala především na výrobu oceli, automobilový průmysl a elektřinu. Digitální revoluce má nespočetně podstatných vynálezů, ale za klíčový je považován tranzistor.

V druhé části práce je definován kolaborativní robot a jeho možné formy kolaborativních operací. Jedná se o bezpečnostní monitorované zastavení, monitorování rychlosti a odstupu, omezení výkonu a síly a možnost ručního vedení. Za účelem porovnání bezpečnostních prvků bylo také stručně zmíněno zabezpečení standardních industriálních robotů. Značná pozornost je také věnována normám a technické specifikaci ISO/TS15066, která poskytuje informace a doporučení pro návrh kolaborativních systémů. Dále práce zkoumá, jak lze posuzovat bezpečnostní rizika a jaká možná zranění nebo poškození (jak člověka, tak robotického systému) mohou vzniknout. Metody zabezpečení rozdělené na „před kolizí“ a „po kolizi“ mají tato rizika zmírňovat.

Následně jsou zmíněni vybraní představitelé předních výrobců v robotice, jako Universal Robots, FANUC, ABB, Omron a KUKA. Jsou zde zvýrazněny jejich kolaborativní série a zabezpečení které firmy používají. Dále jsou uvedeny podstatné parametry, jako například dosah robotického ramene, užitečné zatížení, přesnost a osová rychlost ramene.

Poslední kapitola se věnuje hodnocení výše zmíněných metod a problémů současné kolaborativní robotiky. Mezi nejpodstatnější patří absence norem a pravidel, podle kterých by měli být roboti integrováni. Také jsou zhodnoceni a porovnání coboti firem Universal Robots, FANUC, ABB, KUKA a Omron.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] „Long-Term Governance for Social-Ecological Change - Knihy Google".
https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=BfiAAAAAQBBAJ&oi=fnd&pg=PA47&dq=third+industrial+revolution&ots=6Z9IdUyJhT&sig=-b3p-AapKgKF1kucQL1fPyM9gPQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (viděno dub. 03, 2021).
- [2] „First Industrial Revolution vs. Second Industrial Revolution - History Crunch - History Articles, Summaries, Biographies, Resources and More".
<https://www.historycrunch.com/first-industrial-revolution-vs-second-industrial-revolution.html#/> (viděno bř. 19, 2021).
- [3] „First Industrial Revolution | What it was, history, stages, causes, consequences".
<https://www.euston96.com/en/first-industrial-revolution/> (viděno bř. 19, 2021).
- [4] P. O'Brien, „The precocious mechanization of a global industry: English cotton textile production from the Flying Shuttle (1733) to the self-acting mule (1825): a bibliographical survey and critique", roč. 44, č. March, s. 0–33, 2019, [Online].
Dostupné z: <http://eprints.lse.ac.uk/100321/>.
- [5] J. Styles, „The Rise and Fall of the Spinning Jenny: Domestic Mechanisation in Eighteenth-Century Cotton Spinning", *Text. Hist.*, roč. 51, č. 2, s. 195–236, 2020, doi: 10.1080/00404969.2020.1812472.
- [6] J. Wisniak, „James Watt. The steam engine", *Educ. Química*, roč. 18, č. 4, s. 323, 2018, doi: 10.22201/fq.18708404e.2007.4.65879.
- [7] „James Watt and the separate condenser - Science Museum Blog".
<https://blog.sciencemuseum.org.uk/james-watt-and-the-separate-condenser/> (viděno dub. 02, 2021).
- [8] „The Steam Locomotive: An Engineering History - Ken Gibbs - Knihy Google".
https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=D0GIAwAAQBBAJ&oi=fnd&pg=PT7&dq=steam+locomotive+history&ots=B-IRgxPb2L&sig=SuwuBARB-spIV4F8G1Fpcpstzcs&redir_esc=y#v=onepage&q=steam+locomotive+history&f=false (viděno dub. 02, 2021).
- [9] „Clermont | steamboat | Britannica". <https://www.britannica.com/topic/Clermont-steamboat> (viděno dub. 02, 2021).
- [10] „Industrial Revolution | Definition, History, Dates, Summary, & Facts | Britannica".

- <https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution> (viděno bř. 19, 2021).
- [11] „The Bessemer Steel Process". <https://www.thoughtco.com/bessemer-steel-process-definition-1773300> (viděno kvě. 08, 2021).
- [12] J. Mokyr a R. H. Strotz, „The Second Industrial Revolution , 1870-1914", 2000.
- [13] „Second Industrial Revolution | Education.com".
<https://web.archive.org/web/20131022224325/http://www.education.com/study-help/article/us-history-glided-age-technological-revolution/> (viděno bř. 19, 2021).
- [14] „What is the Digital Revolution? - Definition from Techopedia".
<https://www.techopedia.com/definition/23371/digital-revolution> (viděno bř. 21, 2021).
- [15] „History of the Web – World Wide Web Foundation".
<https://webfoundation.org/about/vision/history-of-the-web/> (viděno kvě. 09, 2021).
- [16] W. F. Brinkman, D. E. Haggan, a W. W. Troutman, „A history of the invention of the transistor and where it will lead us", *IEEE J. Solid-State Circuits*, roč. 32, č. 12, s. 1858–1864, 1997, doi: 10.1109/4.643644.
- [17] R. Debjani, V. Bharati, W. Santiniketan, a I. Bengal, „Cinema in the Age of Digital Revolution", *Int. J. Interdiscip. Multidiscip. Stud.*, roč. 1, č. 4, s. 107–111, 2014, [Online]. Dostupné z: <http://www.ijims.com>.
- [18] „The Digital and Electronics Revolution Timeline memories from The People History Site". <http://www.thepeoplehistory.com/electronics.html> (viděno bř. 20, 2021).
- [19] G. Culot, G. Nassimbeni, G. Orzes, a M. Sartor, „Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions", *Int. J. Prod. Econ.*, roč. 226, č. October 2019, s. 107617, 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107617.
- [20] L. Da Xu, E. L. Xu, a L. Li, „Industry 4.0: State of the art and future trends", *Int. J. Prod. Res.*, roč. 56, č. 8, s. 2941–2962, 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [21] P. Národní, F. A. A. Přistupy, J. Krejčí, a M. Ambler, „Industry 4.0: National, corporate and academic approaches", *Současná Evr.*, roč. 2017, č. 2, s. 46–62, 2017, [Online]. Dostupné z: https://sev.vse.cz/artkey/sev-201702-0003_prumysl-4-0-narodni-firemni-a-akademicke-pristupy.php.
- [22] P. Kowalikova, P. Polak, a R. Rakowski, „The Challenges of Defining the Term “Industry 4.0”", *Society*, roč. 57, č. 6, s. 631–636, 2020, doi: 10.1007/s12115-020-00555-7.
- [23] F. Chiarello, L. Trivelli, A. Bonaccorsi, a G. Fantoni, „Extracting and mapping

- industry 4.0 technologies using wikipedia", *Comput. Ind.*, roč. 100, č. April, s. 244–257, 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.04.006.
- [24] R. Khan, S. U. Khan, R. Zaheer, a S. Khan, „Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges", *Proc. - 10th Int. Conf. Front. Inf. Technol. FIT 2012*, s. 257–260, 2012, doi: 10.1109/FIT.2012.53.
- [25] „Internet věcí – Wikipedie". https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_věcí#cite_note-3 (viděno bř. 21, 2021).
- [26] D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. J. P. C. Rodrigues, A. B. Lugli, a A. M. Alberti, „Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review", *J. Manuf. Syst.*, roč. 58, č. PA, s. 176–192, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.11.017.
- [27] „What Is Big Data? | Oracle Česká Republika". <https://www.oracle.com/cz/big-data/what-is-big-data/> (viděno bř. 19, 2021).
- [28] A. Katal, M. Wazid, a R. H. Goudar, „Big data: Issues, challenges, tools and Good practices", *2013 6th Int. Conf. Contemp. Comput. IC3 2013*, s. 404–409, 2013, doi: 10.1109/IC3.2013.6612229.
- [29] „Understanding the 7 V's of Big Data – Big Data Path". <https://bigdatapath.wordpress.com/2019/11/13/understanding-the-7-vs-of-big-data/> (viděno kvě. 19, 2021).
- [30] „What is Cloud Manufacturing? - ERP Cloud Blog". <https://erpsoftwareblog.com/cloud/2016/06/what-is-cloud-manufacturing/> (viděno kvě. 09, 2021).
- [31] „SaaS vs PaaS vs IaaS: What's The Difference & How To Choose – BMC Software | Blogs". <https://www.bmc.com/blogs/saas-vs-paas-vs-iaas-whats-the-difference-and-how-to-choose/> (viděno kvě. 19, 2021).
- [32] „Co je cloud computing? Průvodce pro začátečníky | Microsoft Azure". <https://azure.microsoft.com/cs-cz/overview/what-is-cloud-computing/#cloud-computing-models> (viděno kvě. 19, 2021).
- [33] Z. M. Bi, M. Luo, Z. Miao, B. Zhang, W. J. Zhang, a L. Wang, „Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing", *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, roč. 67, č. April 2020, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102022.
- [34] „ABB's Collaborative Robot -YuMi - Collaborative Robots | ABB Robotics". <https://new.abb.com/products/robotics/collaborative-robots/irb-14000-yumi> (viděno kvě. 26, 2021).

- [35] „6-ti osé robotické rameno UR16e - AMTECH robotics". <https://www.amtech-robotics.cz/roboty/universal-robots/ur16e/> (viděno kvě. 26, 2021).
- [36] V. Villani, F. Pini, F. Leali, a C. Secchi, „Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications", *Mechatronics*, roč. 55, č. June 2017, s. 248–266, 2018, doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
- [37] A. De Luca a F. Flacco, „Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration", *Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics*, s. 288–295, 2012, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290917.
- [38] R. Galin a R. Meshcheryakov, „Review on human–robot interaction during collaboration in a shared workspace", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, roč. 11659 LNAI. s. 63–74, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
- [39] F. Ferraguti, M. Bertuletti, C. T. Landi, M. Bonfe, C. Fantuzzi, a C. Secchi, „A Control Barrier Function Approach for Maximizing Performance while Fulfilling to ISO/TS 15066 Regulations", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, roč. 5, č. 4, s. 5921–5928, 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3010494.
- [40] E. K. für Normung, „TECHNICAL SPECIFICATION ISO / TS Robots and robotic devices —", roč. 2016, 2016.
- [41] „Spolupracující roboty FANUC - Fanuc". <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/spolupracující-roboty> (viděno kvě. 20, 2021).
- [42] D. Z. and M. A. R. Guohua Cui, „Robotics Safety : An Engineering Teaching Module", *Univ. Ontario Inst. Technol.*, č. March, s. 1–4, 2014.
- [43] „wirecrafters-robot-machine-guard-protection-fencing - Carolina Safety Consultants — Safety Programs, Training, & OSHA Compliance". <https://csc-llc.net/ensure-youre-in-compliance-with-machine-guarding-laws-with-oshas-etoool/wirecrafters-robot-machine-guard-protection-fencing/> (viděno kvě. 19, 2021).
- [44] A. M. Technolo-, „Bezpečnost kolaborativních robotů", s. 74–76, 2017.
- [45] B. B. Mathieu, „ISO/TS 15066 and collaborative robot safety", *InTech*, roč. 63, č. 7–8, 2016.
- [46] Y. Chen, „Human-Robot Collaboration Analyzing the safety for human-robot collaboration in automotive industry", 2019.
- [47] W. Kim, L. Peternel, M. Lorenzini, J. Babič, a A. Ajoudani, „A Human-Robot

- Collaboration Framework for Improving Ergonomics During Dexterous Operation of Power Tools", *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, roč. 68, č. December 2019, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102084.
- [48] S. Robla-Gomez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. Gonzalez-Sarabia, C. Torre-Ferrero, a J. Perez-Oria, „Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments", *IEEE Access*, roč. 5, s. 26754–26773, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773127.
- [49] G. Pang *et al.*, „CoboSkin: Soft Robot Skin with Variable Stiffness for Safer Human-Robot Collaboration", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, roč. 68, č. 4, s. 3303–3314, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2978728.
- [50] „AIRSKIN® technology". <https://www.airskin.io/airskin> (viděno kvě. 05, 2021).
- [51] B. Vanderborght *et al.*, „Variable impedance actuators: A review", *Rob. Auton. Syst.*, roč. 61, č. 12, s. 1601–1614, 2013, doi: 10.1016/j.robot.2013.06.009.
- [52] „Collaborative robots from UR | Start your automation journey". <https://www.universal-robots.com/products/> (viděno kvě. 20, 2021).
- [53] S. Function a S. F. Descriptions, „UR e-Series Safety Functions and Safety I / O are PLd , Category 3 (ISO 13849-1), with certification by TÜV NORD (certificate # 44 207 14097610) control system , the result is a Category 0 stop (immediate removal of power) according to IEC 60204-1 .", roč. 3, č. 29, s. 1–6, 2020.
- [54] D. Kolaborativn a C. H. Robot, „UNIVERSAL".
- [55] „CRB 15000 - Collaborative Robots | ABB Robotics". <https://new.abb.com/products/robotics/collaborative-robots/crb-15000> (viděno kvě. 20, 2021).
- [56] „CRB 1100 - Collaborative Robots | ABB Robotics". <https://new.abb.com/products/robotics/collaborative-robots/crb-1100> (viděno kvě. 20, 2021).
- [57] „LBR iiwa | KUKA AG". <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/roboticke-systemy/prumyslove-roboty/lbr-iiwa> (viděno kvě. 25, 2021).
- [58] „LD-60/90 | OMRON, Česká republika". <https://industrial.omron.cz/cs/products/ld-60-90> (viděno kvě. 20, 2021).
- [59] „ABB launches next generation cobots to unlock automation for new sectors and first-time users". <https://new.abb.com/news/detail/74784/abb-launches-next-generation-cobots-to-unlock-automation-for-new-sectors-and-first-time-users> (viděno kvě. 25, 2021).

- [60] „Kuka: Premiere for the LBR iiwa | Automotive World”.
<https://www.automotiveworld.com/news-releases/kuka-premiere-for-the-lbr-iiwa/>
(viděno kvě. 25, 2021).
- [61] „5 Cobot Applications Where Safety is Critical”. <https://blog.robotiq.com/5-cobot-applications-where-safety-is-critical> (viděno kvě. 25, 2021).