

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: Průmyslové inženýrství a management
N0715A270012

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání modelu v Tecnomatix Process Simulate s reálným
robotizovaným pracovištěm

Autor: **Bc. Kateřina Pittrová**
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Broum, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina PITTOVÁ**
Osobní číslo: **S21N0029K**
Studijní program: **N0715A270012 Průmyslové inženýrství a management**
Téma práce: **Porovnání modelu v Tecnomatix Process Simulate s reálným robotizovaným pracovištěm**
Zadávací katedra: **Katedra průmyslového inženýrství a managementu**

Zásady pro vypracování

1. Robotizace v průmyslové výrobě
2. SW nástroj – Tecnomatix Process Simulate
3. SW model pracoviště
4. Experimentování a vyhodnocení dat z modelu a z reálného pracoviště
5. Vyhodnocení

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

Seznam doporučené literatury:

1. KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
2. CHLEBNÝ, Jan a kol. *Automatizace a automatizační technika: Prostředky automatizační techniky*. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-3747-5.
3. POLÁŠEK, Patrik a KURKIN, Ondřej. *Tecnomatix Process Simulate – základy robotiky*. Plzeň: SmartMotion, 2013. ISBN 978-80-87539-19-4.

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

Konzultant diplomové práce: **Ing. Filip Rybníkář**
Katedra průmyslového inženýrství a managementu

Datum zadání diplomové práce: **20. září 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

V Plzni dne 20. září 2021

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Broumovi, Ph.D. za odborné rady a pomoc při zpracovávání této práce. Také bych ráda poděkovala své rodině za jejich velkou podporu během celého mého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Pittrová	Jméno Kateřina		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270012 „Průmyslové inženýrství a management“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Broum, Ph.D.	Jméno Tomáš		
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KPV			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Porovnání modelu v Tecnomatix Process Simulate s reálným robotizovaným pracovištěm			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KPV	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	78	TEXTOVÁ ČÁST	66	GRAFICKÁ ČÁST	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	<p>Diplomová práce zpracovává téma Porovnání modelu v Tecnomatix Process Simulate s reálným robotizovaným pracovištěm. V teoretické části práce charakterizuje automatizaci, robotizaci a popisuje SW nástroj Tecnomatix Process Simulate. Praktická část využívá laboratoř Průmyslu 4.0, konkrétně její pracoviště s kolaborativním robotem. Toto pracoviště je využito v rámci experimentu, kdy je porovnán simulační model s reálným prostředím. Výsledky experimentu jsou následně zpracovány a vyhodnoceny.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	<p>Tecnomatix Process Simulate, kolaborativní robot, REFA, automatizace, robotizace, simulace</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Pittrová	Name Kateřina		
STUDY PROGRAMME	N0715A270012 „Industrial Engineering and Management“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Broum, Ph.D.	Name Tomáš		
INSTITUTION	ZČU – FST – KPV			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Comparison of model in Tecnomatix Process Simulate with a real robotic workplace			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Industrial Engineering and Management	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	78	TEXT PART	66	GRAPHICAL PART	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with the topic Comparison of the model in Tecnomatix Process Simulate with a real robotic workplace. The theoretical part of the work characterizes automation, robotics and describes the SW tool Tecnomatix Process Simulate. The practical part uses the laboratory of Industry 4.0, specifically its workplace with a collaborative robot. This workplace is used in an experiment where a simulation model is compared with a real environment. The results of the experiment are then processed and evaluated.
KEY WORDS	Tecnomatix Process Simulate, collaborative robot, REFA, automation, robotics, simulation

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam grafů	12
Přehled použitých zkratk a symbolů	13
Úvod.....	14
1 Robotizace v průmyslové výrobě	15
1.1 Základní pojmy	15
1.2 Historie automatizace.....	17
1.3 Typy automatizace	18
1.4 Průmyslové roboty	19
1.5 Kolaborativní roboty	22
1.5.1 Výrobci kolaborativních robotů.....	23
1.5.2 Parametry kolaborativních robotů	25
1.5.3 Koncové efekторы	26
1.5.4 Bezpečnost kolaborativních robotů	27
2 SW nástroj – Tecnomatix Process Simulate	28
2.1 Tecnomatix Process Simulate Robotics	31
2.2 Souřadnicové systémy a řízení pohybu.....	32
2.3 Process Simulate Human	34
3 Popis pracoviště a vlastní SW model pracoviště	35
3.1 Popis pracoviště v laboratoři Průmyslu 4.0	35
3.2 Vlastní SW model virtuálního pracoviště	42
4 Experimentování a vyhodnocení dat z modelu a z reálného pracoviště.....	49
4.1 Vlastní princip experimentu.....	49
4.2 Experimenty na virtuálním pracovišti.....	51
4.3 Experimenty na reálném pracovišti	57
4.4 Vlastní měření a vyhodnocení – simulační experimenty	63
4.5 Vlastní měření a vyhodnocení – experimenty na reálném pracovišti	65
5 Závěrečné vyhodnocení	69
Závěr.....	74
Seznam použité literatury.....	75
Přílohy	78

Seznam obrázků

Obrázek 1-1: Průmyslová revoluce [5].....	15
Obrázek 1-2: Scara robot [15]	20
Obrázek 1-3: Kartézský robot [16]	20
Obrázek 1-4: Kloubový robot [17]	20
Obrázek 1-5: Delta robot [20]	21
Obrázek 1-6: Redundantní robot [21].....	21
Obrázek 1-7: Dual – arm robot [22]	21
Obrázek 1-8: Koncové efekторы [27].....	26
Obrázek 2-1: Tecnomatix Plant Simulation [29].....	28
Obrázek 2-2: Tecnomatix Process Designer [30].....	29
Obrázek 2-3: Tecnomatix RobotExpert [30]	29
Obrázek 2-4: Tecnomatix Robcad [30]	30
Obrázek 2-5: Tecnomatix Jack [29]	30
Obrázek 2-6: Tecnomatix Process Simulate Robotics [29].....	31
Obrázek 2-7: Popis polohy [32].....	32
Obrázek 2-8: Souřadný systém [33]	32
Obrázek 2-9: Druhy pohybů [33]	33
Obrázek 2-10: Tecnomatix Process Simulate Human	34
Obrázek 3-1: Laboratoř průmyslu 4.0	35
Obrázek 3-2: Využívané puky	36
Obrázek 3-3: Ukázka prázdné paletky.....	36
Obrázek 3-4: Ukázka plné paletky	36
Obrázek 3-5: Kolaborativní robot Fanuc CR-7iA/L.....	37
Obrázek 3-6: Robotická paže	38
Obrázek 3-7: Ukázka kolaborativního robota při práci	38
Obrázek 3-8: Pohybové instrukce [27]	39
Obrázek 3-9: Ovládací panel	40
Obrázek 3-10: Ovládací pendant	40
Obrázek 3-11: Senzory	40
Obrázek 3-12: Kamera.....	41
Obrázek 3-13: AGV Weasel.....	41
Obrázek 3-14: Model virtuálního pracoviště.....	42
Obrázek 3-15: Navržený model paletky	43
Obrázek 3-16: Kinematický editor	43

Obrázek 3-17: Funkce Robot Jog	44
Obrázek 3-18: Funkce Placement Manipulator	44
Obrázek 3-19: Funkce Reach Test.....	45
Obrázek 3-20: Specifikace výrobce – kinematika kloubů robota [38].....	45
Obrázek 3-21: Znázornění kloubů a rozsahů robota, upraveno dle [38]	46
Obrázek 3-22: Funkce Joint Jog – specifikace kinematiky	46
Obrázek 3-23: Funkce Create Human	47
Obrázek 3-24: Model člověka	48
Obrázek 3-25: Ukázka virtuálního pracovníka při práci	48
Obrázek 4-1: Ukázka vyprázdnění paletky	49
Obrázek 4-2: Princip naplnění/ vyprázdnění paletky	50
Obrázek 4-3: Ukázka možných operací.....	51
Obrázek 4-4: Naplnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)	52
Obrázek 4-5: Naplnění paletky dle barev (robotické pracoviště).....	52
Obrázek 4-6: Vyprázdnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)	53
Obrázek 4-7: Vyprázdnění paletky dle barev (robotické pracoviště).....	53
Obrázek 4-8: Ukázka operátora (manuální pracoviště).....	54
Obrázek 4-9: Naplnění paletky dle pořadí (manuální pracoviště).....	55
Obrázek 4-10: Naplnění paletky dle barev (manuální pracoviště)	55
Obrázek 4-11: Vyprázdnění paletky dle pořadí (manuální pracoviště).....	56
Obrázek 4-12: Vyprázdnění paletky dle barev (manuální pracoviště).....	56
Obrázek 4-13: Pohled na reálné pracoviště	57
Obrázek 4-14: Skladba časů dle metodiky REFA [34]	59
Obrázek 4-15: Formulář časového snímku [34]	61
Obrázek 4-16: Formulář pro plynulou chronometráž [34]	62
Obrázek 4-17: Náhled Sequence Editoru	63
Obrázek 4-18: Náhled Path Editoru.....	64
Obrázek 5-1: MTM report Process Simulate – operace nakládky.....	70
Obrázek 5-2: MTM report Process Simulate – operace vykládky	71

Seznam tabulek

Tabulka 1-1: Úrovně robotické aplikace	23
Tabulka 1-2: Rozdíly mezi kolaborativními a průmyslovými roboty	23
Tabulka 1-3: Výrobci kolaborativních robotů - 1. část	24
Tabulka 1-4: Výrobci kolaborativních robotů - 2. část	25
Tabulka 4-1: Experimenty – robotické pracoviště	64
Tabulka 4-2: Experimenty – manuální pracoviště.....	64
Tabulka 4-3: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 1	66
Tabulka 4-4: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 2	66
Tabulka 4-5: Přehled měření času a míry rozptylu – manuální pracoviště (část 1)	67
Tabulka 4-6: Přehled měření času a míry rozptylu – manuální pracoviště (část 2)	67
Tabulka 4-7: Přehled měření času a míry rozptylu – robotické pracoviště	68
Tabulka 5-1: Porovnání experimentů – manuální pracoviště	69
Tabulka 5-2: Porovnání experimentů – robotické pracoviště.....	72

Seznam grafů

Graf 5-1: Porovnání experimentů – manuální pracoviště.....	69
Graf 5-2: Porovnání experimentů - robotické pracoviště	72

Přehled použitých zkratek a symbolů

SW	software
TPS	Tecnomatix Process Simulate
ϵ	míra rozptylu či přípustná chyba
t	konstantní veličina 1.96 pro studentovo rozdělení
cv = s tz	variační koeficient
s	standardní odchylka
tz (příp. tg)	průměrná doba cyklu
n	počet náměrů
Lg	výkon pracovníka
MTM	Methods Time Measurement
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung
PTP6	pohyb, který vede nástroj nejrychlejší cestou do koncového bodu
LIN	lineární pohyb
CIRC	pohyb vykonávaný po kruhové dráze
AGV	Automated Guided Vehicle

Úvod

Zavádění automatizace a robotizace do výroby se v dnešní době stává nedílnou součástí výrobních firem. Impulsem k rozvoji těchto technologií byla vize tzv. čtvrté průmyslové revoluce, jež přinesla významné technologické pokroky. Automatizace a robotizace se s nástupem nových informačních technologií stále zdokonaluje a představuje jeden z hlavních pilířů v Průmyslu 4.0. Robotizace významně ovlivňuje lidskou práci, ulehčuje od fyzické námahy a jednotvárnosti a je velkým přínosem v rizikových prostředích při ochraně lidského zdraví. S ní se také pojí nárůst produktivity, efektivity lidské práce a konkurenceschopnosti.

Cílem diplomové práce je porovnání modelu v programu Tecnomatix Process Simulate s reálným robotizovaným pracovištěm. Teoretická část se zaměřovala nejprve na charakteristiku automatizace a robotizace, jsou zde popsány základní pojmy týkající se této oblasti. Následuje popis historie automatizace, jednotlivých typů automatizace a uvedení průmyslových a kolaborativních robotů se zdůrazněním jejich rozdílů. Druhou oblastí teoretické části je vlastní popis SW nástroje Tecnomatix Process Simulate. Jsou zde uvedeny jeho jednotlivé programy s hlavním zaměřením na Process Simulate Robotics a Process Simulate Human, které jsou klíčové pro zpracování budoucích simulací.

V praktické části práce je nejprve uveden popis pracoviště laboratoře Průmyslu 4.0, které se nachází na Západočeské univerzitě v Plzni a vlastního 3D modelu, který vycházel z již zpracovaného základního modelu pracoviště a byl aktualizován a zpřesněn dle reálných podmínek a specifikace pracoviště. Na tomto modelu byly provedeny simulační experimenty v rámci robotického i manuálního pracoviště operací nakládky a vykládky. Následovalo provedení reálných experimentů na fyzickém pracovišti s využitím metodiky REFA. Tyto hodnoty jsou statisticky vyhodnocené, validované a následně porovnané. Na závěr je uvedeno výsledné vyhodnocení a jsou navržena doporučení.

1 Robotizace v průmyslové výrobě

Dnešní podniky stále více investují své finanční prostředky do automatizace a robotizace. Automatizace je v současné době významným a také základním nástrojem, který slouží ke zvýšení efektivity, produktivity, jakosti, a především konkurenční schopnosti výroby a služeb na trhu. Tyto prostředky firmám zajišťují a umožňují úspěšné začlenění do globální světové ekonomiky a světové konkurence. Automatizace také umožňuje zajištění vyšší bezpečnosti, zdraví, pohodlí a celkově dobrého klimatu na pracovišti, protože zbavuje pracovníky těžké, zdraví a životu nebezpečné nebo únavové práce. [1]

Automatizace je nadřazeným pojmem, zastřešuje z typů automatizace i robotizaci.

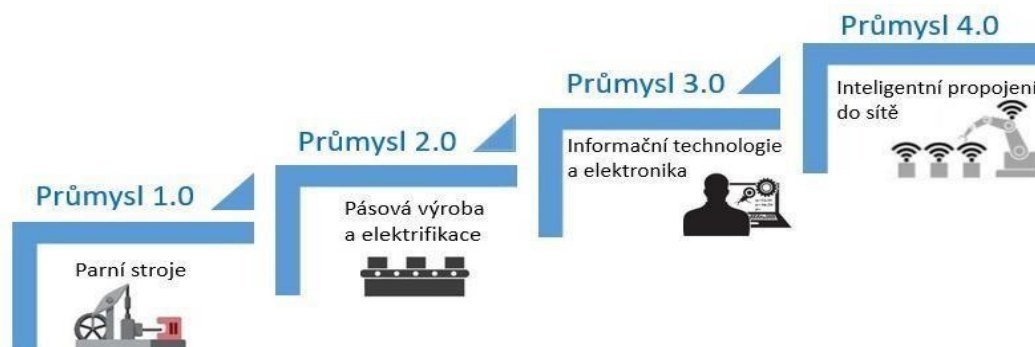
Tato kapitola vychází od seznámení se základními pojmy, přes nadřazenou automatizaci až po průmyslovou robotizaci, a to zejména kolaborativní roboty, na které bude dále zaměřena praktická část této práce.

1.1 Základní pojmy

Pro úvodní seznámení jsou níže vysvětleny následující pojmy:

Průmysl 4.0 je pojmem, který označuje automatizaci výroby a také změny na trhu práce. Průmysl 4.0 je založen na rozvoji digitalizace, automatizace a robotizace. Číslo 4.0 vyjadřuje čtvrtou průmyslovou revoluci, jež je charakterizována plným prolínáním informačních technologií s produkčními procesy inteligentním způsobem, který je charakteristický pro autonomní stroje. Z velké části je založena na internetu věcí, který přispěl k řadě změn ve výrobě a údržby v průmyslu, a to od snižování výrobních cyklů až po automatizaci údržby strojů a zařízení. Poprvé bylo označení Průmysl 4.0 použito na veletrhu v Hannoveru v roce 2011. [4]

Jak se vyvíjela průmyslová revoluce lze vidět na obrázku 1-1, který je zobrazen níže.



Obrázek 1-1: Průmyslová revoluce [5]

Mechanizace vyjadřuje proces, kdy stroje nahrazují člověka při procesu namáhavé, či stereotypně se opakující práce. [9]

Automatizace nahrazuje proces mechanizace a stává se tak jejím nástupcem. Lidská řídicí činnost je postupně nahrazována technickými zařízeními, tedy stroji a **automat** je takový stroj, jež sám dokáže vykonávat předem stanovené úkony, většinou za použití **umělé inteligence**, která je souhrnným označením pro strojové napodobení inteligentního jednání člověka. [9]

Robotizace znamená implementaci a dále využívání robotů na pracovištích. Příkladem robotizace pracoviště je například nahrazení dělníků, kteří vykonávají manuální činnosti jedním nebo několika manipulatory. Pracoviště s manipulačním robotem umožňuje vysokou přesnost cílových pozic při přesouvání výrobků z místa na místo, s možností vyhýbání se předem definovanému prostoru, a to při zachování velké rychlosti. Velkou výhodou je možnost manipulace s horkými, těžkými, či jinak nesnadno uchopitelnými předměty.

V oblasti robotizace je snahou nahrazovat dělníky roboty, a to především kvůli finančním důvodům, protože firma, i když do robota na začátku vloží investice, získá poté ve výsledku vyšší výnos, protože u robota odpadají mzdové náklady, s čímž souvisí i zdravotní a sociální pojištění, které by jinak musela zaplatit za každého pracovníka. Dalším důvodem je i výkon robota. Pokud zanedbáme nutné přestávky na údržbu a pauzy kvůli změně technologie, či přenastavení robota, je robot schopen pracovat téměř „neomezenou dobu“. Robotizace se dnes využívá jak v hromadné, tak i v kusové výrobě a manufaktury, ve kterých dochází k zhotovení a manipulaci s těžkými výrobky tuto pomoc také velmi ocení. Díky tomu, že se oblast automatizace a robotizace stále rozvíjí a její možnosti se stále rozšiřují, budou za pár let roboty představovat standardní vybavení každého podniku, jelikož problém vyšší ceny a dostupnosti již nebude zásadní. [6]

Robotika je disciplínou, jež dokáže pomoci člověku řešit jeho problémy s ulehčením práce a také se zvyšováním produktivity práce, a to za využití technických prostředků jako výsledků duševní a rozumové činnosti celých generací vynálezců, konstruktérů a techniků. Robotika jako vědecká a technická disciplína je věda o robotech, také o jejich designu, výrobě a aplikacích. Robotika velmi úzce souvisí s elektronikou, mechanikou a softwarem. [7]

Robot je relativně autonomním strojem a má schopnost provádět různé úkoly dle předem stanoveného postupu. Robot dokáže vnímat vnější okolí pomocí zabudovaných senzorů a je také schopen reagovat na určité podněty z okolí. Robot je složen z těchto částí:

- Pohybový aparát – např.: kola, nohy, pásy,
- Pohon, který zajišťuje pohyb,
- Smysly – např. schopnost vidět,
- Zdroj energie – baterie nebo dynamo,
- Vestavěný počítač, jež představuje mozek robota. [10]

Simulace – Podstatou simulace je experimentování s modely reálného systému. V prvním kroku je analyzován reálný systém, ze kterého je následně sestaven simulační model, který je zjednodušenou formou reality. Na modelech jsou dále prováděny experimenty, na základě, kterých jsou získávány výsledky. Ty pak musejí být správně interpretovány a použity na reálném systému. [12]

Robotická automatizace RPA – Robotic Process Automation – V robotické automatizaci se automatizace uplatňuje ve formě softwaru, který se implementuje na procesy, jež se zakládají na pravidlech a také se často opakují. Tyto procesy lze zařadit do oblasti sdílených služeb nebo jiných transakčních center, v nichž dochází ke komunikaci T systémů. Tento „robotický“ SW je možno nastavit tak, aby byl schopen pracovat s informacemi a aplikacemi bez nutnosti zásahu člověka. Další z možných funkcí může být schopnost reagovat na události a dále je zpracovávat. [11]

Pojem robotická automatizace je zde uveden pro komplexnost, ale vlastní práce se bude zabývat robotizací fyzických pracovníků, nikoliv výše zmíněnou softwarovou robotickou automatizací. Na základě seznámení se základními pojmy, spojenými s průmyslem 4.0 a s ním spjatou automatizací a robotizací je možné přejít na podkapitolu spojenou s historií.

1.2 Historie automatizace

Pro základní seznámení s automatizací a robotizací je zde nejprve uveden pohled do historie.

Přesto, že historie automatizace začíná v moderním slova smyslu až ve 20. století, první zmínky o její existenci můžeme najít již za dob starověku. Již 200 let př. n. l. byly v egyptské Alexandrii otevírány a zavírány velké chrámové dveře za pomoci ohně, vody a z nich vzniklé vodní páry. Ve středověku pak za vrchol řemeslnické dovednosti byl považován například hodinový stroj. Ke skutečnému sestrojení automatických strojů došlo až v roce 1801. V tomto roce byly vynalezeny doprřadací stroje, které byly plně využívány při předení. Dále budou uvedeny významné milníky z historie automatizace.

Data z historie automatizace

1914: V tomto roce došlo ke vzniku první montážní linky v automobilce Ford.

1928: Uplatnění prvních automatů v automatické montáži Smithovy továrny v Milwaukee.

1938: Matematik Claude Elwood Shannon položil základy číslicově řízených strojů.

1942: V tomto roce vznikla Zieglerova-Nicholsova metoda optimálního nastavení regulátoru.

1946: Dodávka prvního počítače EN AC americké vládě.

1949-1952: John Pardons vyvinul systém řízení polohy vřetene obráběcího stroje, ovládaný počítačem.

1956: V tomto roce byla založena pobočka FUJITSU Fanuc pro vývoj numerických NC ovladačů

1958: Vznik programovacího jazyka APT.

1974: Instalace prvního průmyslového robota v továrně FANUC.

1984: Vznik CNC systémů s grafickými programovacími prostředky.

2003: V Evropě bylo instalováno 20 tisíc robotů.

2008: Ve světě bylo instalováno 200 tisíc robotů.

2009: Prodej prvního kolaborativního robota firmou Universal Robots.

2015: Firma Fanuc instaluje po celém světě 400 tisíc robotů a firmy Yaskawa a ABB Robotics 300 tisíc robotů. [8]

1.3 Typy automatizace

Tato podkapitola je zaměřena na zastřešující pojem automatizace a její typy.

Automatizace se rozděluje na automatizaci výrobních a nevýrobních procesů, automatizaci komplexní a částečnou a také je možné rozdíly spatřit v nepružném a pružném procesu automatizace.

Rozdělení dle druhu procesu

- **Automatizace výrobních procesů**

Automatizace výrobních procesů je souhrnem všech procesů, které jsou zapojené do výroby určitých produktů. Příkladem mohou být procesy v hutním, důlním, strojírenském, potravinářském, stavebním, či automobilovém průmyslu.

- **Automatizace nevýrobních procesů**

Automatizace nevýrobních procesů obsahuje procesy zejména z oblasti služeb – ať už se jedná o služby veřejné, zdravotnictví, obranu, bezpečnost státu, vzdělání nebo o soukromé telekomunikační procesy, prostředky masových médií a jiné. [9]

Rozdělení dle komplexnosti

- **Automatizace komplexní**

U tohoto druhu automatizace je celkový mechanizovaný proces plně automatizován a člověk přebírá roli jak v plánování, tak i ve strategickém řízení.

- **Automatizace částečná**

Částečné automatizaci podléhají jen určité procesy a funkce, zatímco zbylé fáze procesu zůstávají neautomatizovány. [9]

Rozdělení dle flexibility

- **Nepružná automatizace**

Nepružná neboli tvrdá automatizace spočívá v tom, že program automatického technického zařízení není možné vyměnit, nebo jen velmi obtížně, a to s velkými náklady.

- **Pružná automatizace**

V oblasti pružné automatizace se vyskytuje vysoká míra přizpůsobivosti a tento typ automatizace nabízí na rozdíl od nepružné automatizace naopak snadnou, rychlou a levnou výměnu programu. Její součástí je robotizace, zaměřuje se mimo jiné i na využití průmyslových robotů. [9]

1.4 Průmyslové roboty

Průmyslový robot je automaticky ovládaným, reprogramovatelným víceúčelovým manipulátorem, programovatelným ve třech nebo více osách, který může být buď pevný, nebo mobilní, určený k použití v průmyslové automatizaci. [13]

Průmyslový robot je automaticky řízeným strojem, který slouží člověku ke zpracování látek, energií, informací a případně ke změnám, či udržení prostředí člověka. Slouží také k obsluze obráběcích strojů, zpracovatelských a dopravních strojů, či jako náhrada lidí v pracovním procesu.

Odlišnosti průmyslových robotů od ostatních strojů:

- možnost přizpůsobení se různým průmyslovým požadavkům;
- efektor, upevněný na pohyblivém rameni a je pracovním orgánem robotu;
- paměť, která slouží k uložení sledu automaticky opakovatelných pohybů;
- programovatelnost. [7]

Hlavní části průmyslových robotů

Podle Piskače [7] existují tyto části:

- efektory: chapadla, montážní nástroje, rozprašovací nástavce, svařovací kleště;
- převody mechanické energie;
- pohony rotační a posuvné elektrické, hydraulické a pneumatické, tzv. aktuátory;
- převodníky, čidla;
- řídicí orgány: periferní počítač, zpracování informace pro řízení pohonu;
- podpůrné konstrukce a různá vedení: konzoly, příruby, kuličková vedení;
- periferní orgány: paměť, bezpečnostní systém.

Rozdělení průmyslových robotů

Obecné rozdělení

Přestože není členění robotů a průmyslových automatů jednotně stanoveno, mezi nejčastější rozdělení patří členění do následujících tříd:

Ruční manipulátory neboli teleoperátory, jež jsou jednoúčelovými i víceúčelovými manipulačními zařízeními, ovládanými člověkem. Mají za úkol násobit sílu a pohybové možnosti operátora.

Manipulátory s pevným programem pracují oproti ručním manipulátorům automaticky a bez přímé účasti daného člověka. Tyto roboty mají za schopnost opakování předem pevně stanovených pracovních cyklů, stanovených z několika nebo mnoha jednotlivých pracovních pohybů.

Manipulátory s pružným programem tyto roboty s pružnou sekvencí následují automatizovaný zadaný program, který lze rychle změnit díky přenastavení zadaných prvků řídicího systému. [6]

Rozdělení průmyslových robotů dle typu pohybů

Scara roboty

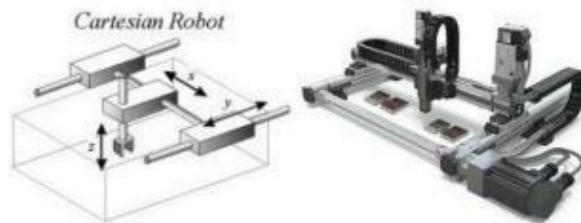
Scara roboty (viz. obrázek 1-2) dokážou vykonávat translační pohyby a k tomu otáčení kolem svislé osy. Mají především válcovitý design a dva rovnoběžné klouby, které zajišťují rovnoběžnost v jedné vybrané rovině.



Obrázek 1-2: Scara robot [15]

Kartézské roboty

Tyto roboty mají tři lineární klouby a pohybují se pouze lineárně v kartézském systému osy (X, Y, Z). Ukázka kartézského robota je ilustrována na obrázku 1-3.



Obrázek 1-3: Kartézský robot [16]

Kloubové roboty

U kloubových robotů, viz. obrázek 1-4 se rameno připojuje otočným spojem k základně. Spojení jsou na rameni připojeny pomocí kloubů. Každý kloub je nazýván jako osa a nejčastěji se lze v praxi setkat s šesti kloubovým, tedy s šestiosým robotem.



Obrázek 1-4: Kloubový robot [17]

Delta roboty

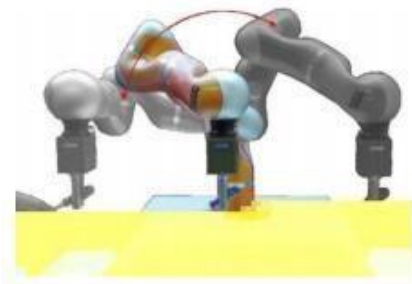
Delta roboty jsou tvořeny z kloubových rovnoběžníků, které jsou připevněny ke společné základně. Ukázku můžeme vidět na obrázku 1-5.



Obrázek 1-5: Delta robot [20]

Redundantní roboty

Podobně jako kloubové roboty, mohou i redundantní roboty, viz. obrázek 1-6 polohovat nástroje v dané poloze, a navíc mají také schopnost pojmout danou pozici nástroje z více odlišných pozic.



Obrázek 1-6: Redundantní robot [21]

Dual – arm roboty

Dual-arm roboty, viz. obrázek 1-7 jsou roboty s duálními dvěma robotickými pažemi, které jsou schopné pracovat spolu na jednom výrobku, či provádět jinou činnost zvlášť.



Obrázek 1-7: Dual – arm robot [22]

Rozdělení robotů dle použití:

- **Svařovací roboty** – tyto roboty jsou určeny pro svařování,
- **Paletizační roboty** – tyto roboty jsou vhodné pro paletizaci,
- **Závěsné roboty** – vhodné pro práci nad výrobním, kontrolovaným, či jiným pracovním prostorem,
- **Lakovací roboty** – vhodné k lakování,
- **Kolaborativní roboty** – vhodné k mnoha aplikacím universální, bezprostředně pracující s lidmi a bezpečné roboty.

1.5 Kolaborativní roboty

Kolaborativní roboty neboli coboty, představují revoluční novinku, jež posunuje součinnost lidí a robotů ve výrobě a také průmyslovou automatizaci na zcela novou odlišnou úroveň. Tento koncept robotů, které jsou určeny pro přímou bezprostřední spolupráci s lidmi je jedním z významných pilířů platformy Průmyslu 4.0. **Společným rysem cobotů je bezpečnost.** Jejich koncepce je řešena tak, že při střetu s člověkem se automaticky zastaví a přejdou do uvolněného režimu. Z monstrózních průmyslových robotů, pracujících za přísných bezpečnostních opatření pouze v ochranných klecích, se díky inovacím v robotice a informačních technologiích vyvinul zcela nový typ lehkých robotů, určených pro práci vedle lidí.

Nejnovější trend v oblasti průmyslové automatizace představuje opravdovou výzvu pro všechny výrobce robotů a robotizovaných mechanismů. Jak po technické stránce, kde bylo nutno zajistit bezpečnost z hlediska konstrukčního řešení a designu, tak z pohledu stále se zpříšňujících bezpečnostních předpisů a norem, které musely reflektovat nové podmínky a řešit odpovědnost výrobců. Teze z proslulých zákonů definované Isaacem Asimovem, tzn. pravidlo, že robot nesmí v žádném případě a za žádných okolností ublížit člověku, je v nových předpisech, které formují legislativu týkající se kolaborativních robotů uplatněno skutečně vrchovatou měrou.

Spolupráce s robotem, který přebírá tyto namáhavé, či nezáživné operace, umožňuje snížit fyzickou zátěž člověka, ale i celkově zefektivnit celý výrobní proces. Například pokud jde o rychlost, což však nemusí být hlavním účelem, ale především o spolehlivost a opakovatelnost. Robot je přesnější a eliminuje riziko náhodných chyb způsobených nedostatečnou pozorností člověka v průběhu příslušné operace. Zároveň se ale přímou spoluprací člověka a robota sníží prostorové nároky a také se zvýší flexibilita. Neúnavně a téměř bezúdržbově pracující kolaborativní roboty tak mohou firmám pomoci ke zvýšení produkce při současném zvýšení efektivity, kvality a snížení nákladů. Díky tomu často dosahují návratnosti ne v řádu let, ale pouhých měsíců, kdy se investice do pořízení těchto systémů uživateli rychle vrátí. [23]

Úrovně robotické aplikace (viz. tabulka 1-1):

- 1) **Koexistence** – zde se robot nachází v ochranné zóně a během celého výrobního procesu nesmí zasahovat žádná osoba. Operátor vstupuje do pracovního prostoru robotu jen za např. účelem údržby.
- 2) **Kooperace** – zde obsluha a operátor pracují na stejném pracovišti, ale bez vzájemné spolupráce.
- 3) **Provozní spolupráce kolaborace** – zde je nezbytné, aby mezi člověkem a kolaborativním robotem probíhala interakce současně ve společném pracovním prostoru. [24]

Tabulka 1-1: Úrovně robotické aplikace

Aplikace	Různý pracovní prostor	Společný pracovní prostor
Sekvenční zpracování	(žádná interakce)	Kooperace
Současné zpracování	Koexistence	Provozní spolupráce

Rozdíly mezi kolaborativními a průmyslovými roboty

Rozdíly mezi těmito roboty jsou znázorněny v následující tabulce 1-2.

Tabulka 1-2: Rozdíly mezi kolaborativními a průmyslovými roboty

PRŮMYSLOVÉ ROBOTY	KOLABORATIVNÍ ROBOTY
Ochranné zóny klece	Přímá spolupráce s člověkem
Bezpečnost zajištěna pomocí snímačů pohybu při vstupu na pracoviště	Bezpečnostní prvky přímo v robotu
Vyžadována vysoká znalost programování	Jednoduchá programovatelnost
Náročnější nastavení	Rychlé nastavení a uvedení k provozu
Složité přestavby na jiné typy operací	Flexibilita ve využití
Velké požadavky na prostor	Malé požadavky na prostor

1.5.1 Výrobci kolaborativních robotů

Tato podkapitola uvádí nejznámější výrobce kolaborativních robotů na trhu.

ABB

Společnost ABB, výrobce průmyslových robotů a robotického softwaru, vykazuje již přes 400 tis. nainstalovaných robotů po celém světě v různých průmyslových odvětvích.

Yaskawa Electric Corporation

V roce 1977 tato společnost vstoupila na trh s plně elektrickým průmyslovým robotem Motoman a vypracovala se na jednoho z lídrů globálního trhu v oblasti robotiky.

Midea Group (Kuka)

Čínská společnost Midea Group, jejíž součástí je od roku 2017 původně německý výrobce robotů Kuka, nabízí průmyslové roboty pro různá odvětví průmyslu a aplikace.

Fanuc Corporation













Mezi přední výrobce robotů se řadí firma Fanuc s 450 tisíci nainstalovanými roboty po celém světě k roku 2017. V jejich portfoliu se objevují výkonné roboty Scara a kolaborativní roboti pro veškeré průmyslové aplikace.

Universal Robots A/S







Společnost Universal Robots A/S se zabývá výrobou, která se zaměřuje pouze na kolaborativní roboty a na světovém trhu jsou řazeni mezi špičky ve svém oboru. Roboty UR jsou instalovány po celém světě, např. ve společnosti Nissan či Yokohama. Dále se kolaborativní robotikou zabývá společnost Stäubli, Epson, Kawasaki, Rethink Robotics či Denso ave. [25]

Výrobce kolaborativních robotů a jejich výčet lze vidět v tabulkách 1-3 a 1-4.

Tabulka 1-3: Výrobci kolaborativních robotů - 1. část

Kolaborativní roboty	Výrobce	Typ	Označení
	Universal robots A/S	UR	UR3
	Universal robots A/S	UR	UR3e
	Universal robots A/S	UR	UR5
	Universal robots A/S	UR	UR5e
	Universal robots A/S	UR	UR10
	Universal robots A/S	UR	UR10e
	KUKA AG	LBR	LBR iiwa
	KUKA AG	LBR	LBR iiwa 7 R820
	KUKA AG	LBR	LBR iiwa 14 R820
	FANUC	CR	CR-4iA
	FANUC	CR	CR-7iA CR - 7iA/L
	FANUC	CR	CR-15iA

Tabulka 1-4: Výrobci kolaborativních robotů - 2. část

	ABB s.r.o.	Yumi	Yumi
	Kawasaki Robotics GmbH	Dual-arm SCARA	duAro1
	Kawasaki Robotics GmbH	Dual-arm SCARA	DuAro2
	MABI Robotic	Speedy	Speedy 6
	MABI Robotic	Speedy	Speedy 12
	Rethink Robotics	Sawyer	Sawyer
	Yaskawa	Motoman	HC10

1.5.2 Parametry kolaborativních robotů

Obsahem této podkapitoly jsou parametry kolaborativních robotů. Parametry jsou velice důležitými informacemi, které jsou rozhodující při výběru kolaborativních robotů a pro jejich užívání na určitém pracovišti.

Hlavní specifikace:

- Počet os – určují počet stupňů volnosti, které cobot má. Nejčastěji se vyrábějí šestikloubové, tedy šestiosé roboty.
- Dosah [mm] - udává maximální vzdálenost, ve které je schopen cobot normálně pracovat.
- Užitečné zatížení [kg] udává maximální zatížení (váhu), které lze na cobota vyvinout. Je uváděno v kilogramech.
- Opakovatelnost [mm] udává s jakou přesností je cobot schopen vrátit se zpět do stejné polohy. Tento parametr se pro představu pohybuje v řádech setin milimetrů např. 0,05mm.
- Povolená okolní teplota [°C] - udává rozsah teploty, ve které může cobot pracovat
- Příkon [W] - uvádí spotřebu energie

Pohyb:

- Pracovní rozsah [°] - maximální stupeň natočení jednotlivých kloubů
- Maximální rychlost [°/s; mm/s] - rychlost otáčení či posuvu kloubů

Fyzické vlastnosti:

- Rozměry [mm] - průměr nebo půdorysný rozměr
- Hmotnost [kg] - celková hmotnost robota v nezátíženém stavu
- Materiál – konstrukční materiál

- Typ konektoru pro nástroj – specifikuje, jaký nástroj může být na robota nainstalován
- Klasifikace International Protection – stupeň ochrany před nepředvídatelnými zásahy člověka do těsné blízkosti robota
- Hluk [dB] - intenzita rušivého zvuku [7]

Mezi další parametry, udávané v technické dokumentaci kolaborativních robotů, patří vlastnosti kontroléru a ovládacího panelu. Nejčastěji se udávají jejich hmotnosti, materiál a způsob napájení nebo délka kabelu. Důležitá součást dokumentace je seznam oblastí, do kterých je daný kolaborativní robot vhodný implementovat. Mezi nejčastější aplikace lze zařadit: Balení a paletizaci, montáž, operace „Pick and Place“, šroubování, obsluhu stroje či kontrolu kvality. [26]

1.5.3 Koncové efekторы

Nástroje se vyrábí tak, aby byly vhodné pro kolaborativní roboty od více výrobců současně. Jsou konstruovány na základě norem a s ohledem na kompatibilitu s osami ramen kolaborativních robotů. Pokud nelze koncový efektor s robotem spojit, existují na trhu tzv. adaptéry, které plní funkci spojovacího členu mezi nástrojem a robotem. Dále jsou na trhu dostupné různé typy koncových efektorů, které se rozdělují dle oblasti použití. Jedna z možností nabídky je koncový efektor ve formě dvou proti sobě posuvných prstů, které uchopují a umísťují objekty pomocí jejich jednoduchého sevření a rozevření. Pokročilejší typ je pak nástroj ve formě ruky až s pěti prsty. [27] Ukázku koncového efektoru lze vidět na obrázku 1-8.



Obrázek 1-8: Koncové efekторы [27]

1.5.4 Bezpečnost kolaborativních robotů

V současné době je čím dál více kladen důraz na zlepšování bezpečnosti pracoviště. Tím se jednotlivé podniky snaží eliminovat možná rizika a zajistit tak maximální bezpečnost a ochranu zdraví svých zaměstnanců.

V oblasti posuzování bezpečnosti robotů a pracovišť s roboty jsou nejdůležitější mezinárodní normy tyto [28]:

- **ČSN EN ISO 10218-1 (18 6502)** - *Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty*
- **ČSN EN ISO 10218-2 (18 6502)** - *Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 2: Systémy robotů a integrace*
- **ČSN EN ISO 12100 (83 3001)** – *Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a jeho snižování*
- **ČSN EN ISO 13857 (83 3212)** – *Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostor horními a dolními končetinami.*
- **ČSN EN ISO 13850 (83 3311)** – *Bezpečnost strojních zařízení – Nouzové zastavení – Zásady pro konstrukci.*
- **ČSN EN ISO 13855 (83 3303)** – *Bezpečnost strojních zařízení – Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla*

Rozdíl mezi kolaborativními a průmyslovými roboty je především v úrovni součinnosti s člověkem. Průmyslové roboty pracují v uzavřených prostorech bez přístupu operátorů, ty kolaborativní s člověkem spolupracují. Veškeré zajištění bezpečnosti je tak přesunuto na cobota a ten je vybaven bezpečnostními prvky, jež eliminují riziko možného úrazu. Každý je vybaven varovnými světly, funkcí nouzového zastavení a bezpečnostními spínači pro okamžité přerušování činnosti.

Ve výše uvedené kapitole byla popsána teoretická část práce, týkající se automatizace a robotizace. Vlastní práce se zabývá jak procesem nasimulovaném v SW Tecnomatix Process Simulate, tak i procesem na reálném pracovišti. SW Tecnomatix Process Simulate je tedy důležité také charakterizovat a bude se jím zabývat následující druhá kapitola.

2 SW nástroj – Tecnomatix Process Simulate

Celý SW nástroj Tecnomatix od společnosti Siemens představuje **digitální továrnu**, která dokáže propojit všechny výrobní disciplíny s výrobním inženýrstvím. Je schopný vytvořit počáteční návrh, přes plánování, simulaci, ověřování až po danou výrobu a celé její řízení. Digitální továrna Tecnomatix je odrazem výroby v praxi, která přenáší reálné výrobní procesy do virtuálního prostředí. Samotný uživatel má možnost využití všech možných nástrojů pro návrhy výrobních linek, které dokáže rozdělit a navrhnout po jednotlivých optimálních krocích. S využitím možných simulací je tak ve finále dosažena ideální optimalizace výroby. Tento SW je vhodný pro využití jak v malých firmách, které potřebují vyřešit jen některou z oblastí výroby, tak i ve velkých firmách, které chtějí využít celé portfolio digitální továrny. [30]

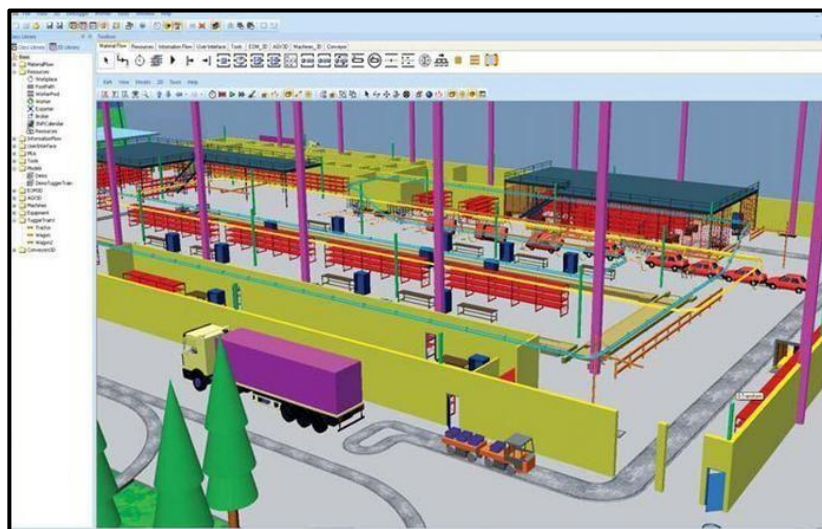
V první části této kapitoly budou stručně uvedeny jednotlivé programy portfolia SW Tecnomatix a poté bude konkrétněji charakterizován program Tecnomatix Process Simulate Robotics a Tecnomatix Process Simulate Human, které jsou využívány v rámci této práce.

Tecnomatix nabízí využití a řešení v následujících oblastech:

- Plánování a ověřování součástí i montážních postupů (*Part and Assembly Planning and Validation*)
- Plánování v oblasti robotiky a automatizace (*Robotics and Automation Planning*)
- Návrh a optimalizace továren (*Plant Design and Optimization*)
- Řízení jakosti (*Quality Management*)
- Řízení výroby (*Production Management*)

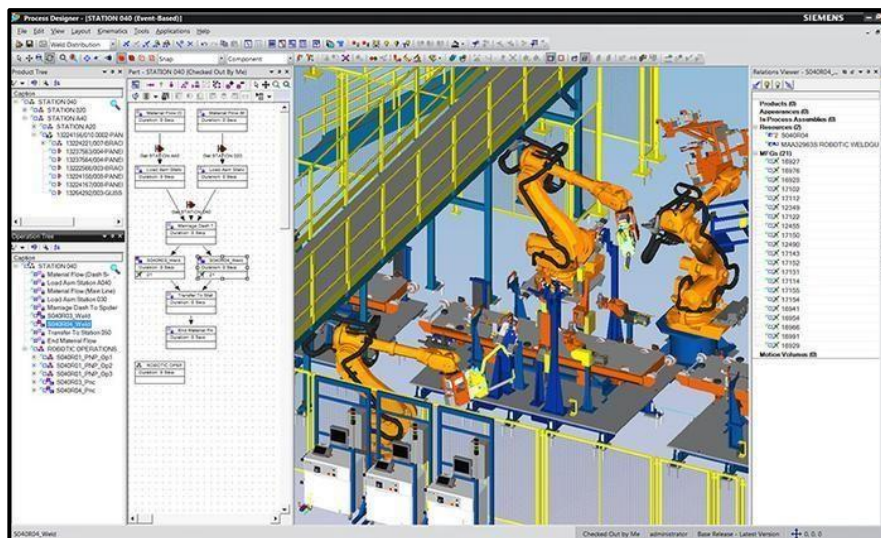
Tecnomatix obsahuje níže uvedené programy:

Tecnomatix Plant Simulation (viz. obrázek 2-1) je efektivním nástrojem pro dynamickou simulaci diskretních událostí a umožňuje vytvářet digitální metody výrobních a logistických systémů a optimalizovat jejich výkonnost. Na těchto digitálních modelech je možné následně provádět v dostupném čase rozsáhlé experimenty a scénáře bez narušení stávajících výrobních systémů. [29]



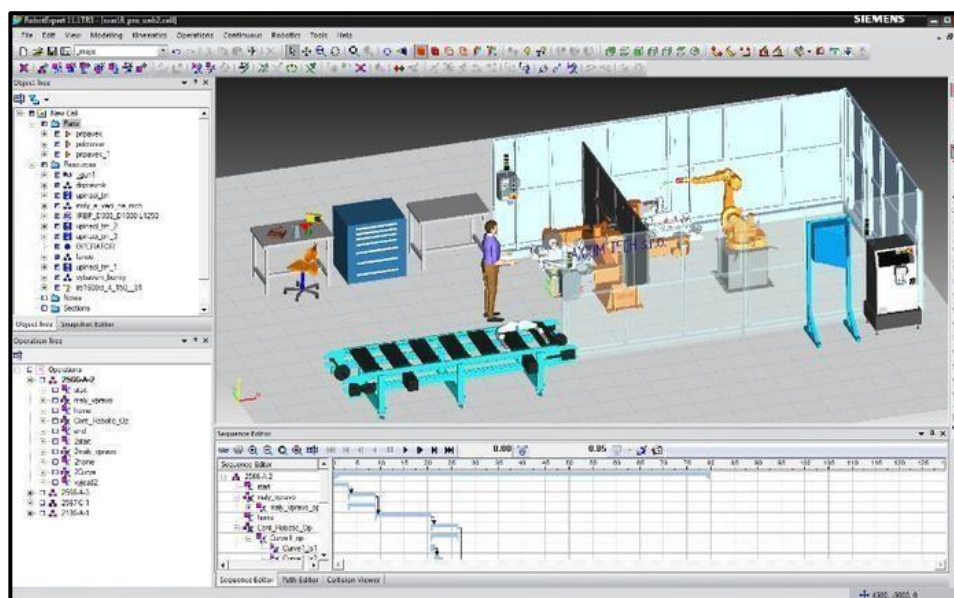
Obrázek 2-1: Tecnomatix Plant Simulation [29]

Tecnomatix Process Designer (viz. obrázek 2-2) je efektivním nástrojem pro vyhodnocení výrobních alternativ, koordinaci prostředků, plánování více variant, zavádění změn a odhalení nákladů a délek cyklů – to vše v raných fázích plánování koncepce. Rozsáhlá řada aplikací přináší možnost definovat a ověřovat posloupnost montáže výrobků, vytvářet uspořádání montážních linek, či sledovat využití prostředků a analyzovat náklady na výrobky a výrobu. [30]



Obrázek 2-2: Tecnomatix Process Designer [30]

Tecnomatix RobotExpert (viz. obrázek 2-3) je řešením pro malé a střední podniky, které využívají průmyslové roboty. Díky pokročilým nástrojům pro návrhy robotických pracovišť je také ideálním řešením pro systémové integrátory. Umožňuje off-line programování průmyslových robotů ve 3D simulačním prostředí bez potřeby přerušení výroby. [30]



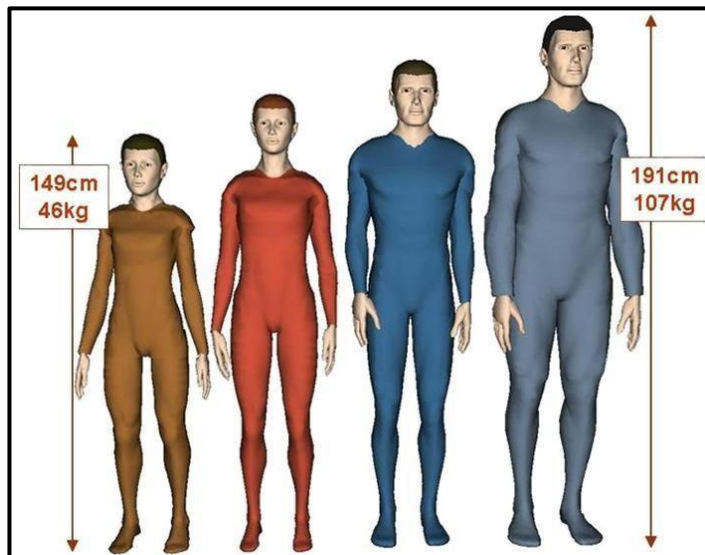
Obrázek 2-3: Tecnomatix RobotExpert [30]

Tecnomatix Robcad (viz. obrázek 2-4) je nástrojem pro simulaci pracovních buněk, který umožňuje vyvíjet, simulovat, optimalizovat, ověřovat a offline programovat procesy robotizované a automatizované výroby, které zahrnují více zařízení. [29]



Obrázek 2-4: Tecnomatix Robcad [30]

Tecnomatix Jack (viz. obrázek 2-5) je komplexním simulačním nástrojem pro hodnocení lidského chování v pracovním procesu. Umožňuje simulaci, kontrolu a vyhodnocení působení pracovní činnosti a pracovního místa na člověka. Zároveň je i ergonomickým nástrojem pro simulaci a optimalizaci ovládání výrobku nebo pracovního prostředí a přizpůsobení práce člověku. [29]



Obrázek 2-5: Tecnomatix Jack [29]

Zbývající dva programy továrny Tecnomatix, tedy Tecnomatix Process Simulate Robotics a Tecnomatix Process Simulate Human, kterými se bude zabývat experimentální část této práce, budou detailněji popsány v následujících dvou podkapitolách.

2.1 Tecnomatix Process Simulate Robotics

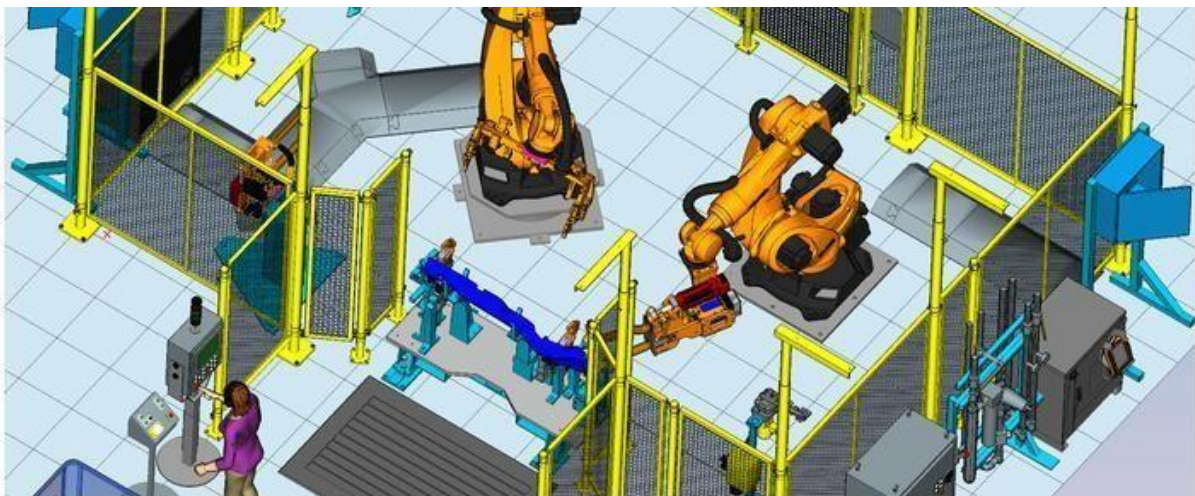
Tecnomatix Simulate Robotics je digitálním simulačním řešením pro ověření výrobního procesu s využitím robotů v 3D prostředí (viz. obrázek 2-6). Simulační 3D prostředí je propojitelné s aplikací Process Designer a Teamcenter Manufacturing, a také je plně synchronizované s jejich aktuálními metadaty.

Schopnost využití 3D dat produktů a zdrojů usnadňuje virtuální verifikaci, optimalizaci a uvádění komplexních výrobních systémů do provozu, což má za následek rychlejší spouštění a dosažení lepší kvality výroby. PS Robotics obsahuje všechny klíčové funkce aplikace Robcad, avšak navíc díky propojení s aplikací PS Human, PS Virtual Commissioning a PS Assembly nabízí jedinečné a škálovatelné řešení nejen pro off-line programování robotů, ale i pro simulace celých výrobních linek včetně kontroly proveditelnosti montáže, kontroly ergonomie, odsimulování signálů řídicích jednotek a ověření funkčnosti návrhu a zapojení.

Process Simulate Robotics zahrnuje širokou škálu robotických aplikací od Pick&Place, balení a montáže, přes bodové, obloukové a laserové svařování, až po frézování, odjehlování, lepení, broušení, leštění, lakování a řezání laserem, či vodním paprskem. Samozřejmostí je možnost nahrávání vytvořených programů do robotů, a naopak program z robotu může být přímo načten do PS Robotics, kde může být dodatečně libovolně upravován. Díky využití virtuálních kontrolérů robotů je dosažena maximální přesnost simulace, přičemž program robotu je pak generován bez nutnosti postprocesingu. [31]

Klíčové přínosy:

- Prověření celé linky ještě ve stádiu návrhu.
- Optimalizace layoutu a taktu linky.
- Optimalizace drah robotů a jejich programů.
- Podpora týmové spolupráce a správy dat.
- Zkrácení engineeringového času.
- Standardizované automotive řešení.

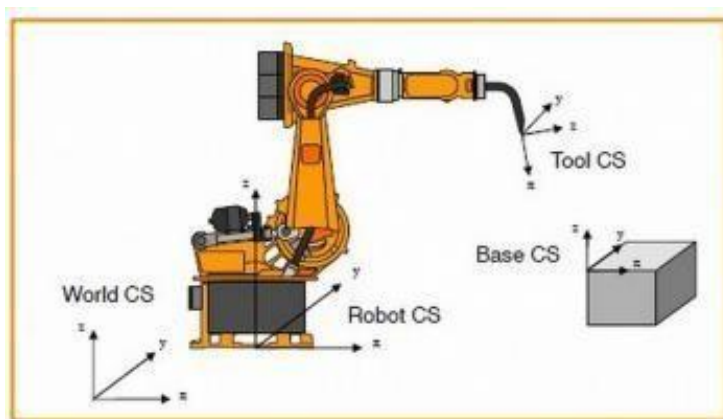


Obrázek 2-6: Tecnomatix Process Simulate Robotics [29]

2.2 Souřadnicové systémy a řízení pohybu

Tato podkapitola se bude zabývat souřadnicovými systémy řízením pohybu. V rámci Tecnomatix Process Simulate je třeba si zvolit jednu z typů souřadnic a řízení pohybu. Jedná se o základní skutečnosti, které jsou potřeba vydefinovat v rámci náplně této práce, a proto jsou zde uvedeny. Detailnější principy práce se SW jsou nad rámec rozsahu teoretické části práce a bude s nimi později pracováno v praktické části.

Pro všechny představené roboty je jedním z nejdůležitějších úkolů pohyb. K jeho řízení potřebuje robot přesný popis polohy vzhledem k pracovišti a ve vztahu k manipulovanému objektu. Tento popis polohy je realizován pomocí souřadnic v jednotlivých souřadných systémech. V robotickém systému jsou definovány čtyři, které je možno vidět na obrázku 2-7 a obrázku 2-8.



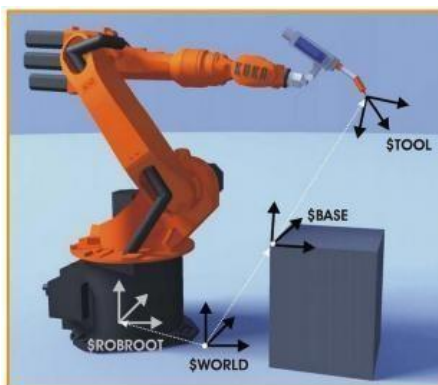
Obrázek 2-7: Popis polohy [32]

World – je trvale vymezený světový kartézský souřadný systém. Ve výchozím nastavení je definován v patě robotu a slouží jako základní pro systémy Robot i Base. [32, 33]

Robot – je souřadným systémem robotu, který se vždy nachází ve spodní části a používá se jako referenční systém pro mechanické konstrukce robotu. Současně definuje pozici robotu vzhledem ke globálnímu systému world. [32]

Base – je souřadným systémem, který se vztahuje ke světovému systému a definuje polohu. Probíhá v něm programování robotu a definuje jej uživatel. [32]

Tool – je souřadným systémem nástroje a je umístěn ve středním bodu nástroje. Systém si definuje sám uživatel a je vztažen k souřadnému systému Base. V případě pohybu středního bodu nástroje se pohybuje s ním. [32]



Obrázek 2-8: Souřadný systém [33]

Samotné řízení pohybu je pak možno provádět dvěma různými způsoby:

Pohyb v kartézských souřadnicích – změna polohy středního bodu nástroje v kladném nebo záporném směru podél os X, Y, Z s možností natočení A, B, C. [33]

Osově specifický pohyb – samostatná změna natočení jednotlivých os v kladném a záporném směru. [33]

Z důvodu nepraktičnosti programování v osově specifickém režimu je programování prováděno v kartézském režimu a řídicí systém souřadnice převede automaticky na natočení jednotlivých os. Předtím je však nutností definovat jednotlivé pohyby pomocí příkazů. Existují tři druhy a u všech je nutné definovat koncový bod, jelikož bod startovní je obvykle koncovým bodem předchozího pohybu. [32,33]

Druhy pohybů (viz. obrázek 2-9):

PTP6 – je pohybem, který vede nástroj nejrychlejší cestou do koncového bodu. Dráhu robotu ale nelze předvídat, jelikož nejkratší cesta vždy nemusí být tou nejrychlejší a díky rotačním osám robotu mohou být zakřivené dráhy uskutečňovány rychleji. Pohyb ve všech osách začíná i končí současně. [33]

LIN – je lineárním pohybem a nástroj opisuje geometricky definovanou přímku, která je nejkratší cestou do koncového bodu. [33]

CIRC – je pohybem vykonávaným po kruhové dráze. Kruh ale nelze popsat pouze dvěma body a musí být zadáván i pomocný bod, který jasně definuje dráhu. Nástroj potom prochází přes tento pomocný bod do koncového bodu. [33]



Obrázek 2-9: Druhy pohybů [33]

2.3 Process Simulate Human

Process Simulate Human umožňuje digitální modelování člověkem prováděných úkonů a jejich reálnou simulaci za účelem ověření ergonomických standardů, bezpečnosti práce a výkonnosti. Obsahem této aplikace je několik analytických nástrojů pro zatížení člověka, reportovací funkce a podpora integrace s hardwarem pro snímání pohybu motion capture.

Typickou aplikací je analýza pracovního prostředí, v níž je ověřováno, zda lidský pracovník vidí vše, co vidět potřebuje a má, že dosáhne na všechna nutná místa a že také unese vše, co potřebuje zvedat.

Cílovým sektorem tohoto produktu jsou především **výrobní podniky a konzultační společnosti**, které potřebují řešit ergonomii práce ve výrobě, a to především v oblasti pracovních poloh, přetížení některých částí těla, únavy a rizika zranění. Široké využití nabízí také v oblasti průmyslového inženýrství a normování časů operací prováděných pracovníky manuálně MTM analýzy. Významnou oblastí využití je také oblast bezpečnosti práce. Díky možnosti simulace průmyslových robotů v jednotném prostředí Process Simulate lze také snadno ověřit, zda na pracovišti nemůže docházet k nebezpečným situacím v interakci robot/stroj. [22] Prostředí Process Simulate Human lze vidět na obrázku 2-10.

Klíčové přínosy:

- Široká knihovna antropometrických databází pokrývající populaci celého světa.
- Eliminace nákladů na přepracování plánu díky včasnému odkrytí problémů s výkonem lidí a zvládnutelností úkonů.
- Zvýšení produktivity, kvality, snížení nákladů na dodatečné opravy/úpravy.
- Snížení počtu výrobních problémů ještě před stavbou fyzického prototypu/produktu.
- Minimalizace problémů s nástroji, vybavením a rozložením výrobních zařízení na pracovišti.
- Zvýšení účinnosti výrobního procesu a využití prostředků.
- Snížení počtu zranění a nemocí z povolání.
- Snížení ztrátových časů – optimalizace rozložení pracoviště.



Obrázek 2-10: Tecnomatix Process Simulate Human

3 Popis pracoviště a vlastní SW model pracoviště

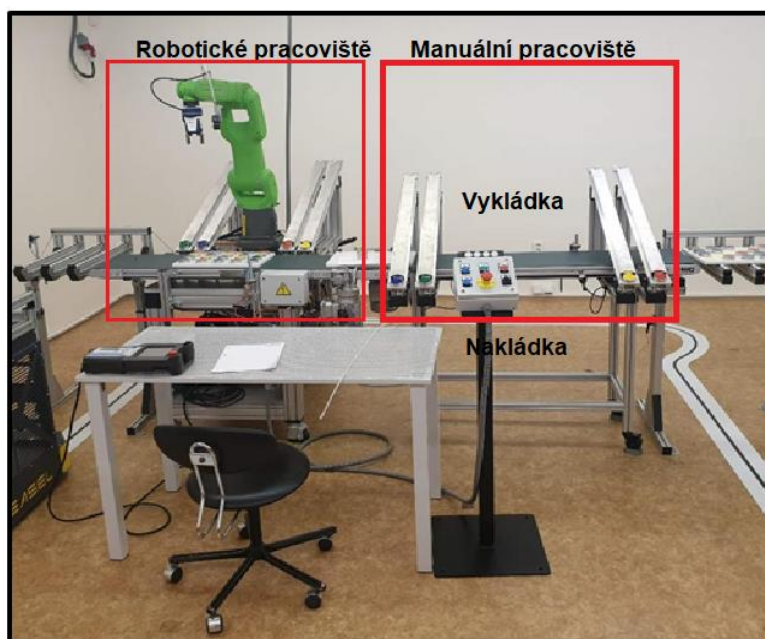
Obsahem této kapitoly bude seznámení s pracovištěm laboratoře 4.0, na kterém bude realizována praktická část této práce. Budoucí experimenty budou probíhat jak v prostředí software Tecnomatix Process Simulate, tak i v reálném prostředí laboratoře. Nejprve je uveden popis pracoviště v laboratoři Průmyslu 4.0, ze kterého vychází následující SW model.

3.1 Popis pracoviště v laboratoři Průmyslu 4.0

Výchozím pracovištěm pro realizaci praktické části této práce je experimentální laboratoř Průmyslu 4.0 na Západočeské univerzitě v Plzni. Její součástí je robotické a manuální pracoviště. Obsahem robotického pracoviště je pásový dopravník, čtyři zásobníky, v nichž jsou umístěny různobarevné puky a robotický systém s kolaborativním robotem, jenž obsahuje robotickou paži a ovládací pendant. Na robotické paži je umístěno kolaborativní chapadlo s kamerou, která je schopná rozpoznávat barevné odstíny. Součástí laboratoře je i automatický vozík Weasel AGV. Ten se pohybuje jedním směrem a dokáže přepravit náklad až do 35 kg, maximální rychlostí 1 m/s. Robot dokáže pracovat ve čtyřech různě nastavených programech. Druhou částí je manuální pracoviště, které obsahuje dopravník a čtyři zásobníky s různě barevnými puky. Na obou pracovištích dochází k operacím nakládky a vykládky puků do paletek.

Nejprve je paletka přivezena na stojan automatickým vozíkem Weasel AGV. Poté si ji robot odebírá a přesouvá po dopravníku na místo, které je nastaveno v programu a následně robot vyfotí paletku. Dále si robot vyfotí zásobníky pomocí kamery a tím se detekují pozice, na které má poté umisťovat barevné puky. Následně postupně odebírá jednotlivé puky a umisťuje je na paletku v daném pořadí tak, aby pořadí odpovídalo zvolenému programu. Pokud je operace dokončena, postupuje dále dle druhu zvoleného programu – buď robot vyprázdní puky z paletky do zadní části zásobníku nebo se paletka přesouvá na manuální pracoviště, kde je vyprázdňena pracovníkem. Prázdná paletka se poté přesune po dopravníku na stojan, ze kterého je následně odebrána vozíkem AGV.

Popsané pracoviště můžeme vidět na obrázku 3-1.



Obrázek 3-1: Laboratoř průmyslu 4.0

Pracoviště využívá kovových puků čtyř barev (červená, modrá, žlutá, zelená). Příklad puků je uveden na obrázku 3-2.



Obrázek 3-2: Využívané puky

Paletka obsahuje dvacet pozic pro puky různých barev. Ukázku prázdné a plné paletky lze vidět na následujících obrázcích 3-3 a 3-4.



Obrázek 3-3: Ukázka prázdné paletky




Obrázek 3-4: Ukázka plné paletky

Nyní budou uvedeny další prvky, ze kterých se pracoviště skládá.

Kolaborativní robot Fanuc CR-7iA/L

Umístěný kolaborativní robot na robotickém pracovišti s označením Fanuc CR-7iA/L je jedním z představitelů kolaborativních robotů s nosností od 3 kg až do 35 kg. Nosnost tohoto konkrétního robota je 7 kg s dosahem maximálně 911 mm a opakovatelností 0,001 mm. Robotická paže je šestiosá a je schopna při dosažení teoretických ideálních podmínek vyvinout rychlost 1000 mm/s. V kolaborativním režimu je maximální rychlost robota 500 mm/s.

Robota lze vidět níže na obrázku 3-5.

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

Obrázek 3-5: Kolaborativní robot Fanuc CR-7iA/L

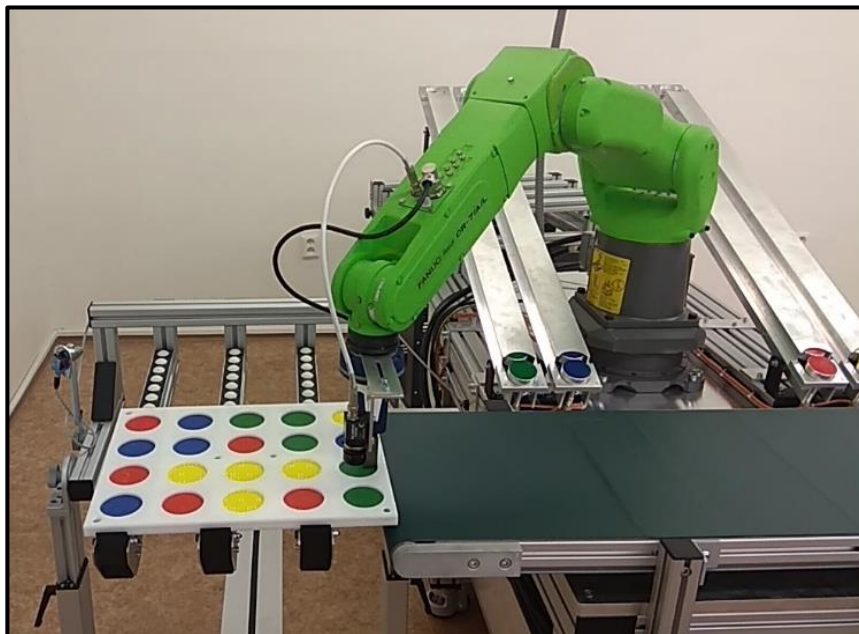
Tento kolaborativní robot nemusí být nijak speciálně oplocen oproti klasickým průmyslovým robotům, jelikož je vhodně vyvinut ke spolupráci s fyzickým nebo cizím objektem. Při kontaktu s člověkem nebo jiným objektem je schopný zastavit svůj pohyb, jelikož v robotické paži je instalován silový senzor, který je schopen rozpoznat působení vnějších sil a robot tak dokáže zastavit. Hlavní částí celého robotického pracoviště je řídicí jednotka, kde probíhají veškeré výpočty a programy. Ovládání robota je řízeno ovládacím pendantem, kde dochází k veškerému nastavení a programování systému. Robota je možné nastavit v několika programech a hlavními operacemi jsou zde naplnění paletky barevnými pukly a její vyprázdnění do zásobníků. Robot Fanuc CR-7iA/L je v laboratoři nastaven na maximální 100 % rychlost, a pohybuje se tedy rychlostí 1000 mm/s.

Robotická paže je složena ze silového senzoru, který je součástí základny, šestiosého mechanismu, jehož pohyb je prováděn pomocí servomotorů umístěných v každém kloubu a zápěstí, na kterých je nainstalováno kolaborativní chapadlo a kamera. Uchopovací prsty jsou vyrobeny z mosazi a jsou určeny k uchopení kulatých puků o průměru 50 mm. Celá komunikace mezi řídicí jednotkou s chapadlem a kamerou probíhá prostřednictvím konektorů umístěných na předloktí paže. Robotická paže je znázorněna na obrázku 3-6.



Obrázek 3-6: Robotická paže

Ukázku kolaborativního robota při práci, kdy přemísťuje paletku na dopravník lze vidět na obrázku 3-7.



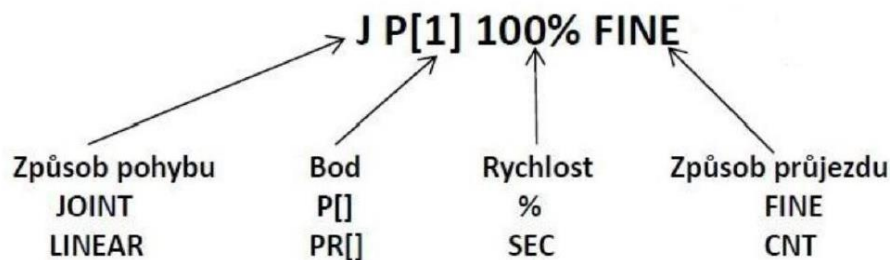
Obrázek 3-7: Ukázka kolaborativního robota při práci

Důležité pro budoucí experimenty je samozřejmě také způsob pohybu robota. Při operacích odebírání a pouštění puků, robot vykonává lineární (LINEAR) pohyb, při přesunech vykonává kloubový (JOINT) pohyb, jejich popis je následující:

- JOINT
 - Tento pohyb je základním pohybem pro přemístění
 - Jedná se o nelineární pohyb
 - Orientace nástroje je měněna během pohybu
 - Zadáváno v % rychlosti v místě nejpomalejší osy

- LINEAR
 - Jedná se o lineární pohyb
 - Orientace nástroje je během pohybu neměnná
 - Je určen pro pohyby při odebírání a pouštění puků
 - Rychlost zadávána v mm/s

Tyto pohyby jsou důležité pro popis pohybových instrukcí, se kterými robot pracuje a z nichž vychází i následná simulace robotického pracoviště. Ukázka pohybové instrukce je na následujícím obrázku 3-8.



Obrázek 3-8: Pohybové instrukce [27]

Další důležité parametry, které jsou součástí popisu pohybové instrukce jsou vysvětleny následovně:

Bod

- P [] - bod, který má uloženou svou pozici pouze v rámci jednoho programu
- PR [] - poziční registr – pozice v něm uložená, je neměnná napříč celým systémem

Typ průjezdu bodem

FINE

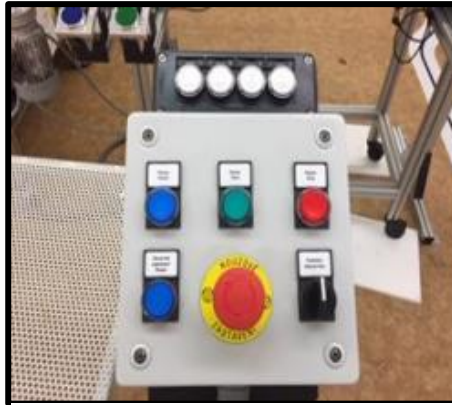
- robot se zastaví v cílovém bodě
- poté následuje pohyb do dalšího bodu

CNT

- robot se k bodu pouze přiblíží a následně pokračuje do dalšího bodu bez zastavení
- nastavením hodnoty 1÷100 je možné definovat, jak těsně se robot průjezdovému bodu dokáže přiblížit (CNT0 = FINE)

Ovládací panel

Ovládací panel je jednoduchý a obsahuje několik tlačítek, jako je start, stop, nouzové zastavení a také čtyři programy k nastavování celého systému. Ovládací panel je znázorněn na obrázku 3-9.



Obrázek 3-9: Ovládací panel

Ovládací pendant

Na obrázku 3-10 je znázorněn ovládací pendant, kterým je ovládáno veškeré nastavení a programování celého systému. Je vybaven dotykovým displejem a tlačítkovou klávesnicí.



Obrázek 3-10: Ovládací pendant

Senzory

Indukční senzory (obrázek 3-11) mají schopnost zkontrolovat přítomnost puků v daném zásobníku. Když některý z puků chybí, tak se poté na ovládacím pendantu objeví upozornění na prázdný zásobník a vybraný program nebude spuštěn.



Obrázek 3-11: Senzory

Kamera

Kamera (obrázek 3-12) představuje oči robota a robot pomocí ní může řídit celou výrobní linku rychlejším a efektivnějším způsobem. To také zlepšuje produktivitu a efektivitu práce na pracovišti. Kamera je připevněna na zápěstí robota a po přijetí paletky si ji robot vyfotí a pomocí senzorů, které byly uvedeny výše vyhodnotí, jestli je paletka na správném místě.



Obrázek 3-12: Kamera

Automaticky řízený vozík AGV Weasel

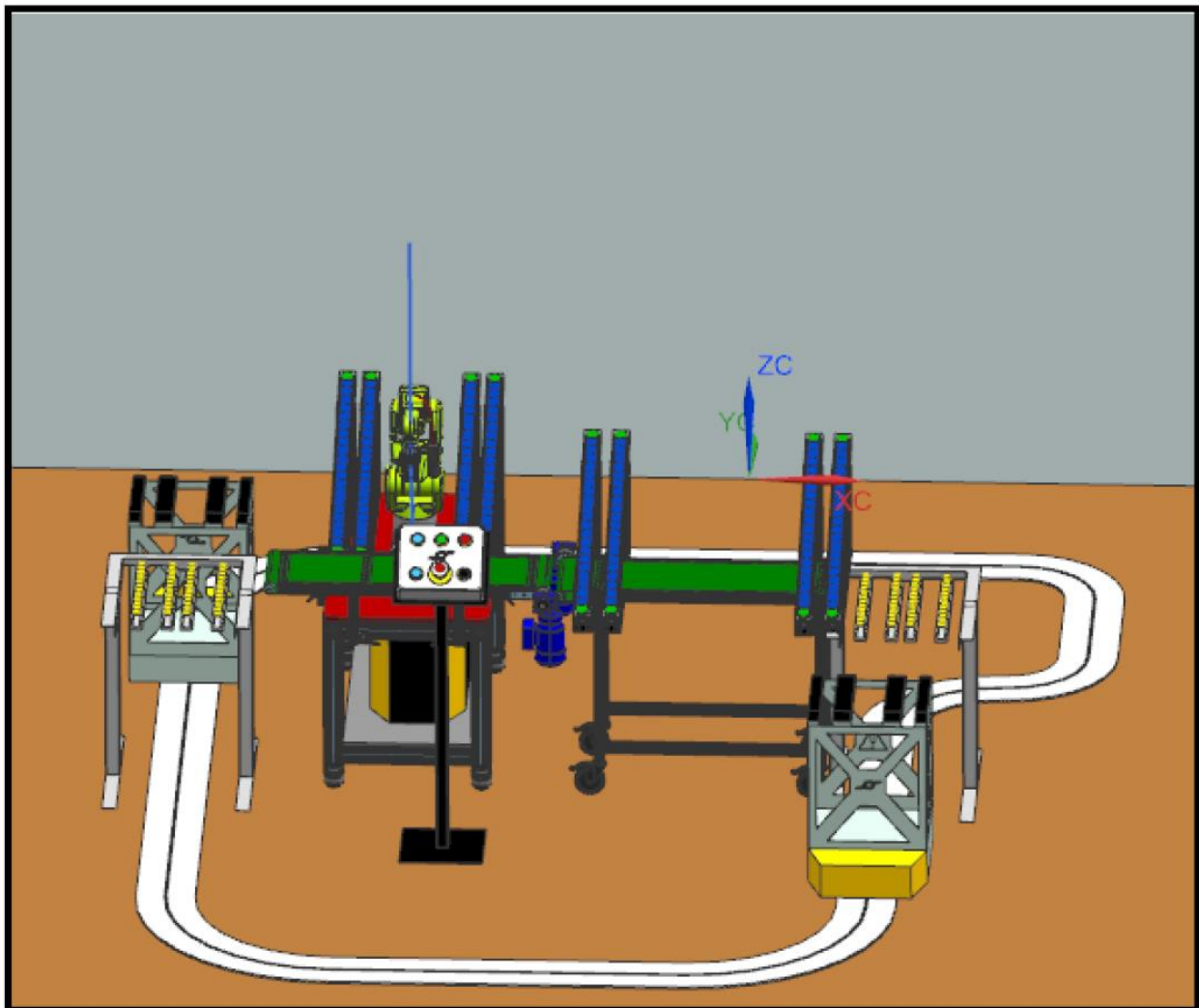
Automaticky řízený vozík s označením AGV Weasel je schopný přepravit náklad s maximální hmotností 35 kg a jeho rychlost pohybu je maximálně 1 m/s. Příklad vozíku lze vidět na obrázku 3-13, ale je zde zmíněn pouze informativně a dále se jím práce zabývat nebude.



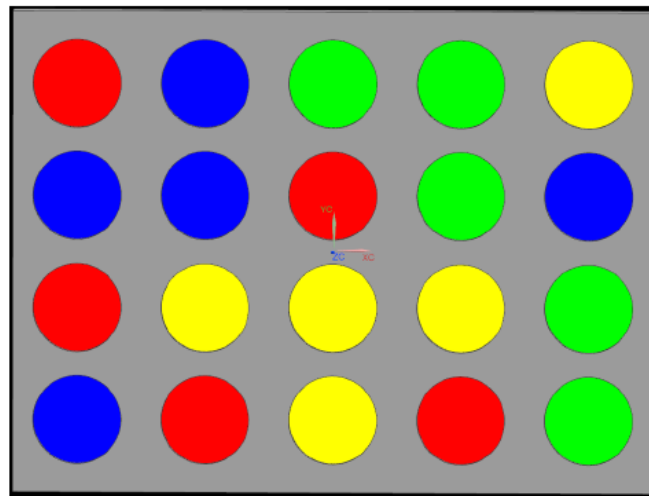
Obrázek 3-13: AGV Weasel

3.2 Vlastní SW model virtuálního pracoviště

Již zpracovaný výchozí model 3 D pracoviště byl nepřesný, a proto jej bylo nutné aktualizovat a upravit tak, aby se co nejvíce podobal reálnému prostředí laboratoře z hlediska fyzických rozměrů a specifikací kolaborativního robota. Na základě parametrů pracoviště a fyzického měření byl původní model laboratoře přepracován v programu Siemens NX. Bylo nutné zvětšit délku dopravníku na manuálním pracovišti, upravit prostor pro pohyb člověka, jelikož byl příliš úzký a člověk by se tam tak nevešel a dále dodělat zelený pás na dopravníku, protože v původním modelu zcela chyběl. Dále byla navržena nová barevná paletka, která bude sloužit ke zpracování budoucích simulačních experimentů. Po dopracování těchto nezbytností byl nový 3D model převeden do formátu JT a importován do prostředí software Tecnomatix Process Simulate. Po vložení 3D modelu pracoviště byl do uživatelského prostředí vhodně umístěn kolaborativní robot. Každý robot je tvořen z několika otočných kloubů, u kterých je nutné definovat vzájemnou závislost, nastavení jejich rozpětí a rychlosti na základě technických parametrů. Aktualizovaný model pracoviště lze vidět na obrázku 3-14, na obrázku 3-15 potom navržený model paletky.



Obrázek 3-14: Model virtuálního pracoviště

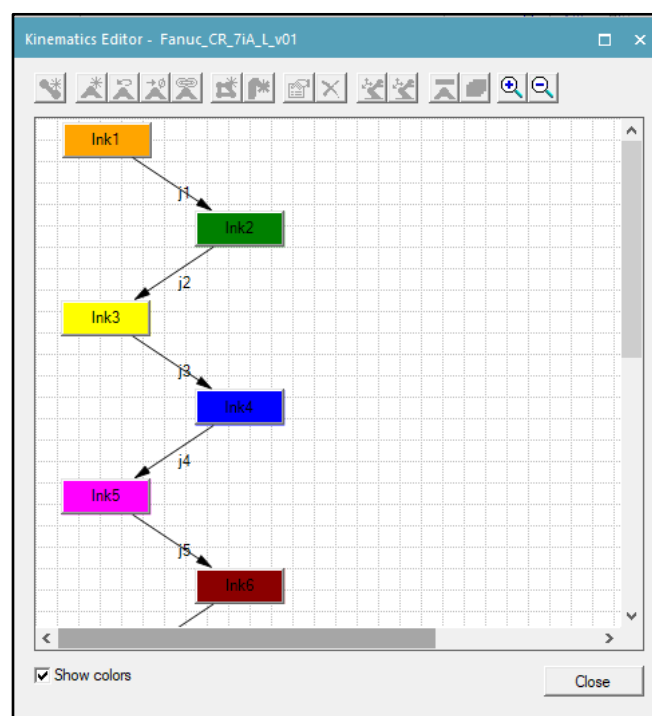


Obrázek 3-15: Navržený model paletky

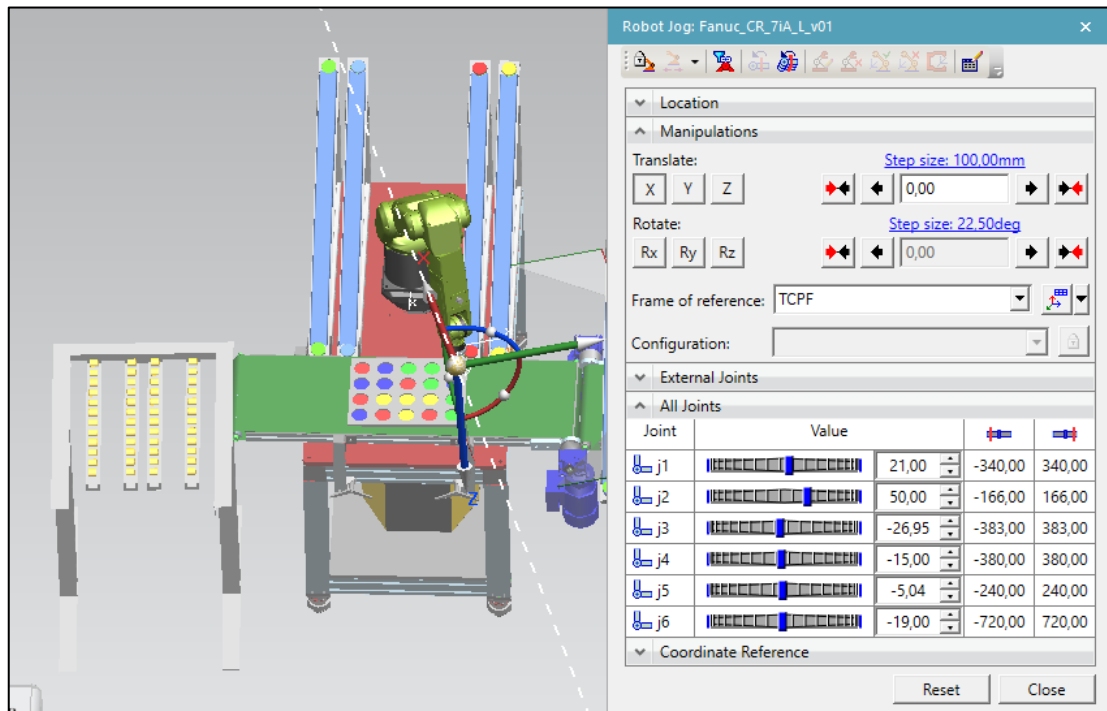
Robotické pracoviště

Důležité pro výchozí simulace je bezchybná kinematika robota, jelikož bez ní by robot nebyl funkční a nedokázal by tak uchopovat a přemísťovat dané objekty. Na obrázku 3-16 jsou definovány vazby mezi klouby robota pomocí funkce tzv. kinematického editoru. Původní model byl zkontrolován dle specifikací výrobce.

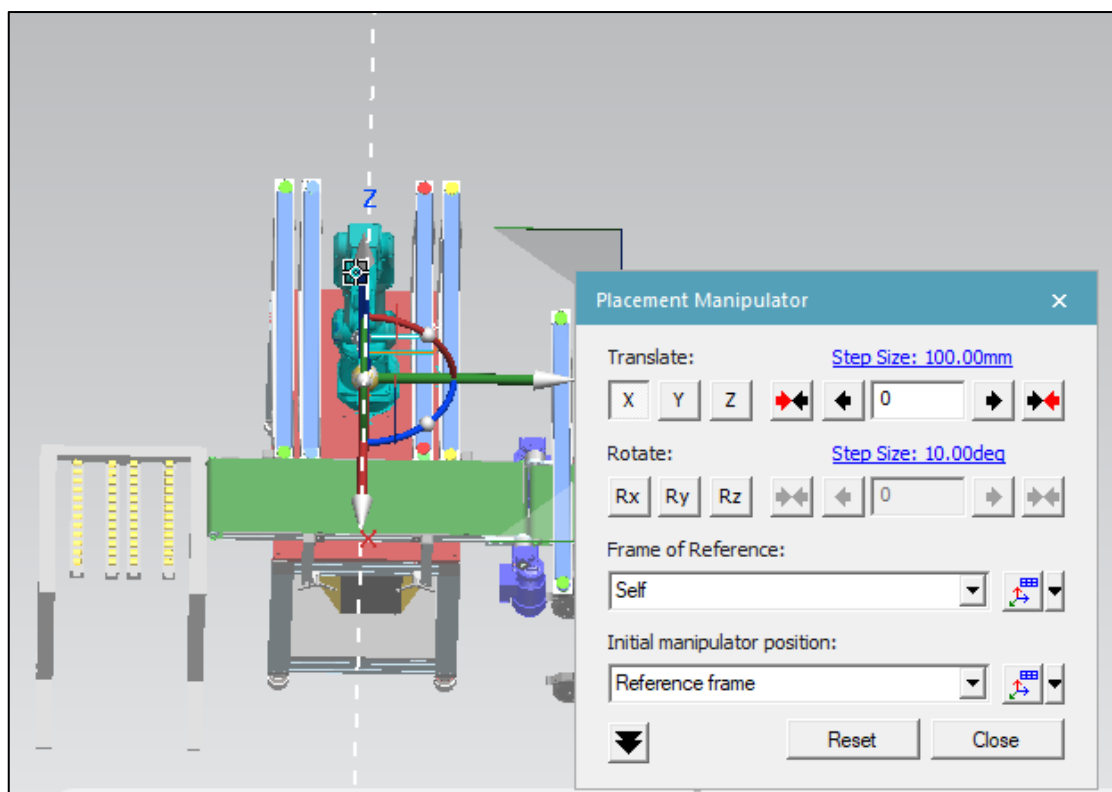
Po definici kinematiky je možné s každým kloubem manipulovat s využitím funkcí jakou jsou Robot Jog (Obrázek 3-17), či Placement manipulator (Obrázek 3-18). Na obrázku jsou dále definovány rozsahy pohybů robota na jednotlivých kloubech a jejich velikost vychází z technických parametrů robota od výrobců.



Obrázek 3-16: Kinematický editor

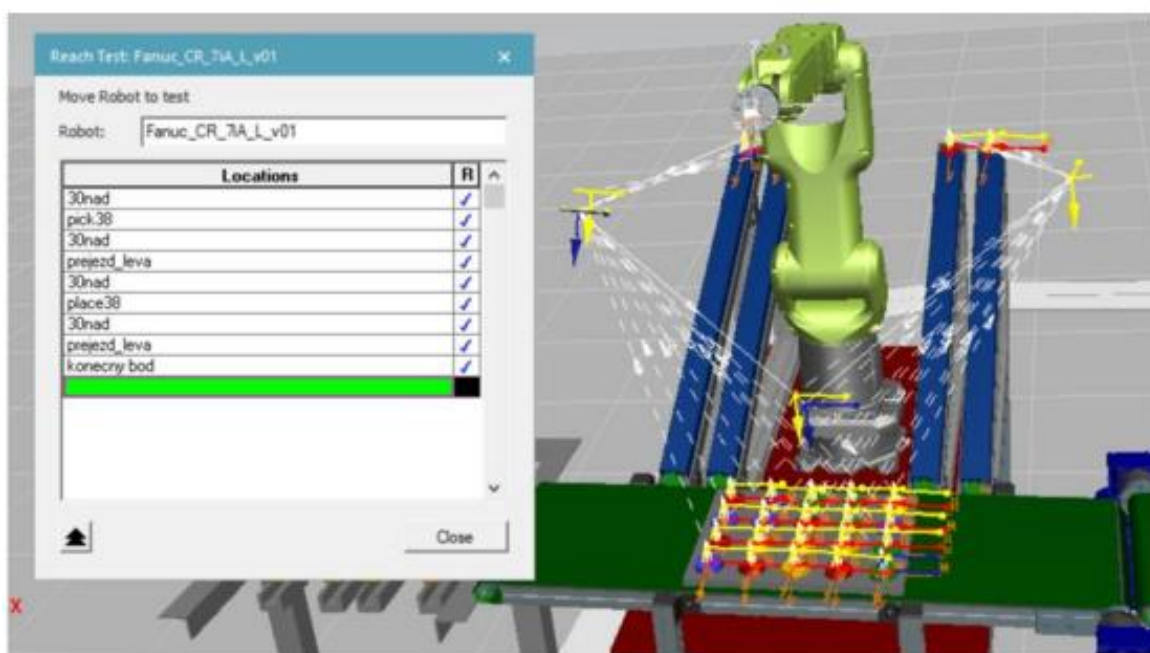


Obrázek 3-17: Funkce Robot Jog



Obrázek 3-18: Funkce Placement Manipulator

Na obrázku 3-19 je znázorněna funkce Reach Test, kterou si lze ověřit, že robot dosáhne tam, kam potřebujeme. Jsou zde vidět také jednotlivé průjezdové body.



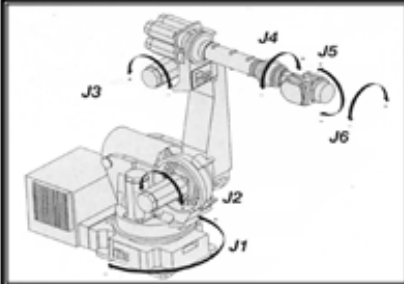
Obrázek 3-19: Funkce Reach Test

Pro ukázkou je na obrázku 3-20 uvedená specifikace výrobce týkající se kinematiky kolaborativního robota Fanuc CR-7iA/L s rozsahem jednotlivých kloubů robota.

CR-7iA/L									
Controlled axes	Repeatability (mm)	Mechanical weight (kg)	Motion range (°)						Maximum speed (mm/s)
			J1	J2	J3	J4	J5	J6	
6	± 0.01**	55	340	166	383	380	240	720	1000*2

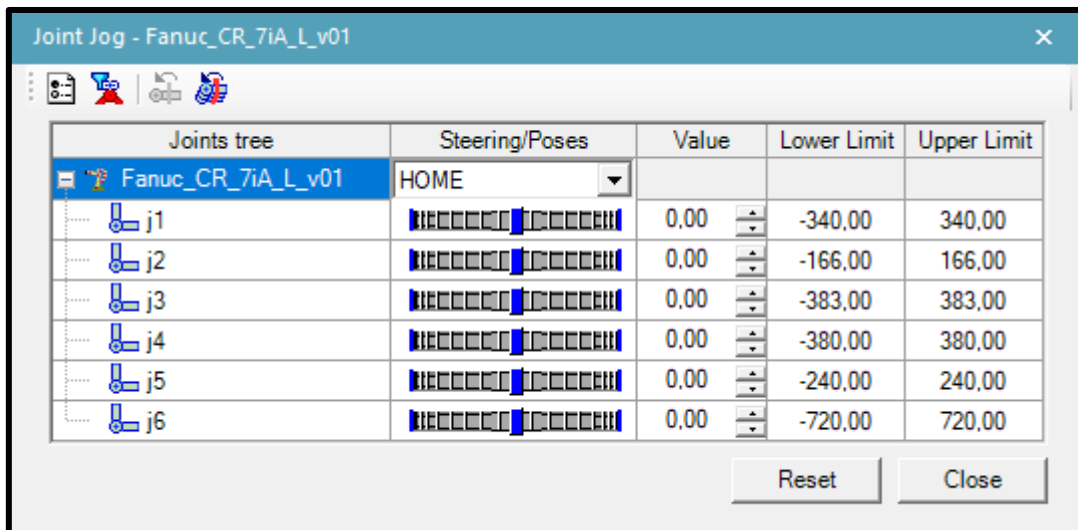
Obrázek 3-20: Specifikace výrobce – kinematika kloubů robota [38]

Na obrázku 3-21 jsou znázorněny relevantní rozsahy kloubů kolaborativního robota FANUC CR-7iA/L vycházející ze specifikace výrobce, včetně grafického znázornění jednotlivých kloubů.

Rozsahy kloubů		Robot - Fanuc CR7iA/L
J1	340 °	
J2	166 °	
J3	383 °	
J4	380 °	
J5	240 °	
J6	720 °	

Obrázek 3-21: Znázornění kloubů a rozsahů robota, upraveno dle [38]

Tato specifikace je následně přenesená do SW Tecnomatix Process Simulate, což je znázorněno na obrázku 3-22. Hodnoty odpovídají specifikacím výrobce.

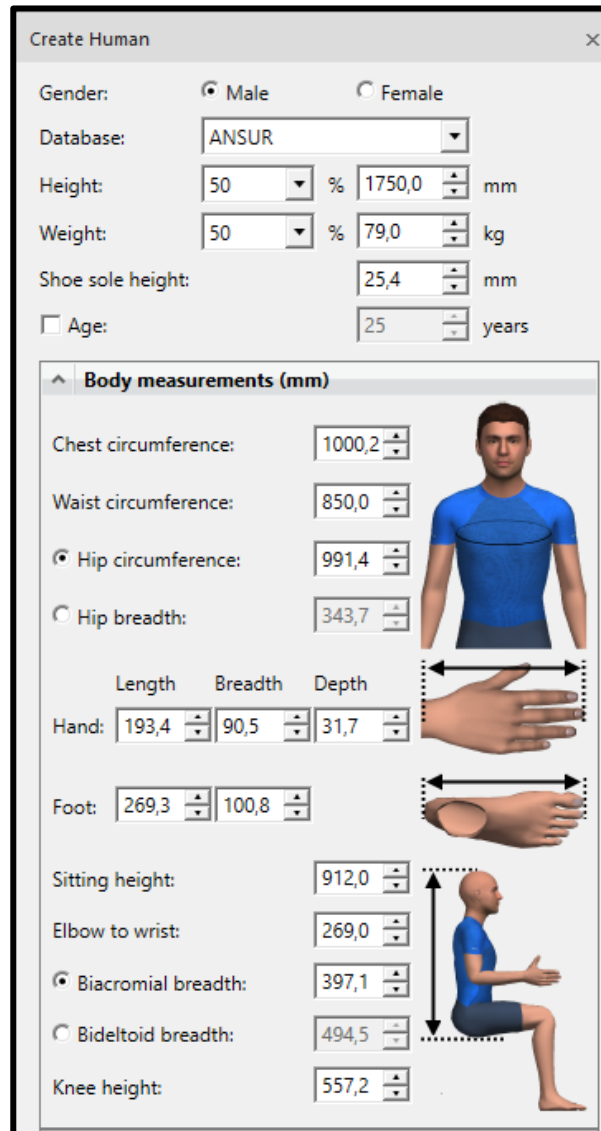


Joints tree	Steering/Poses	Value	Lower Limit	Upper Limit
Fanuc_CR_7iA_L_v01	HOME			
j1		0,00	-340,00	340,00
j2		0,00	-166,00	166,00
j3		0,00	-383,00	383,00
j4		0,00	-380,00	380,00
j5		0,00	-240,00	240,00
j6		0,00	-720,00	720,00

Obrázek 3-22: Funkce Joint Jog – specifikace kinematiky

Manuální pracoviště

Po provedení uvedených úprav manuálního pracoviště byl v Process Simulate Human zvolen přes operaci Create human evropský typ člověka, jelikož vycházíme z podmínek České republiky, kde se výchozí pracoviště nachází. Ukázkou funkce Create Human lze vidět na obrázku 3-23.



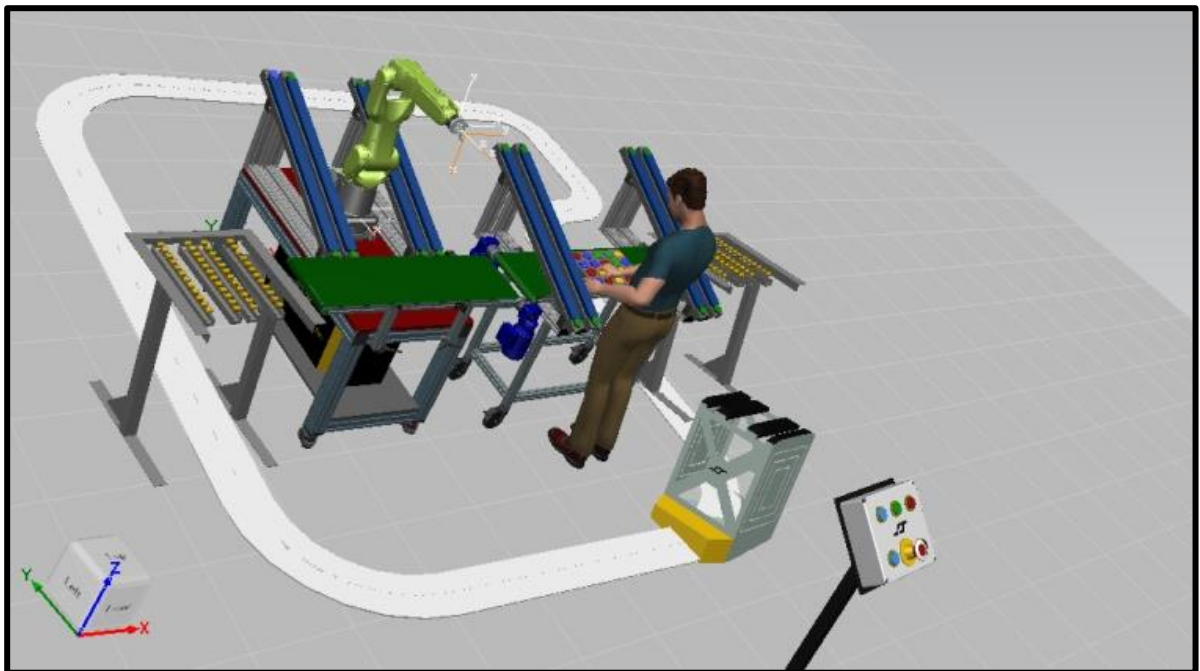
Obrázek 3-23: Funkce Create Human

Tento model člověka byl následně vložen do modelu pracoviště vytvořeného v prostředí SW Process Simulate Human a pomocí funkce Placement manipulator vhodně umístěn na správnou pozici v rámci manuálního pracoviště. Tento virtuální pracovník bude výchozí pro zpracování budoucích simulací na manuálním pracovišti. Model člověka v rámci pracoviště je znázorněn na obrázku 3-24.



Obrázek 3-24: Model člověka

Ukázka virtuálního pracovníka při práci je znázorněna na obrázku 3-25.



Obrázek 3-25: Ukázka virtuálního pracovníka při práci

4 Experimetování a vyhodnocení dat z modelu a z reálného pracoviště

Tato kapitola popisuje virtuální a reálné experimenty, které byly provedeny v rámci této práce. Praktická část týkající se virtuálních experimentů byla zpracována v software Process Simulate Robotics a Process Simulate Human. Reálné experimenty byly zpracovány v laboratoři Průmyslu 4.0 na ZČU v Plzni.

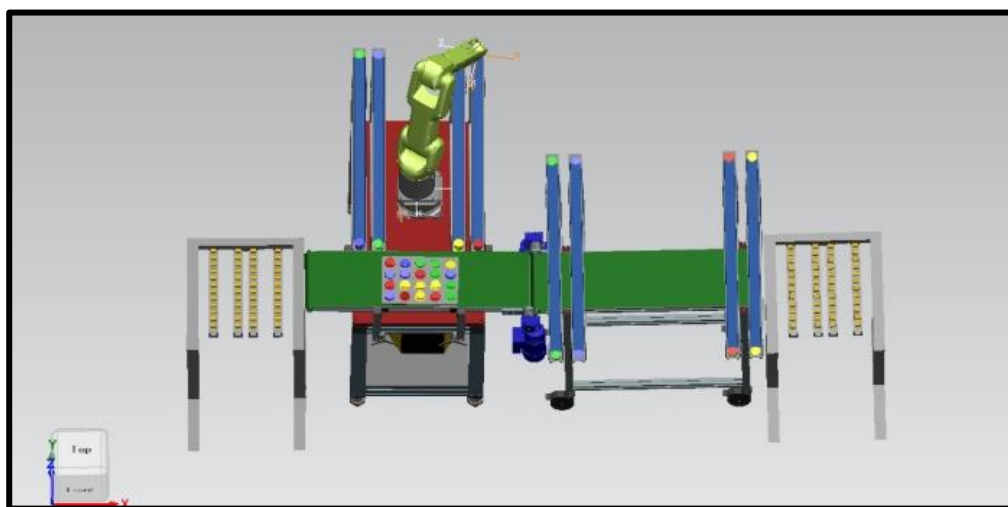
4.1 Vlastní princip experimentu

Cílem práce je, jak vyplývá z názvu práce: Porovnání modelu v Tecnomatix Process Simulate s reálným robotizovaným pracovištěm. S tím souvisí i vlastní experiment, skládající se z jednotlivých dílčích experimentů.

Východiskem pro experiment je model zpřesněného pracoviště, a to jak robotického, tak manuálního. Základní myšlenka experimentu je taková, že virtuálně vytvořené pracoviště co nejvíce odpovídající realitě a specifikacím bude podrobena dílčím experimentům s využitím simulací, které ukáží časové hodnoty, jichž je možné ideálně dosáhnout na budoucím reálném pracovišti. Následně budou provedeny identické operace v rámci dílčích experimentů na reálném pracovišti. Po jejich statistické validaci budou časové hodnoty týkající se virtuálního a reálného pracoviště porovnány a vyhodnoceny.

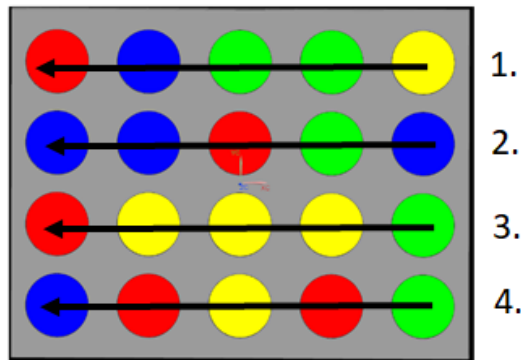
Pro co nejpřesnější porovnání je důležité zajistit co nejpřesnější shodu mezi reálným a virtuálním pracovištěm na jedné straně, tak i vycházet z identických operací. Pro popis jednotlivých dílčích experimentů odpovídajících jednotlivým operacím je důležité vymezit význam určitých pojmů. Tyto pojmy jsou následující:

- **Naplnění paletky** – Jednotlivé puky jsou umisťovány na prázdnou paletku, dokud není všech dvacet pozic paletky zaplněno (princip naplnění dle pořadí, či dle barev je vysvětlen dále).
- **Vyprázdnění paletky** – Jednotlivé puky jsou odebírány z naplněné paletky a jsou umisťovány do zadní části zásobníků (viz. obrázek 4-1), dokud není všech dvacet pozic vyprázdněno (princip vyprázdnění dle pořadí, či dle barev je vysvětlen dále).



Obrázek 4-1: Ukázka vyprázdnění paletky

- **Princip naplnění / vyprázdnění paletky dle pořadí** – Jednotlivé puky jsou umístěovány / odebírány pozice po pozici ve směru zprava doleva po jednotlivých řádcích paletky. Tento princip je znázorněn na obrázku 4-2. Pořadí řádků je od 1. po 4.



Obrázek 4-2: Princip naplnění/ vyprázdnění paletky

- **Princip naplnění / vyprázdnění paletky dle barev** – Jednotlivé puky jsou umístěovány / odebírány pozice po pozici dle jednotlivých barev v zásobnících. Nejprve budou umístěovány/ odebírány modré puky, po umístění všech modrých puků do pozic na paletce následuje umístění všech zelených puků, poté žlutých a jako poslední červených.
- **Princip naplnění / vyprázdnění paletky dominantní rukou** – Jednotlivé puky jsou umístěovány / odebírány dominantní rukou operátora. Tohoto principu je využito při naplnění / vyprázdnění paletky dle pořadí.
- **Princip naplnění / vyprázdnění paletky oběma rukama** – Jednotlivé puky jsou umístěovány / odebírány oběma rukama operátora. Tohoto principu je využito při naplnění / vyprázdnění paletky dle barev.

Východiskem je, že najednou do jedné ruky člověk může uchopit pouze jeden puk – což odpovídá situaci na robotickém pracovišti.

Následuje výčet jednotlivých dílčích experimentů na robotickém a manuálním pracovišti.

Experimenty na robotickém pracovišti:

1. Naplnění paletky dle pořadí.
2. Naplnění paletky dle barev
3. Vyprázdnění paletky dle pořadí
4. Vyprázdnění paletky dle barev.

Experimenty na manuálním pracovišti:

1. Naplnění paletky dominantní rukou dle pořadí
2. Naplnění paletky oběma rukama dle barev.
3. Vyprázdnění paletky dominantní rukou dle pořadí.
4. Vyprázdnění paletky oběma rukama dle barev.

Volba dílčích experimentů byla provedena s ohledem, jak na porovnatelnost mezi robotickým a manuálním pracovištěm, tak i s ohledem na ukázkou možností SW Tecnomatix Process Simulate.

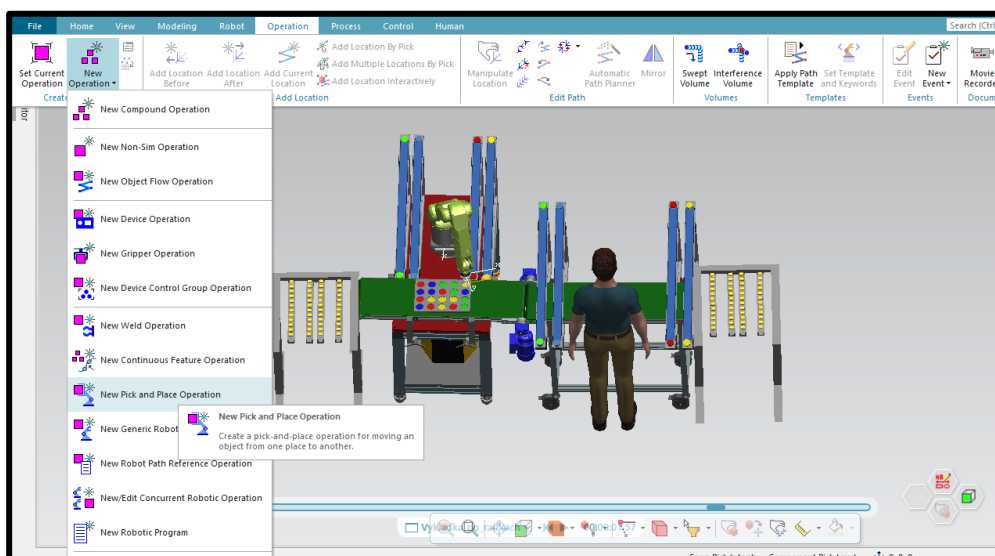
Bylo tedy navrženo celkem osm různých dílčích experimentů. K těmto dílčím experimentům budou vytvořeny odpovídající simulace operací nakládky a vykládky. Výsledné časy těchto operací budou porovnány s časy operací na reálném pracovišti. Měření časů reálného pracoviště je provedeno v laboratoři Průmyslu 4.0 na ZČU v Plzni a následně statisticky vyhodnoceno. Výchozí metodikou pro tyto reálné časové studie je metodika REFA.

4.2 Experimenty na virtuálním pracovišti

Pro provedení dílčích experimentů ve virtuálním prostředí bylo využito zpřesněného modelu, který byl doplněn o jednotlivé simulace operací nakládky a vykládky, jak na robotickém, tak i na manuálním pracovišti. Tvorba simulací byla provedena následujícím způsobem.

Tvorba simulací na robotickém pracovišti

Pro tvorbu simulací vycházíme z výchozí nadefinované kinematiky robota. Pro tvorbu operací nakládky a vykládky bylo nutné správně nastavit způsob úchopu nástroje, museli jsme tedy vytvořit příkaz, který dá pokyn k tomu, aby se potřebný nástroj uchytil, tam kde potřebujeme. Dále je nutné vytvořit a dodržet správný kartézský systém všech os, aby se robot pohyboval, jak má. Poté je možné vytvářet operace. U operací nakládky i vykládky byl zvolen typ operace „Pick and Place“ neboli „Vzít a umístit“ a tzv. Compound Operation, která sdružuje jednotlivé operace do jedné. Výběrem výše zmíněné operace určíme body pro pozici „pick“ a body pro pozici „place“. Pro otestování dosahu nástroje robota ke zvoleným bodům lze použít funkci tzv. Reach Test neboli dosahový test. V případě negativních výsledků je možné upravit pozici robota pomocí funkce „Smart Place“ neboli „Chytré umístění“, které na základě definování pozic pro dosažení robota zvolí jeho vhodné umístění. Po správném nastavení všech výše zmíněných parametrů je možné provést samotnou operaci. Průběh jednotlivými pozicemi může být sledován pomocí tzv. Path Editoru neboli editoru cesty. Pozice robota je v tomto editoru možné měnit, přidávat či odebrat a dosahovat tak nižšího operačního času. Pro zajištění plynulé návaznosti operací slouží tzv. Sequence Editor neboli sekvenční editor. V případě operací nakládky i vykládky bylo vytvořeno vždy 20 operací „Pick and place“. Ukázka možných operací je znázorněna na obrázku 4-3.

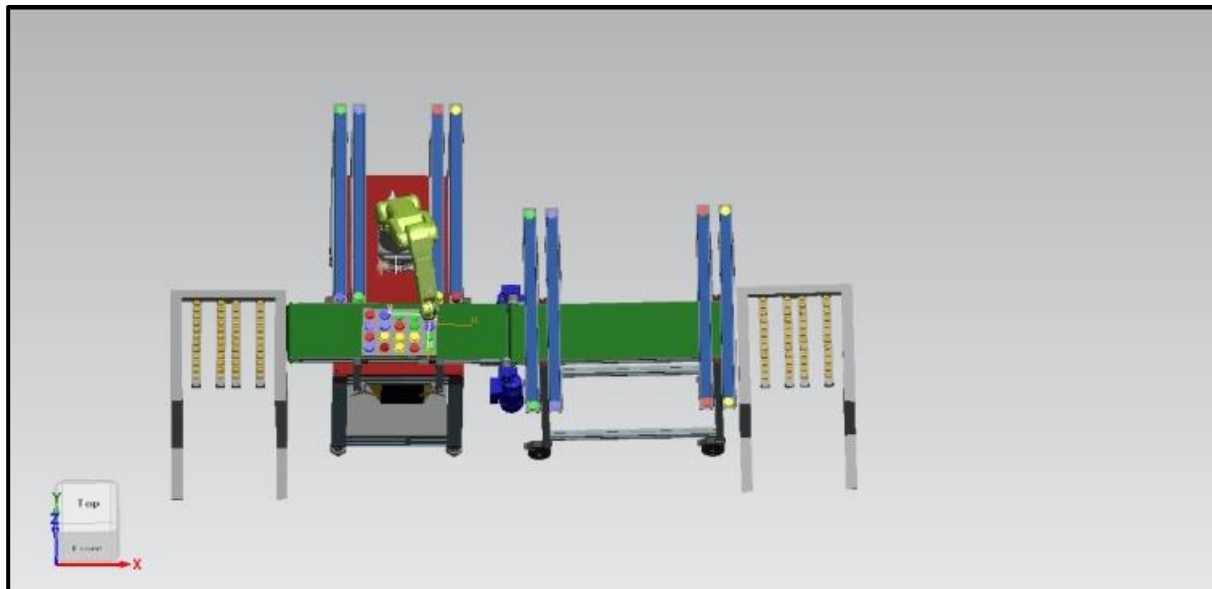


Obrázek 4-3: Ukázka možných operací

Nyní následuje popis provedených simulací odpovídajících jednotlivým dílčím experimentům.

Simulace 1 –Dílčí experiment – Naplnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)

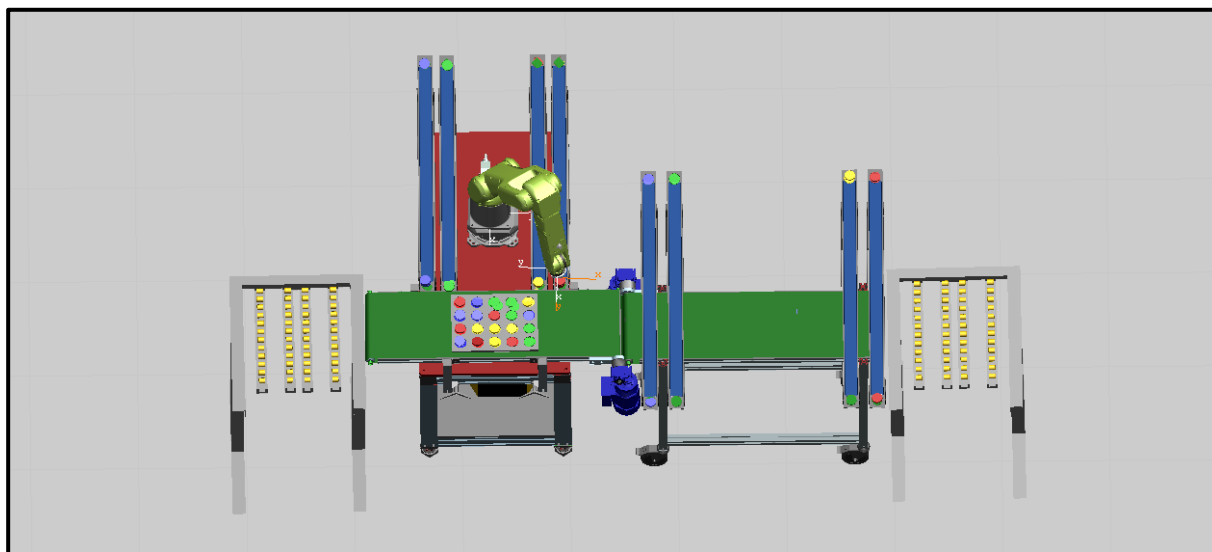
Simulace č. 1 znázorňuje robotické pracoviště, na němž jsou jednotlivé puky odebírány robotem z jednotlivých zásobníků a umisťovány na paletku dle pořadí (princip vysvětlen v podkapitole 4.1). Náhled umisťování puku na paletku lze vidět na obrázku 4-4.



Obrázek 4-4: Naplnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)

Simulace 2 –Dílčí experiment – Naplnění paletky dle barev (robotické pracoviště)

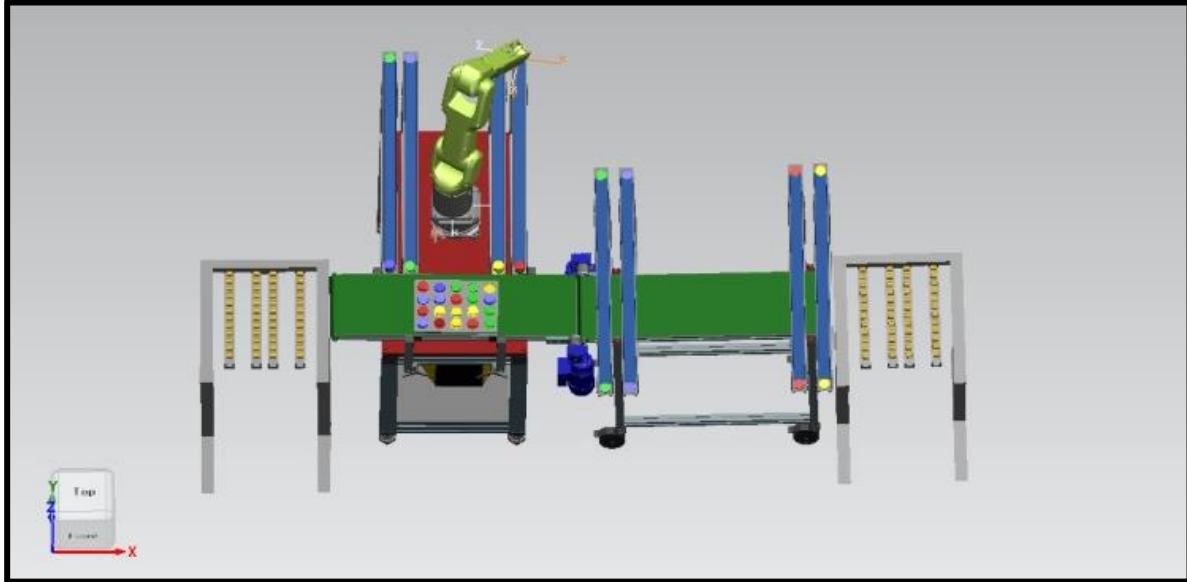
Simulace č. 2 také znázorňuje robotické pracoviště, zde jsou puky odebírány ze zásobníků dle jednotlivých barev a následně umisťovány na paletku ve stanoveném pořadí. Nejprve budou umístěny všechny modré puky, dále zelené, červené a jako poslední žluté. Náhled simulace lze vidět na obrázku 4-5.



Obrázek 4-5: Naplnění paletky dle barev (robotické pracoviště)

Simulace 3 – Dílčí experiment – Vyprázdnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)

Simulace č. 3, která byla provedena také na robotickém pracovišti znázorňuje vyprázdnění paletky robotem dle pořadí (princip vysvětlen v podkapitole 4.1) a umístění do zásobníků. Náhled simulace, kdy robot umísťuje puk do zadní části zásobníku lze vidět na obrázku 4-6.



Obrázek 4-6: Vyprázdnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)

Simulace 4 – Dílčí experiment – Vyprázdnění paletky dle barev (robotické pracoviště)

Simulace č.4, tedy poslední experiment na virtuálním robotickém pracovišti znázorňuje vyprázdnění paletky robotem dle barev a následné umístění do zásobníků. Náhled této simulace, kdy robot přesouvá puk do zadní části zásobníku lze vidět na obrázku č. 4-7.



Obrázek 4-7: Vyprázdnění paletky dle barev (robotické pracoviště)

Tvorba simulací na manuálním pracovišti

Pro tvorbu operací na manuálním pracovišti je využíván nástroj Process Simulate Human. Prvním krokem, který bylo nutné udělat je zvolení příslušného modelu člověka dle našich požadavků. Přes záložku Human – Create Human si vybereme, jestli chceme ženu nebo muže, příslušnou národnost a je možné nastavit i výšku, váhu nebo barvu vlasů. V našem konkrétním případě byl zvolen model muže.

Po importu člověka do prostředí pracoviště si ho pomocí funkce „Placement Manipulator“ vhodně umístíme na manuální pracoviště. Je také nutné zvolit způsob úchopu puku, který nadefinujeme v záložce Human Posturing – Hands. Poté je možno začít vytvářet konkrétní simulace v záložce Task Simulation Builder. Zde je možné pracovat s příkazy jako Go, Get, Put, Position, Pose, Regrasp, Stand, Sit, Wait, Touch a Apply Force. Pro naše operace nakládky a vykládky bylo využito příkazů Get, kde člověk rukou uchopil puk ze zásobníku nebo z paletky, dále přes příkaz Position byla nastavena cesta pohybu ruky na konkrétní místo a příkazem Put byl puk z ruky puštěn do zvoleného místa na paletce nebo v zásobníku. Pohled na virtuálního operátora je znázorněn na obrázku 4-8.



Obrázek 4-8: Ukázka operátora (manuální pracoviště)

Simulace 1 – Dílčí experiment – Naplnění paletky dominantní rukou dle pořadí (manuální pracoviště)

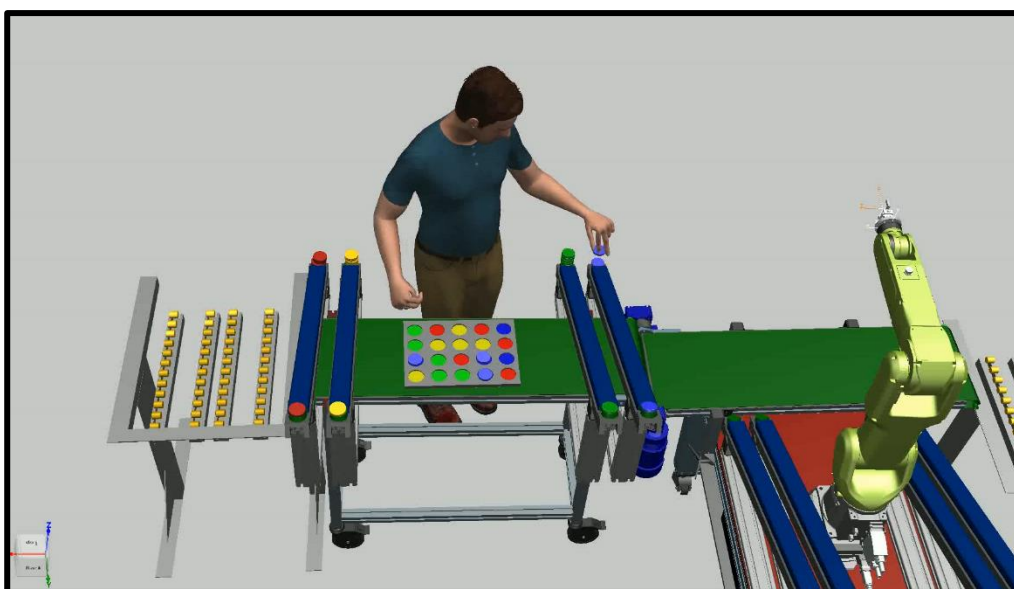
Simulace č. 1 představuje dílčí experiment, ve kterém na virtuálním manuálním pracovišti operátor provádí naplnění paletky jeho dominantní rukou dle pořadí (princip vysvětlen v podkapitole 4.1). Náhled vytvořené simulace lze vidět na obrázku 4-9. Byly zde využity příkazy obsažené v Process Simulate Human jako Get (vzít) a Put (umístit).



Obrázek 4-9: Naplnění paletky dle pořadí (manuální pracoviště)

Simulace 2 – Dílčí experiment – Naplnění paletky dle barev (manuální pracoviště)

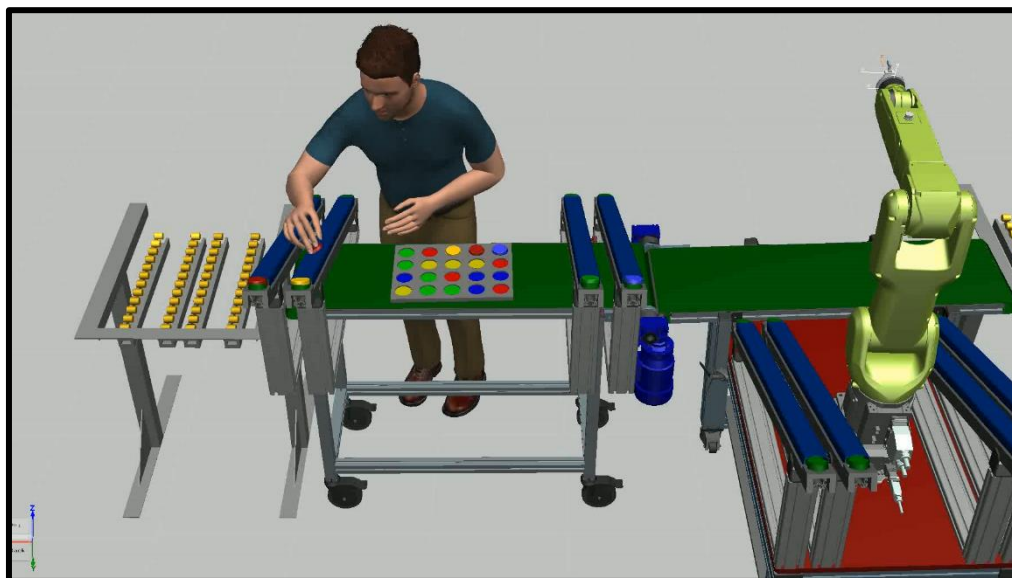
Simulace č. 2 představuje dílčí experiment, ve kterém na virtuálním manuálním pracovišti operátor provádí naplnění paletky oběma rukama dle barev. Náhled vytvořené simulace lze vidět na obrázku 4-10. Byly zde využity také příkazy Get (vzít) a Put (umístit).



Obrázek 4-10: Naplnění paletky dle barev (manuální pracoviště)

Simulace 3 – Dílčí experiment – Vyprázdnění paletky dle pořadí (manuální pracoviště)

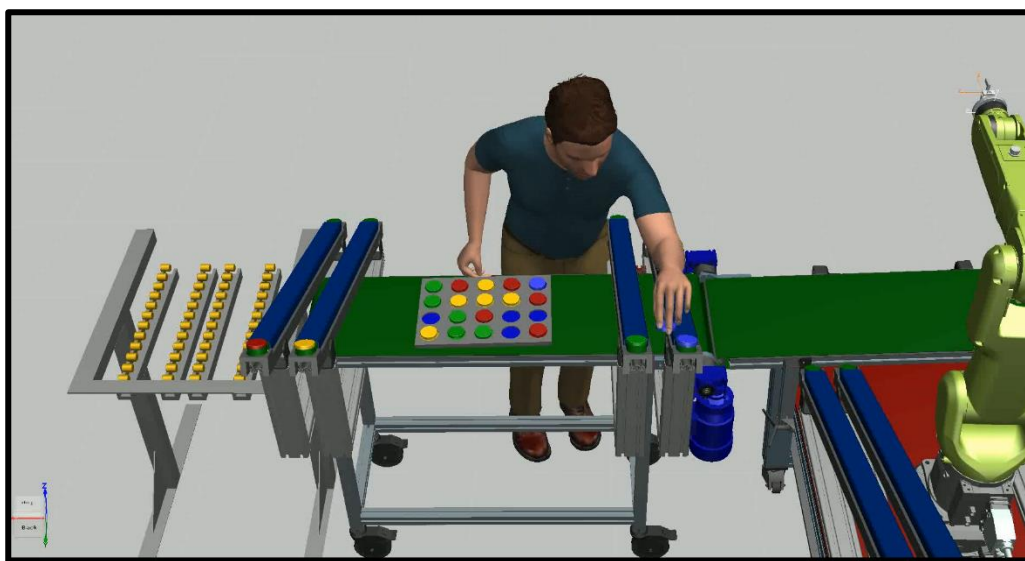
Simulace č. 3 představuje dílčí experiment, ve kterém na virtuálním manuálním pracovišti operátor provádí vyprázdnění puků z paletky do jednotlivých zásobníků, a to dle pořadí dominantní rukou (princip vysvětlen v podkapitole 4.1). Náhled vytvořené simulace lze vidět na obrázku 4-11. Byly zde využity příkazy obsažené v Process Simulate Human jako Get (vzít) a Put (umístit).



Obrázek 4-11: Vyprázdnění paletky dle pořadí (manuální pracoviště)

Simulace 4 – Dílčí experiment – Vyprázdnění paletky dle barev (manuální pracoviště)

Simulace č. 4 představuje dílčí experiment, ve kterém na virtuálním manuálním pracovišti operátor provádí vyprázdnění puků z paletky do jednotlivých zásobníků, a to dle barev oběma rukama. Náhled vytvořené simulace lze vidět na obrázku 4-12. Byly zde využity příkazy obsažené v Process Simulate Human jako Get (vzít) a Put (umístit).



Obrázek 4-12: Vyprázdnění paletky dle barev (manuální pracoviště)

4.3 Experimenty na reálném pracovišti

Na základě definovaných podmínek pro měření ve virtuálním pracovišti jsou zvoleny stejné podmínky měření na reálném pracovišti. Na obrázku 4-13 lze vidět reálné pracoviště, na kterém byly jednotlivé experimenty prováděny. V rámci reálných experimentů budou provedeny časové snímky, které budou dále zpracovány a vyhodnoceny dle metodiky REFA. Cílem je vyhodnocení jejich časové náročnosti a získání dat, která budou dále porovnatelná s totožnými experimenty z virtuálního prostředí SW Process Simulate. Bude zde provedena realizace procesu při provádění člověkem a robotem.



Obrázek 4-13: Pohled na reálné pracoviště

Pro přehlednost je zde uveden přehled všech probíhajících experimentů:

Experimenty na robotickém pracovišti:

1. Naplnění paletky dle pořadí.
2. Vyprázdnění paletky dle pořadí.
3. Naplnění paletky dle barev.
4. Vyprázdnění paletky dle barev.

Experimenty na manuálním pracovišti:

1. Naplnění paletky dominantní rukou dle pořadí
2. Vyprázdnění paletky dominantní rukou dle pořadí.
3. Naplnění paletky oběma rukama dle barev.
4. Vyprázdnění paletky oběma rukama dle barev.

U všech těchto experimentů jsou provedeny časové snímky, které jsou dále zpracovány a vyhodnoceny dle metodiky REFA, která je popsána níže.

Metodika REFA

Metodika REFA slouží k měření, zpracování požadovaných časů a konečnému vyhodnocení skutečných časů při výrobě. Data získáváme pozorováním a měřením, jedná se o tzv. časový snímek.

REFA je založená na komplexním, systematickém studiu podnikání jako živého organismu, jedná se o naprosto kompetentní, procesově orientovaný, organizační a podnikový vývoj s těžištěm v organizaci práce.

Stanovené časy jsou podle REFA časy určené pro pracovní procesy, které vykonává člověk nebo provozní prostředek. Stanovené časy u člověka obsahují základní časy, časy na odpočinek a poměrné časy; stanovené časy u provozního prostředku obsahují základní časy provozního prostředku a poměrné časy provozního prostředku.

V zásadě rozlišujeme dva druhy stanovených časů:

- Stanovené časy závislé na zakázce; vztahují se na jednu zakázku
- Stanovené časy nezávislé na zakázce; vztahují se na určitou jednotku množství

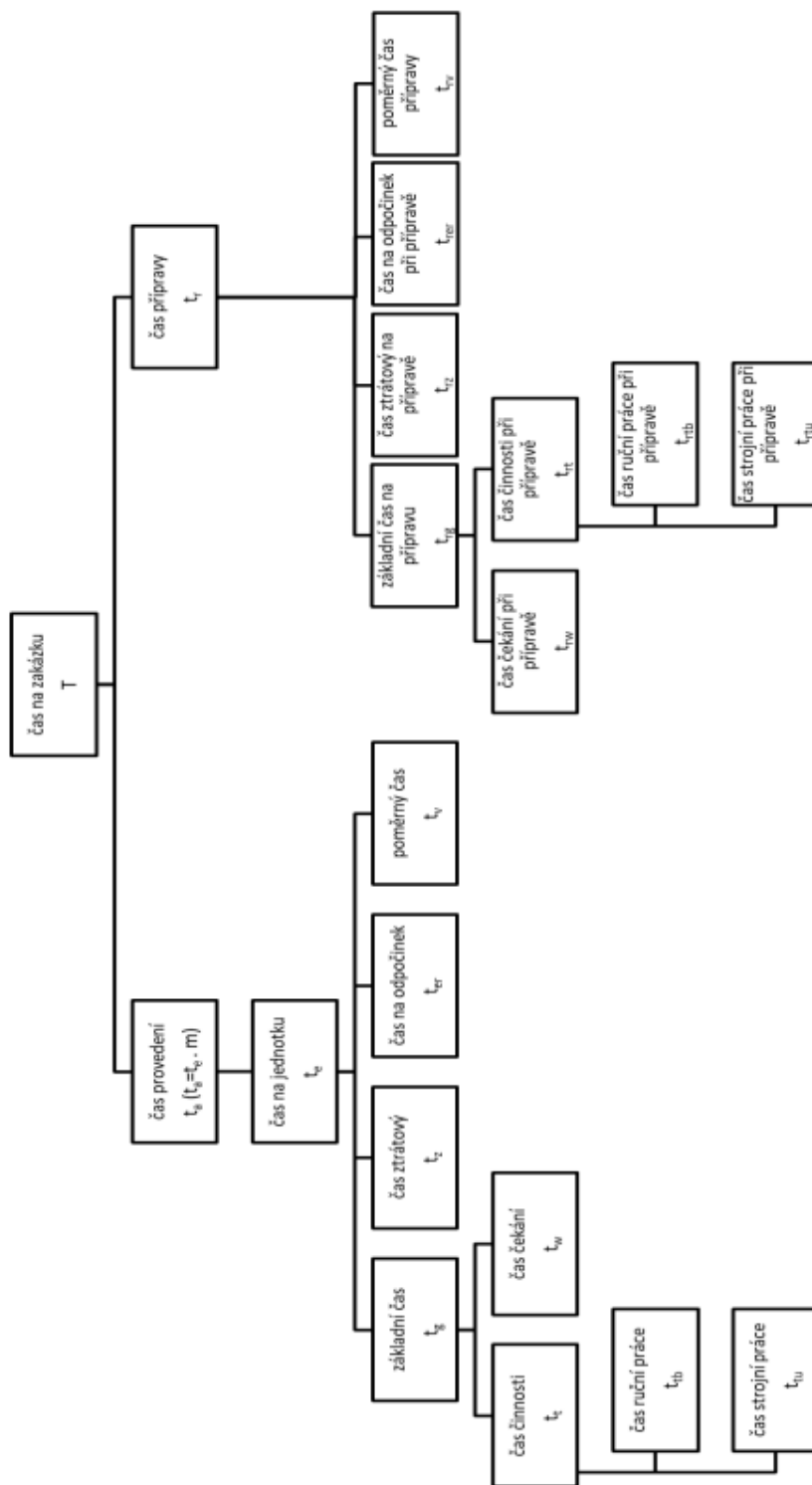
Skutečné časy jsou člověkem a provozním prostředkem skutečně potřebné časy pro provedení procesních úseků. Tyto časy mohou být zachyceny jen přímým měřením pozorovatele na pracovišti nebo přímo pracovníkem nebo provozním prostředkem. Zvláštním případem je zjišťování o potřebách časů dotazováním pracovníka, který předtím proces vykonával.

Určené časy jsou časy odvozené z již dříve zachycených skutečných časů. Tyto skutečné časy jsou vyhodnoceny a určitou formou, např. ve formě tabulkových časů systému předem určených časů, znázorněny jako časy určené. Tyto určené časy jsou užity tak, že z času menších provozních úseků jsou skládány určené časy větších pracovních procesů. Určené časy mohou být tímto způsobem stanoveny jak pro skutečně provedené procesy, tak také pro procesy plánované.

Čas na zakázku je složen z přesně určitelných procesů a z nepřesně určitelných procesních úseků – stanovené časy. Stanovené časy jsou, podle metodiky REFA, časy určené pro pracovní procesy vykonávané člověkem. Obsahují základní časy, časy na odpočinek a poměrové časy.

Stanovení času zakázky – je stanoveno na základě nejčastějšího případu v praxi = zakázka se skládá z přípravy a provedení. Provedení obsahuje m opakování stejného postupu. [34,35]

Na obrázku 4-14 je znázorněna skladba časů dle metodiky REFA.



Obrázek 4-14: Skladba časů dle metodiky REFA [34]

Časový snímek jednotlivce

Časové snímky spočívají v popisu pracovního systému, zvláště pracovního postupu, pracovních metod, pracovních podmínek, vztažných výkonů, vztažných množství a skutečných časů pro jednotlivé úseky procesu. Jako jednotky času se používají tzv. Hunderte minuty = setiny minut (100 HM = 1 min). Jsou to přesnější, detailnější a snadnější přepočty zejména pro sériovou a hromadnou výrobu. [34]

V případě této práce byly u časových snímků jako jednotky času zvoleny sekundy.


Při měření je důležité se zaměřit na následující:

- Kdy – datum, čas
- Kde – pracovní místo
- Jak – způsob měření
- Proč – za jakým účelem
- Kdo – podpis

Zásady při provádění měření

1. Pozorovatel musí být odborně schopný rozčlenit a posoudit pracovní proces. Musí ovládat techniku časového snímku a v případě nutnosti i posouzení stupně výkonu.
2. Pokud jde o záznam dat přímo na pracovišti, měl by se pozorovatel postavit tak, aby pozorovaného pracovníka co možná nejméně ovlivňoval, ale aby měl zároveň dobrý výhled.
3. Pozorovaný pracovník musí být zaškolený.
4. Během záznamu času je důležité zamezit diskuzím, aby bylo možno plynule sledovat průběh jednotlivých operací.
5. Je třeba předem informovat jak nadřízeného daného pracovního místa, tak i pracovníka, na kterém bude měření času prováděno.
6. Formulář časového snímku představuje listinný doklad, a proto se v něm nesmí nic gumovat. Zápisy musí být provedeny psací tužkou, která je odolná proti vymazání.
7. V neposlední řadě musí být zajištěno dodržení všech bezpečnostních předpisů. [34]

Vycházíme z následujícího obecného formuláře uvedeného na obrázku 4-15, na obrázku 4-16 lze vidět ukázkou formuláře pro plynulou chronometráž.

Formulář časového snímku						Schránka č.							
						List č: z listu							
Pracovní úkol:													
Zakázka č.		Množství m pracovní zakázky		Oddělení		Nákladové středisko							
Datum časového snímku		začátek	čas	konec	čas	Doba trvání							
		Množství			Množství								
						Skladba času na jednotku		Čas v minutách	původ				
						Základní čas t_g							
						Čas na oddech t_{er} $Z_{er} =$ %							
						Poměrný čas t_v $Z_v = 8$ %							
						Ostatní přírázky							
						Čas na jednotku t_{e_1}				0.00			
						$T_{e_1} / t_{e_{100}} / t_{e_{1000}}$ v min/h							
						Přípravný čas t_r v min/h							
						Pracovní postup a pracovní metoda:							
						Předmět práce (vstup)	Označení	Materiál	Stav na vstupu		Výkres č.	Materiál č.	Rozměry, hmotnost
viz. kusovník													
Člověk	Jméno	Osobní číslo	muž	žena	věk	Doba provádění							
				x		Podobných úkolů z koumaného úkolu							
Provozní prostředek	Označení, typ	Počet	Číslo pracoviště	Technické údaje, stav									
Vlivy okolí						Odměňování							
Poznámky:													
Jakost výsledku práce													
Zpracoval	Přezkoušel		Platnost od		do								

Obrázek 4-15: Formulář časového snímku [34]

Formulář pro plynulou chronometráž											proHeq				
datum:		list č.		pracoviště		pracoviště		pracoviště		pracoviště		pracoviště			
jméno pozorovatele		Zv		Zer		směna		pracoviště		pracoviště		pracoviště			
celkový popis činnosti:															
výrobek, zakázka:															
pracoviště linky (popis)		pracoviště linky (popis)		pracoviště linky (popis)		pracoviště linky (popis)		pracoviště linky (popis)		pracoviště linky (popis)		pracoviště linky (popis)			
MB začátek	MB konec	MB začátek	MB konec	MB začátek	MB konec	MB začátek	MB konec	MB začátek	MB konec	MB začátek	MB konec	čas	mn	L ₀	t ₀
1		1		1		1		1		1					
2		2		2		2		2		2					
3		3		3		3		3		3					
4		4		4		4		4		4					
5		5		5		5		5		5					
6		6		6		6		6		6					
7		7		7		7		7		7					
8		8		8		8		8		8					
9		9		9		9		9		9					
10		10		10		10		10		10					
11		11		11		11		11		11					
12		12		12		12		12		12					
13		13		13		13		13		13					
14		14		14		14		14		14					
15		15		15		15		15		15					
16		16		16		16		16		16					
17		17		17		17		17		17					
18		18		18		18		18		18					
19		19		19		19		19		19					
20		20		20		20		20		20					
tg		tg		tg		tg		tg		tg					
te		te		te		te		te		te					

Obrázek 4-16: Formulář pro plynulou chronometráž [34]

4.4 Vlastní měření a vyhodnocení – simulační experimenty

Obsahem této podkapitoly je vlastní měření a zpracování výsledků experimentu. Nejprve je kapitola zaměřena na výsledky dílčích experimentů vycházejících ze simulací ve virtuálním prostředí.

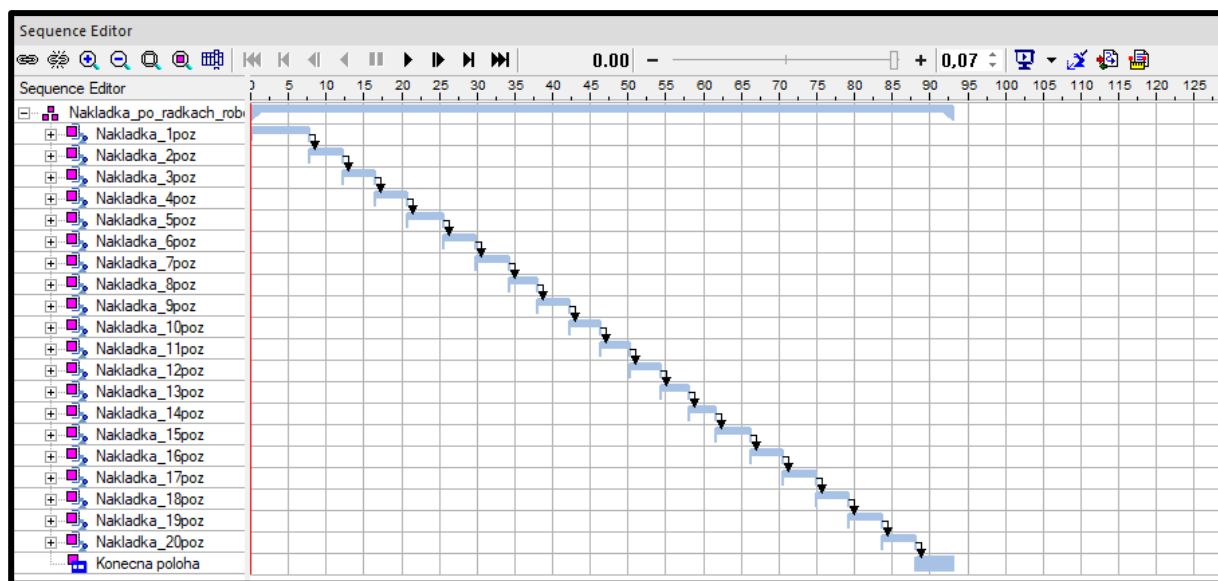
Jednotlivé dílčí simulační experimenty byly spuštěny v prostředí SW Tecnomatix Process Simulate. Ke zjištění jednotlivých časových hodnot byly využity funkce tohoto SW nástroje, konkrétně Sequence Editor a Path Editor, vychází se zde z metodiky MTM.

MTM - neboli Methods Time Measurement je metodou předem stanovených časů, kdy jsou základním pohybům přiřazeny předem určené časy, získané na základě dlouhodobých měření práce.

Výchozím bodem pro časové hodnoty týkající se robotického pracoviště je nájezd kolaborativního robota do pozice pro focení paletky, konečným bodem je poté také nájezd do stejné pozice a to po provedení operace nakládky / vykládky. Smyslem volby těchto bodů (pozic) je jejich maximální identičnost s reálnými pozicemi na robotickém pracovišti.

Výchozím bodem pro časové hodnoty týkající se manuálního pracoviště je výchozí pozice člověka s horními končetinami podél těla, konečným bodem je poté identická pozice po provedení příslušných operací odpovídajícím konkrétnímu dílčímu experimentu. Smyslem bylo opět zachovat identičnost s reálným manuálním pracovištěm.

Princip odečtení těchto hodnot je uveden na příkladu prvního dílčího experimentu – *Simulace 1 – Dílčí experiment – Naplnění paletky dle pořadí (robotické pracoviště)*. Sequence Editor znázorňuje jednotlivé kroky operace a jejich sled, kdy je důležité zkontrolovat, že operace obsahuje všechny kroky v jejich správném pořadí. Náhled Sequence Editoru k dílčímu experimentu č. 1 je uveden na obrázku 4-17.



Obrázek 4-17: Náhled Sequence Editoru

Po kontrole jednotlivých dílčích kroků a jejich sledu lze přistoupit k Path Editoru, u kterého lze zkontrolovat typ jednotlivých činností, rychlost, typ pohybů, případné průjezdové body u robotického pracoviště a zejména časové hodnoty jednotlivých kroků operací a sumární časovou hodnotu za operaci jako celek. Náhled Path Editoru k dílčímu experimentu č. 1 je uveden na obrázku 4-18.

Attachment	X	Y	Z	RX	RY	RZ	Duration	OLP Comm...	Robot	Gun	C...	C...	External
							93.10						
							7.90		Fanuc_CR...				
							4.42		Fanuc_CR...				
							4.13		Fanuc_CR...				
							4.37		Fanuc_CR...				
							4.69		Fanuc_CR...				
							4.40		Fanuc_CR...				
							4.37		Fanuc_CR...				
							3.72		Fanuc_CR...				
							4.24		Fanuc_CR...				
							4.12		Fanuc_CR...				
							3.93		Fanuc_CR...				
							4.03		Fanuc_CR...				
							3.86		Fanuc_CR...				
							3.54		Fanuc_CR...				
							4.55		Fanuc_CR...				
							4.31		Fanuc_CR...				
							4.49		Fanuc_CR...				
							4.26		Fanuc_CR...				
							4.37		Fanuc_CR...				
							4.41		Fanuc_CR...				
							5.00						

Obrázek 4-18: Náhled Path Editoru

Výsledná časová hodnota týkající se dílčího experimentu č.1 (nakládka dle pořadí – robot) ve virtuálním prostředí je **93,10** sekund.

Stejným principem byl proveden odečet hodnot u všech zbývajících simulací – dílčích experimentů. Tyto výsledné hodnoty za všechny dílčí experimenty jsou znázorněny v tabulce 4-1 pro robotické pracoviště a v tabulce 4-2 pro manuální pracoviště.

Tabulka 4-1: Experimenty – robotické pracoviště

Experimenty - robotické pracoviště		
Experiment	Název činnosti	Čas (sec)
1	Nakládka dle pořadí	93,10
2	Vykládka dle pořadí	93,64
3	Nakládka dle barev	243,08
4	Vykládka dle barev	241,97

Tabulka 4-2: Experimenty – manuální pracoviště

Experimenty - manuální pracoviště		
Experiment	Název činnosti	Čas (sec)
1	Nakládka dle pořadí	31,91
2	Vykládka dle pořadí	70,72
3	Nakládka dle barev	31,07
4	Vykládka dle barev	71,40

4.5 Vlastní měření a vyhodnocení – experimenty na reálném pracovišti

Následují naměřené hodnoty časů operací nakládky a vykládky v rámci reálného pracoviště a jejich statistické vyhodnocení dle metodiky REFA.

Výchozím bodem pro časové hodnoty týkající se robotického pracoviště je nájezd kolaborativního robota do pozice pro focení paletky, konečným bodem je poté také nájezd do stejné pozice po provedení nakládky / vykládky. Smyslem volby těchto bodů (pozic) je jejich maximální identičnost s reálnými pozicemi na virtuálním robotickém pracovišti.

Výchozím bodem pro časové hodnoty týkající se manuálního pracoviště je výchozí pozice člověka s horními končetinami podél těla, konečným bodem je poté identická pozice po provedení příslušných operací odpovídajícím konkrétnímu dílčímu experimentu. Smyslem bylo opět zachovat identičnost s virtuálním manuálním pracovištěm.

Při tvorbě časového snímku byli pracovníci natáčeni na video a následně byly jednotlivé časy odečteny při vyhodnocování.

Statistické vyhodnocení časového snímku

U všech výše uvedených měření operací nakládky i vykládky bylo provedeno statistické vyhodnocení. Dle metodiky REFA byl použit vzorec pro výpočet míry rozptylu ε . Pro činnost člověka a potřeby mzdového odměňování stanovuje REFA doporučený limit odchylky rozptylu $\pm 5\%$ což jinými slovy lze nazvat jako přesnost měření. V rámci experimentu bylo testováno 10 osob a u každého z nich proběhlo 10 náměrů nakládky i vykládky s jednou vybranou paletkou. Na robotickém pracovišti proběhlo 10 náměrů nakládky i vykládky, jednou dle pořadí a poté po barvách. Celkem bylo tedy na manuálním pracovišti provedeno 400 náměrů člověka a 40 náměrů robota.

Vzorce pro měření dle metodiky REFA

Níže jsou uvedeny vzorce, které budou dále použity pro vyhodnocení jednotlivých náměrů.

Standardní odchylka:

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

n = počet náměrů

$\sum (X_i - \bar{X})^2$ – výběrový rozptyl - Σ (čas náměru – sec) – (průměr všech náměrů – sec)

L_g – výkon pracovníka

Míra rozptylu:

$$\varepsilon = \frac{t}{\sqrt{n}} \times \frac{s}{L_g} \times 100 \quad (2)$$

ε míra rozptylu, či přípustná chyba

t konstantní veličina 1,96 pro Studentovo rozdělení

- $cv = \frac{s}{tz}$ variační koeficient
 s standardní odchylka
 tz (tg) průměrná doba cyklu (sec.)

V tabulkách č. 4-3 a 4-4 je uveden konkrétní příklad výpočtu u měření na manuálním pracovišti, kde probíhala nakládka puků na paletku dle pořadí.

Tabulka 4-3: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 1

Manuální pracoviště - Nakládka dle pořadí				
Začátek	Uchopení prvního puku			
Konec	Puštění posledního puku			
	Čas (sec.)	Množství	Lg	tg (sec.)
1	29,56	1	100%	29,56
2	30,45	1	100%	30,45
3	31,56	1	100%	31,56
4	29,45	1	100%	29,45
5	30,65	1	100%	30,65
6	29,54	1	100%	29,54
7	30,65	1	100%	30,65
8	29,54	1	100%	29,54
9	30,78	1	100%	30,78
10	30,45	1	100%	30,45
tg celkem				30,29

Tabulka 4-4: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 2

č. náměru	$\sum(X_i - \bar{X})^2$	
	(čas náměru [sec] – průměr všech náměrů [sec]) ²	
1	$(29.56-30.29)^2=$	0.5329
2	$(30.45-30.29)^2=$	0.0256
3	$(31.56-30.29)^2=$	1.29
4	$(29.45-30.29)^2=$	0.07056
5	$(30.65-30.29)^2=$	0.1296
6	$(29.54-30.29)^2=$	0.5625
7	$(29.56-30.29)^2=$	0.5329
8	$(30.78-30.29)^2=$	0.2401
9	$(30.89-30.29)^2=$	0.5329
10	$(30.45-30.29)^2=$	0.5328
Suma		5.4079

Níže je uveden příklad výpočtu standardní odchylky.

Standardní odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{10-1} \times 5,4079} = 0,6$$

Poté je zde uveden výpočet míry rozptylu, který v tomto případě vyšel **1,227 %**.

Míra rozptylu:

$$\varepsilon = \frac{1,96}{\sqrt{10}} \times \frac{0,724}{30,29} \times 100 = 1,227\%$$

Přehled měření časů a míry rozptylu

Níže je uveden celkový přehled měření časů a míry rozptylu, a to jak na manuálním pracovišti, tak i na robotickém pracovišti.

Manuální pracoviště

V následující tabulce 4–5 jsou znázorněny časy procesu nakládky a vykládky dle pořadí, kdy puky byly umístovány dominantní rukou daného pracovníka. Jsou zde uvedeny průměry časů tg pro každého pracovníka a také míry rozptylu. Jednotlivé náměry byly provedeny na 10 osobách a u každé z nich proběhlo celkem 10 měření, a to jak u nakládky, tak i u vykládky. Výsledné míry rozptylu u všech osob jsou validní, jelikož se všechny pohybují v přípustné toleranci $\pm 5\%$.

Tabulka 4-5: Přehled měření času a míry rozptylu – manuální pracoviště (část 1)

Pracovník	č. náměru	Měření času - manuální pracoviště			
		Nakládka dle pořadí - tg (sec.)	Rozptyl %	Vykládka dle pořadí -tg (sec.)	Rozptyl %
Aleš	1	30.29	1.227	34.91	2.137
Josef	2	28.27	2.328	31.44	3.077
Klára	3	29.56	3.254	32.03	2.364
Daniël	4	30.03	2.072	30.73	1.762
Adam	5	26.80	3.519	30.63	1.098
Alena	6	27.67	2.793	30.64	1.875
David	7	30.75	2.813	27.98	3.455
Tomáš	8	29.72	3.603	33.39	3.525
Kateřina	9	28.84	2.581	31.67	2.871
Barbora	10	29.22	3.245	33.25	3.504

V následující tabulce 4-6 jsou znázorněny časy procesu nakládky a vykládky dle barev, kdy puky byly umístovány oběma rukama daného pracovníka. Jsou zde uvedeny průměry časů tg pro každého pracovníka a také míry rozptylu. Jednotlivé náměry byly provedeny na 10 osobách a u každé z nich proběhlo celkem 10 měření, a to jak u nakládky, tak i u vykládky. Výsledné míry rozptylu jsou až u jedné osoby validní (zkonzultováno s odborníkem z katedry, měření lze považovat za validní), jelikož se pohybují v přípustné toleranci $\pm 5\%$.

Tabulka 4-6: Přehled měření času a míry rozptylu – manuální pracoviště (část 2)

Pracovník	č. náměru	Měření času - manuální pracoviště			
		Nakládka dle barev -tg (sec.)	Rozptyl %	Vykládka dle barev -tg (sec.)	Rozptyl %
Aleš	1	29.33	1.893	32.19	1.763
Josef	2	23.95	4.143	30.52	4.38
Klára	3	28.83	2.055	27.54	3.531
Daniël	4	24.45	2.418	28.85	2.584
Adam	5	23.98	2.791	29.41	2.687
Alena	6	25.23	3.778	29.23	3.081
David	7	29.57	3.32	27.93	3.825
Tomáš	8	28.99	3.228	28.77	3.309
Kateřina	9	24.46	5.972	25.61	5.812
Barbora	10	27.50	3.421	26.68	4.169

Robotické pracoviště

V následující tabulce 4-7 jsou znázorněny časy, které byly měřeny na robotickém pracovišti. V tabulce jsou uvedeny procesy nakládky a vykládky dle pořadí a také procesy nakládky a vykládky dle barev. Je zde uvedeno všech 10 měření robota u každého procesu a také následné míry rozptylu. Všechny výsledné míry rozptylu se dají považovat za validní, jelikož se pohybují v přípustné toleranci $\pm 5\%$.

Tabulka 4-7: Přehled měření času a míry rozptylu – robotické pracoviště

Číslo měření	Měření času - robotické pracoviště			
	Nakládka dle pořadí	Vykládka dle pořadí	Nakládka dle barev	Vykládka dle barev
1	90.56	239.42	90.65	239.87
2	90.47	239.55	90.54	239.54
3	89.87	238.45	90.55	239.58
4	89.47	238.55	90.23	238.47
5	90.52	239.45	90.45	239.84
6	90.45	239.66	90.47	239.56
7	90.65	238.25	90.25	239.54
8	90.36	238.45	90.16	239.41
9	90.45	239.44	90.48	239.48
10	90.32	239.55	90.36	239.78
tg (sec.)	90.31	239.07	90.41	239.507
Rozptyl	0.250%	0,147%	0.108%	0.102%

Míra chybovosti

Míra chybovosti u robota je téměř nulová. Z naměřených časových snímků bylo zjištěno, že robot občas špatně uchopí daný puk, či mu při přenosu vyklouzne. Řešením by bylo zajištění prstů kolaborativního chapadla tak, aby bylo zvýšeno tření mezi pukem a chapadlem, což by mohlo tento problém minimalizovat, či úplně eliminovat. Hodnocení chybovosti je však nad rámec práce, dále se jím již zabývat nebude, protože je soustředěna na samotnou realizaci procesu.

U jedné osoby na manuálním pracovišti dosáhla míra rozptylu či přípustná chyba více než 5 % (riziko chybovosti) a to konkrétně u procesu nakládky a vykládky dle barev oběma rukama. Respondent měl problém z důvodu malého vzrůstu a náročnosti na koordinaci a soustředěnost, z toho důvodu docházelo k chaotickému střídání rukou a výběru špatné varianty barvy puku. To poté vyústilo v časovou prodlevu, která se projevila v celkové míře rozptylu, která zde byla lehce překročena.

Závěrečné vyhodnocení a porovnání bude obsaženo v následující kapitole.

5 Závěrečné vyhodnocení

Cílem práce bylo, jak vyplývá z názvu práce, porovnání identického procesu člověka a kolaborativního robota s využitím SW Tecnomatix Process Simulate. Bylo navrženo celkem osm různých dílčích experimentů. K těmto dílčím experimentům byly vytvořeny odpovídající simulace operací nakládky a vykládky ve virtuálním prostředí. Následovalo provedení identických dílčích experimentů na reálném pracovišti s využitím metodiky REFA pro jednotlivé časové studie.

Celkem bylo provedeno 8 simulačních experimentů a 8 reálných experimentů, konkrétně tyto:

Manuální pracoviště:

1. Operace nakládky dle pořadí (dominantní ruka)
2. Operace vykládky dle pořadí (dominantní ruka)
3. Operace nakládky dle barev (obě ruce)
4. Operace vykládky dle barev (obě ruce)

Robotické pracoviště

1. Operace nakládky dle pořadí
2. Operace vykládky dle pořadí
3. Operace nakládky dle barev
4. Operace vykládky dle barev

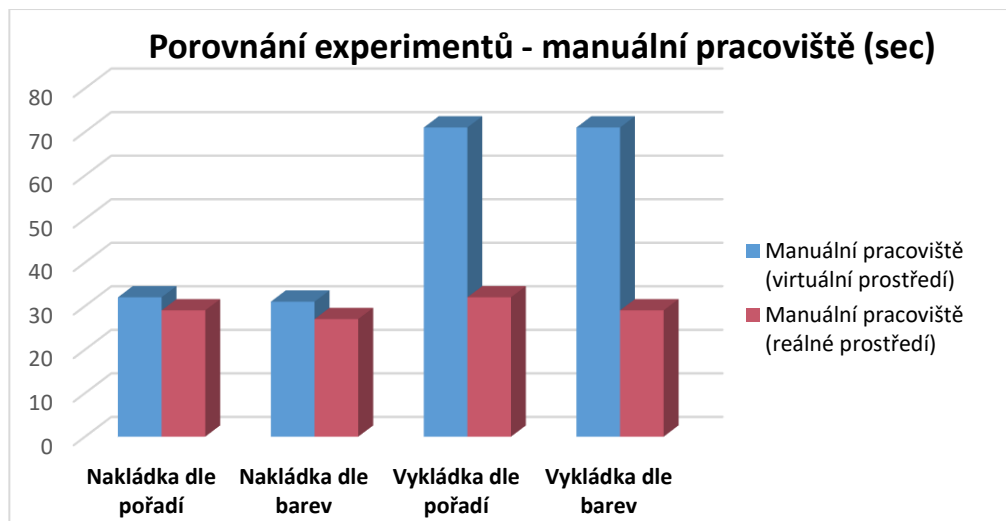
Následuje vyhodnocení jednotlivých dílčích experimentů, týkajících se porovnání reálných a virtuálních časových hodnot.

Naměřené časové hodnoty za jednotlivé dílčí experimenty vztažené jak k simulacím, tak i k reálnému měření na manuálním pracovišti jsou souhrnně uvedeny v tabulce 5-1 a zobrazeny v grafu 5-1.

Tabulka 5-1: Porovnání experimentů – manuální pracoviště

Porovnání experimentů - manuální pracoviště				
Experiment	Činnost	Virtuální pracoviště	Reálné pracoviště	Rozdíl časů
1	Nakládka dle pořadí	34,90 sec	30,11 sec	4,79sec
2	Vykládka dle pořadí	70,70 sec	31,66 sec	39,04 sec
3	Nakládka dle barev	31,07 sec	26,62 sec	4,45 sec
4	Vykládka dle barev	71,40 sec	28,67 sec	42,73 sec

Graf 5-1: Porovnání experimentů – manuální pracoviště



Z uvedených časových hodnot vyplývá, že rozdíly časů naměřených na manuálním pracovišti ve virtuálním i reálném prostředí u procesu nakládky jsou minimální. To odpovídá dobré vypovídací schopnosti SW Process Simulate. Mírné odchylky jsou způsobeny rozdílnou skladbou pracovníků na reálném pracovišti.

Naopak rozdíly časů, které byly naměřeny na manuálním pracovišti ve virtuálním i reálném prostředí u procesu vykládky jsou zcela odlišné. To je způsobeno tím, že v SW Process Simulate Human lze nastavovat pouze rychlostní hodnoty pro činnosti chůze a úchopu, nikoliv však pro předklon. Ten je zde dle metody MTM pevně časově daný a započítává se tak čas, jako kdyby se pracovník ohýbal až na zem, nikoliv jen do mírného předklonu. To je podrobněji znázorněno v následujících reportech ze SW Tecnomatix Process Simulate. Výstupy byly konzultovány s odborníkem z katedry i s odborníkem z firmy Siemens.

Report metody MTM vygenerované ze SW Process Simulate pro operaci nakládky dle barev lze vidět na obrázku 5-1. Zde bylo využito zejména časy pro operace Reach a Grasp, případně Walk (chůze). Celkový čas vyšel na 34,9 s, což je minimální odchylka od měření na reálném pracovišti.

Total Simulation Duration: 34.9s

Jack			
Task	Action	Duration (s)	Code
Get_puk_zluty_6_1_1_1_Jack		0.5	
	Reach	0.378	R12.493A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zluty_6_1_1_1_Jack		0.6	
	Reach	0.569	R24.513A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_Jack		0.7	
	Reach	0.63	R28.433A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_Jack		0.7	
	Reach	0.601	R26.578A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_1_Jack		0.7	
	Reach	0.601	R26.403A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_1_Jack		0.6	
	Reach	0.569	R24.412A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Go_to_target_Jack		1.1	
	Walk	1.132	W3FT
Get_puk_modry_3_1_Jack		1.8	
	Bend_And_Reach	1.688	B + R31.781A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_modry_3_1_Jack		1.9	
	Arise_And_Reach	1.778	AB + R28.690A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Go_to_target_Jack_1		1.1	
	Walk	1.133	W3FT
Get_puk_cerveny_1_1_3_4_1_1_1_1_1_Jack		0.5	
	Reach	0.378	R13.502A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_cerveny_1_1_3_4_1_1_1_1_1_Jack		0.8	
	Reach	0.688	R34.992A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Go_to_target_Jack_2		1.1	
	Walk	1.143	W3FT
Get_puk_modry_3_1_1_Jack		0.7	
	Reach	0.601	R26.969A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_modry_3_1_1_Jack		0.7	
	Reach	0.644	R31.403A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_zeleny_1_6_4_1_1_Jack		0.7	
	Reach	0.601	R27.283A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zeleny_1_6_4_1_1_Jack		0.6	
	Reach	0.569	R24.851A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Go_to_target_Jack_3		1.2	
	Walk	1.157	W3FT

Obrázek 5-1: MTM report Process Simulate – operace nakládky

Report metody MTM vygenerované ze SW Process Simulate pro operaci vykládky dle barev lze vidět na obrázku 5-2. Zde bylo využity časy pro operace Reach a Grasp, Walk a předklonění (symboly B,AB), u kterého se jak již bylo řečeno započítával čas, jako kdyby se pracovník ohýbal až na zem, nikoliv do mírného předklonu. To poté zpomalilo celý proces vykládky a celkový čas vyšel na 70,7 s, což je velká odchylka od měření na reálném pracovišti.

Total Simulation Duration: 70.7s

Task	Jack	Action	Duration (s)	Code
Get_puk_zluty_6_1_1_1_Jack			0.5	
		Reach	0.443	R17.865A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zluty_6_1_1_1_Jack			1.7	
		Bend_And_Reach	1.613	B + R24.350A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_1_Jack			1.9	
		Arise_And_Reach	1.778	AB + R28.316A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_1_Jack			1.7	
		Bend_And_Reach	1.674	B + R28.463A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_Jack			1.8	
		Arise_And_Reach	1.749	AB + R27.046A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zeleny_1_6_4_1_1_1_Jack_0			1.7	
		Bend_And_Reach	1.645	B + R27.882A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_modry_3_1_Jack			1.8	
		Arise_And_Reach	1.717	AB + R25.256A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Go_to_target_Jack			0.3	
		Walk	0.269	W1FT
Put_puk_modry_3_1_Jack			1.8	
		Bend_And_Reach	1.688	B + R31.077A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_cerveny_1_1_3_4_1_1_1_1_Jack			1.8	
		Arise_And_Reach	1.749	AB + R27.858A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_cerveny_1_1_3_4_1_1_1_1_Jack			2.9	
		Walk	1.137	W3FT
		Bend_And_Reach	1.674	B + R30.149A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_modry_3_1_1_Jack			1.9	
		Arise_And_Reach	1.778	AB + R30.323A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_modry_3_1_1_Jack			2.9	
		Walk	1.142	W3FT
		Bend_And_Reach	1.674	B + R28.402A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_zeleny_1_6_4_1_1_Jack			2	
		Arise_And_Reach	1.879	AB + R37.503A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_zeleny_1_6_4_1_1_Jack			1.8	
		Bend_And_Reach	1.76	B + R36.615A(r)
		Release	0.072	RL1(r)
Get_puk_modry_Jack			1.9	
		Arise_And_Reach	1.778	AB + R28.147A(r)
		Grasp	0.072	G1A(r)
Put_puk_modry_Jack			1.8	

Obrázek 5-2: MTM report Process Simulate – operace vykládky

Naměřené časové hodnoty za jednotlivé dílčí experimenty vztažené jak k simulacím, tak i k reálnému měření na robotickém pracovišti jsou souhrnně uvedeny tabulce 5-2 a zobrazeny v grafu 5-2.

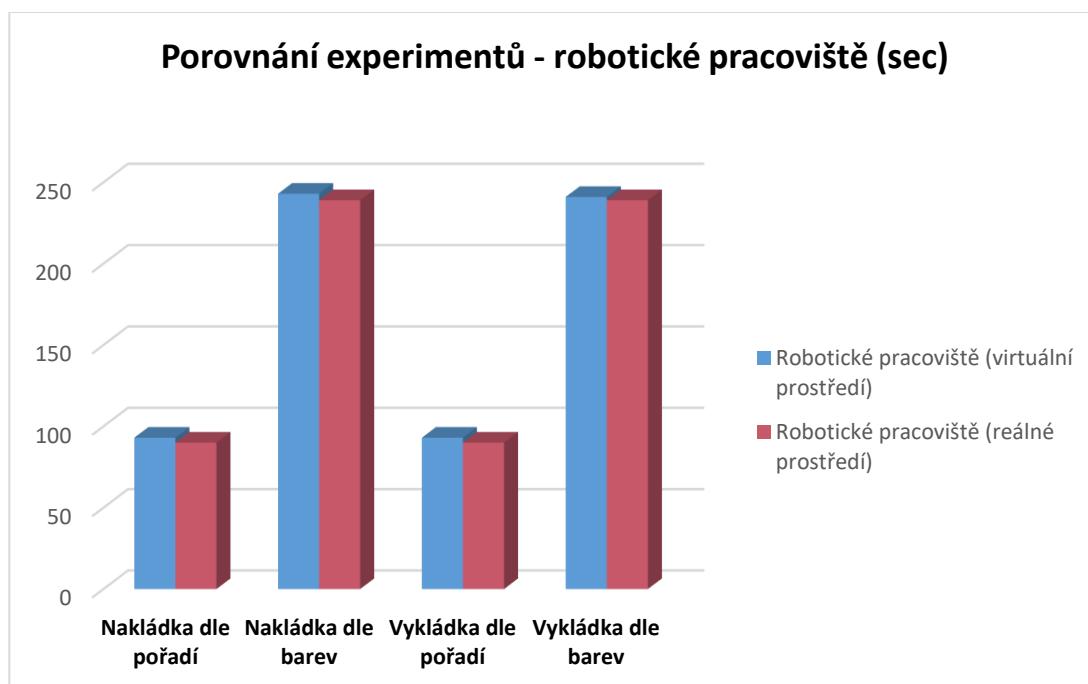
Z uvedených časových hodnot vyplývá, že rozdíly časů naměřených na manuálním pracovišti ve virtuálním i reálném prostředí u procesu nakládky i vykládky jsou minimální. To odpovídá dobré vypovídací schopnosti SW Process Simulate.

Minimální rozdíly mezi hodnotami u virtuálního a reálného pracoviště je předpokládáno, že jsou způsobeny nepatrnými nahodilostmi v reálném procesu, které jsou patrné i z rozptylu naměřených reálných hodnot. Důvodem tohoto rozptylu mohou být nepatrné vûle v zařízení (robot, dopravník). Dalším důvodem rozdílů mezi hodnotami reálného a virtuálního pracoviště může být nepatrné tření při odebírání puků, které nepatrně zpomalí reálného robota oproti dokonalému virtuálnímu procesu.

Tabulka 5-2: Porovnání experimentů – robotické pracoviště

Porovnání experimentů - robotické pracoviště				
Experiment	Činnost	Virtuální pracoviště	Reálné pracoviště	Rozdíl časů
1	Nakládka dle pořadí	93,10 sec	90,31 sec	2,79 se
2	Vykládka dle pořadí	243,08 sec	239,07 sec	4,01 sec
3	Nakládka dle barev	93,64 sec	90,41 sec	3,23 sec
4	Vykládka dle barev	241,97 sec	239,50 sec	2,47 sec

Graf 5-2: Porovnání experimentů - robotické pracoviště



Na základě vyhodnocení dílčích experimentů lze shrnout, že u většiny prováděných operací byly odchylky mezi reálným a virtuálním pracovištěm minimální. Avšak u dvou experimentů, konkrétně u operací vykládky na manuálním pracovišti došlo k zjištění výrazného rozdílu mezi virtuálními a reálnými hodnotami, které mohou negativním způsobem ovlivnit návrh budoucího pracoviště. V tomto konkrétním případě by například mohlo být rozhodnuto o nerealizaci zhotovení reálného pracoviště z důvodu příliš dlouhých virtuálních časů vykládky, přičemž reálně by zhotovení pracoviště mohlo být výhodné. Z toho vyplývají následující doporučení.

Navrhovaná doporučení:

Pokud by se podobný proces realizoval ve firemní praxi, bylo by vhodné, aby si firma nejprve zkusila nasimulovat samotné pohyby na fiktivním pracovišti. Na základě zjištěných odchylek by poté bylo možné proces dále odladit a případně navrhnout a realizovat reálné pracoviště. Určitě zde ale není na místě důvěřovat samotnému software, případně při zjištění problémů je vhodné se obrátit na výrobce SW.

Na základě zjištění velkých časových rozdílů ve virtuálním prostředí v porovnání s reálným prostředím u operací vykládky na manuálním pracovišti by bylo dobré, aby do budoucna bylo vylepšeno nastavení v software Process Simulate Human. Kvůli pevně danému času u činnosti předklonu, který započítává, jako kdyby se pracovník ohýbal až na zem nelze relevantně porovnávat operace, kde bude pracovník vykonávat mírný předklon na pracovišti ve virtuálním prostředí s touto činností v reálném prostředí.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnání modelu v programu Tecnomatix Process Simulate s reálným robotizovaným pracovištěm. Teoretická část byla zaměřena nejprve na charakteristiku automatizace a robotizace, byly zde popsány základní pojmy, které se týkaly této oblasti. Dále zde byl uveden popis historie automatizace, jejích jednotlivých typů a dále také průmyslové roboty a kolaborativní roboty, se zdůrazněním jejich rozdílů.

Druhou kapitolou byl přiblížen software Tecnomatix Process Simulate, ve kterém byly popsány jeho jednotlivé programy, s hlavním zaměřením na program Tecnomatic Process Simulate a Tecnomatix Process Simulate Human. Ty byly klíčové pro zpracování simulačních experimentů.

V rámci praktické části byl upraven stávající SW model pracoviště, který vycházel z již zpracovaného základního modelu a bylo potřeba jej aktualizovat a zpřesnit dle reálných podmínek a specifikací pracoviště. Následně byl vložen do prostředí simulačního programu Tecnomatix Process Simulate pro zpracování simulačních experimentů.

Na tomto modelu byly provedeny simulační experimenty v rámci robotického a manuálního pracoviště. Následně byly tyto experimenty provedeny i na reálném pracovišti v Laboratoři Průmyslu 4.0 na Západočeské univerzitě v Plzni. Ze všech experimentů byly naměřeny časové hodnoty, ve virtuálním prostředí pomocí funkcí SW Process Simulate a v reálném prostředí se naměřené hodnoty statisticky vyhodnotily pomocí metodiky REFA.

V závěrečném vyhodnocení byly porovnány časové hodnoty experimentů ve virtuálním prostředí s časy experimentů ve virtuálním prostředí. Na základě vyhodnocení dílčích experimentů lze shrnout, že u většiny prováděných operací byly odchylky mezi reálným a virtuálním pracovištěm minimální. Avšak u dvou experimentů došlo k zjištění výrazného rozdílu mezi virtuálními a reálnými hodnotami, které mohou negativním způsobem ovlivnit návrh budoucího pracoviště. Na základě velkých časových rozdílů na manuálním pracovišti u některých experimentů byla navržena doporučení.

Seznam použité literatury

- [1] CHLEBNÝ, Jan a kol. *Automatizace a automatizační technika: prostředky automatizační techniky*. Brno: ComputerPress, 2014. ISBN 978-80-251-3747-5.
- [2] POLÁŠEK, Patrik a KURKIN, Ondřej. *Tecnomatix Process Simulate – základy robotiky*. Plzeň: SmartMotion, 2013. ISBN 978-80-87539-19-4.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [4] *Industry 4.0* [online]. [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/prumysl-40-industry-40>
- [5] RŮŽIČKOVÁ, Veronika. *Od historie po současnost*. Datamix. Olomouc[online]. 2017 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <http://www.datamix.eu/blog/nova-prumyslova-revoluce-prumysl-4-0/>
- [6] *Robotizace* [online]. [cit.2021-12-07]. Dostupné z: <http://www.temex.cz/katalog/produktyaslužby/automatizace/108/robotizace.html>
- [7] PISKAČ, Luděk. *Průmyslové roboty*. 2. přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-278-0.
- [8] *Historický vývoj automatizace? Poznejte 12 zásadních dat* [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/historicky-vyvoj-automatizace-poznejte-12-zasadnich-dat/>
- [9] *Základní pojmy z automatizace: 32 termínů, které musíte znát* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/zakladni-pojmy-z-automatizace-32-terminu-kteremusite-znat/>
- [10] *Robot, Roboti, Robotika*. SVĚTVĚDY.CZ. [online]. 2017 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <http://svetvedy.cz/robot-roboti-robotika/>
- [11] IT SYSTEMS. *Robotická automatizace procesů rychle roste*. SystemOnline[online]. 2017[cit.2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/clanky/robotickaautomatizace-procesu-rychle-roste.ht>
- [12] BURIETA, Ján. *Simulace*. IPA Slovník [online]. 2007 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.ipaczech.cz/cz/ipa-slovník/simulace>
- [13] *Průmyslové roboty* [online]. 2019 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php?title=Prumyslove_roboty
- [14] HAVLÍČEK, Daniel. *Co jsou to SCARA roboty?* Factory Automation. Praha [online]. 2018 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/co-jsou-to-scararoboty/>

- [15] *SCARA Robots Make Fast, Repeatable And Precise Movements*. Automation World. Michigan, Chicago [online]. 2016 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.automationworld.com/article/technologies/robotics/scara-robots-make-fast-repeatable-and-precise-movements>
- [16] *Cartesian robots* [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <http://blog.robotiq.com/bid/63528/what-are-the-different-types-of-industrial-robots>
- [17] *Standardní víceúčelový robot s užitečným zatížením 50 kg* [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/řada-m-710/m-710ic-50>
- [18] ŽÁČEK, Michal. *Průmyslové roboty: Jaké jsou jejich druhy?* Factory Automation. Praha [online]. 2018 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/prumyslove-roboty-jake-jsou-jejich-druhy/>
- [19] *Rozdíly mezi kartézskými, šestiosými a SCARA roboty*. E-konstruktor. Praha [online]. 2014 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/novinka/rozdil-y-mezikartezskymi-sestiosymi-a-scara>
- [20] *Delta*. AutoCont Control Systems. Moravská Ostrava [online] [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <http://www.accs.cz/produkty-mitsubishi-electric/roboty/delta>
- [21] MoFTaG – *Model-free flexible trajectory generation* [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <http://www.echord.info/wikis/website/moftag.html>
- [22] YuMi® photo gallery [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>
- [23] *Kolegové roboti – noví partáci na výrobní lince* [online]. 2016 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.roboticjournal.cz/archiv/core/ROBOTIC201601.pdf>
- [24] LEE, Doug. *Universal Robots' UR3 Makes Table-Top Automation Easy, Safe and Flexible*. World industrial reporter. New York, USA [online]. 2015 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://worldindustrialreporter.com/universal-robots-ur3-makes-table-top-automation-easy-safe-and-flexible>
- [25] KALÁB, Vladimír. *Trh s roboty roste. Kdo jsou hlavní výrobci?* [online]. 2019 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://roboticjournal.cz/clanky/2019-cislo-3-trh-s-roboty-roste-kdo-jsou-hlavni-vyrobci>
- [26] *Kolaborativní roboti společnosti Universal Robots*. Universal Robots A/S. Odense, Dánsko [online]. 2017 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/produkty/>
- [27] BERNIER, Catherine. *Different End Effectors on the Market*. Robotiq. Quebec, Kanada [online]. 2013 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/bid/65660/Different-End-Effectors-on-the-Marke>

- [28] BARTOŠÍK, Petr. *Bezpečnost kolaborativních robotů*. Automa. Děčín [online]. 2017 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11040.pdf
- [29] Digitální továrna Tecnomatix. AXIOM TECH.Zlín [online].2016[cit.2022-02-14]. Dostupné z: <http://axiomtech.cz/24751-digitalni-tovarna-tecnomatix>
- [30] Siemens PLM Software. Objevte Tecnomatix (Digitální továrnu) [online]. SRN: SIEMENS, 2016 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: http://www.plm.automation.siemens.com/cz_cz/products/tecnomatix/index.shtml
- [31] *Počítačová simulace pro optimalizaci výrobních systémů*[online]. 2020 [cit. 2022-02-12] Dostupné z: <http://www.zlinrobotics.cz/pocitacova-simulace>
- [32] KUKA ROBOTER GMBH. KUKA KR C2 / KR C3: Expert programming. 5.2. Augsburg, 2006, 203 s. [cit. 2022-05-13].
- [33] KUKA ROBOTER GMBH. KUKA Operating and Programming Instructions: For End User, KSS V5.2, V5.3, V5.4. 1.1. Augsburg, 2006, 124 s. [cit. 2022-05-13].
- [34] BUREŠ, Marek. Předmět ŘOP – Řízení a organizace práce, ZČU v Plzni, 2019
- [35] REFA – International Know-how. Seminare, Schulungen, Trainings & Ausbildungen. REFA [online]. Copyright © 2020 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://refa.de/en/>
- [36] BUREŠ, Marek. PIVODOVA, Pavlina. Comparison of Time Standardization Methods on the Basis of Real Experiment. *Procedia Engineering* [online]. 2015, 100, 466-474 [cit. 2022-02-13]. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.392.ISSN18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815004191>
- [37] BROUM, T.; POÓR, P.; BASL, J. *Role of Collaborative Robots in Industry 4.0 with Targeton Education in Industrial Engineering*. Katedra průmyslového inženýrství: Západočeská univerzita Plzeň,2019
- [38] Spolupracující průmyslový robot FANUC CR-7iA a CR-7iA/L – Fanuc. Object moved [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: fanuc.eu/cz/cs/roboty/stranka-filtrurobotu/spolupracujici-roboty/collaborative-cr7ial

Přílohy

Všechny níže uvedené přílohy jsou dostupné v elektronické podobě

Příloha č. 1: Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 2: Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 3 Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 4 Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 5 Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 6 Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 7 Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 8 Video soubor – Simulace Tecnomatix Process Simulate

Příloha č. 9: Příklad vyplněného časového snímku REFA u konkrétního pracovníka

Příloha č. 10 Hodnoty výpočtu míry rozptylu u konkrétního pracovníka