VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ AUTOMATICKÉ MONTÁŽE KROKOVÝCH MOTORŮ

VIRTUAL COMMISSIONING OF THE AUTOMATIC ASSEMBLY OF THE STEPPER MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Jakub Filip

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Mikuláš Szabari

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	**Bc. Jakub Filip**
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	**Ing. Mikuláš Szabari**
Akademický rok:	2021/22

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

Virtuální zprovoznění automatické montáže krokových motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student navrhne robotické pracoviště pro automatickou montáž krokových motorů NEMA velikosti 14, 17 a 23, a tento proces virtuálně zprovozní. Virtuální zprovoznění bude provedeno na některé z dostupných platforem.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v dané oblasti.
Rozbor řešené problematiky.
Vytvoření nejméně tří návrhů robotických pracovišť, jejich zhodnocení a výběr vhodné varianty na základě multikriteriální analýzy.
Výpočet taktu linky.
Virtuální zprovoznění.
Ekonomické zhodnocení.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá virtuálním zprovozněním robotického pracoviště, určeného k montáži dílů krokových motorů NEMA 14, 17 a 23. Teoretická část je věnována rešerši v oblasti průmyslové robotizace a virtuálního zprovoznění. Dále je proveden rozbor řešené problematiky, na jehož základě jsou navrženy varianty robotického pracoviště. Ty jsou následně podrobeny multikriteriální analýze, pomocí které je vybrán výsledný koncept. Ten je zpracován jako 3D model a virtuálně zprovozněn, díky čemuž je zjištěn výsledný takt linky.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the virtual commissioning of a robotic workplace designed for the assembly of parts of NEMA stepper motors 14, 17 and 23. The theoretical part is devoted to research in the field of industrial robotics and virtual commissioning. Furthermore, an analysis of the problem is performed, on the basis of which variants of the robotic workplace are proposed. Then, these are subjected to multi-criteria analysis, which is used to select the resulting concept. This concept is processed as a 3D model and virtually put into operation, thanks to the resulting line cycle is determined.

KLÍČOVÁ SLOVA

Virtuální zprovoznění, průmyslová robotizace, robotická montáž, krokový motor, RobotStudio

KEYWORDS

Virtual commissioning, industrial robotics, robotic assembly, stepper motor, RobotStudio

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FILIP, Jakub. *Virtuální zprovoznění automatické montáže krokových motorů*. Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140340. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Mikuláš Szabari.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Mikuláši Szabarimu za odborné vedení, trpělivost, ochotu a podnětné návrhy při jejím vypracování. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za podporu po dobu mého studia na VUT FSI v Brně.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 18. května 2022 ……

Filip Jakub

OBSAH

1 ÚVOD 15

2 MOTIVACE 17

3 POZNÁNÍ SOUČASNÉHO STAVU 19

3.1 Průmyslová robotizace 19
3.2 Metody programování průmyslových robotů 21
3.2.1 On-line programování 21
3.2.2 Off-line programování 22
3.3 Programovací jazyky průmyslových robotů 23
3.4 Virtuální zprovoznění 23
3.5 Simulační software pro robotická pracoviště 25
3.5.1 Univerzální software 26
3.5.2 Software výrobců průmyslových robotů 27

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY 29

4.1 Analýza zadané součásti 29
4.1.1 Popis krokového motoru 29
4.1.2 Montážní proces 30
4.2 Vybavení robotického šroubovacího systému 32
4.2.1 Podavač šroubů 32
4.2.2 Jednotka pro přívod šroubů 34
4.2.3 Přívod stlačeného vzduchu 35
4.2.4 Šroubovací hlava 36
4.2.5 Stanice pro výměnu nástrojů 39
4.2.6 Řídicí technika 39
4.2.7 Robot 40
4.3 Manipulace 42
4.3.1 Dopravníky 42
4.3.2 Chapadla 43
4.3.3 Senzorika 44
4.4 Řídicí systém 44
4.4.1 PLC 45
4.4.2 Robotický kontrolér 45

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ 47

5.1 Varianta A 48
5.2 Varianta B 49
5.3 Varianta C 50
5.4 Popis Ganntových diagramů a stanovení jeho vstupních dat 51
5.5 Porovnání jednotlivých variant 51

6 VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ 53

6.1 Popis a 3D model pracoviště 53
6.1.1 Dopravník 53
6.1.2 Přípravek 54
6.1.3 Robot 55
6.1.4 Šroubovací hlava 56
6.1.5 Podavač šroubů 57
6.1.6 Bezpečnostní a ovládací prvky 57

6.1.7 Výsledný 3D model pracoviště 59
6.1.8 Ergonomie pracoviště 59
6.1.9 Řízení pracoviště 60
6.2 Definování signálů a logiky pracoviště 61
6.2.1 Doprava materiálu 61
6.2.2 Šroubovací proces 65
6.2.3 Bezpečnostní okruh 65
6.2.4 Ovládání 66
6.3 Programování 66
6.3.1 Definování roviny pracovního objektu 66
6.3.2 Definování nástroje 67
6.3.3 Tvorba pozic a trajektorií robotu 68
6.3.4 Popis programu 68
6.4 Takt linky 71
7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 73
8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI 75
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 77
10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK 83
10.1 Seznam použitých symbolů a zkratek 83
10.2 Seznam obrázků 83
10.3 Seznam tabulek 86
11 SEZNAM PŘÍLOH 87

1 ÚVOD

Již od počátku lidstva se člověk snaží různé úkony zjednodušovat a zrychlovat. Tento trend se nevyhýbá ani výrobnímu průmyslu, který v současné době zažívá nebývalý rozkvět. Právě zmíněné skutečnosti nahrávají rychlému rozvoji v oblasti robotizace, která patří mezi neodmyslitelný článek mnoha výrobních procesů. Za krátkou dobu, kdy jsou robotizovaná pracoviště využívána, si vysloužila přívlastek neúnavného spolehlivého pomocníka, který je schopen pracovat i za člověku nepříznivých podmínek. V dnešní době lze tato pracoviště najít v aplikacích, kde by ještě donedávna byla vyhodnocena jako neefektivní nebo nerealizovatelná.

Počet instalovaných robotických pracovišť meziročně výrazně roste, což klade stále vyšší požadavky na jejich rychlé a bezproblémové aplikování. K tomuto účelu jsou vyvíjeny a využívány simulační programy pro virtuální zprovoznění. S jejich pomocí lze nejen odhalit konstrukční chyby v návrhu, ale i zkontrolovat správnost zvolených komponent a optimalizovat pracoviště. Díky možnosti připravit pracoviště ve virtuální podobě, je možné vyhnout se dalším nežádoucím nákladům, které by mohly, se zmiňovanými problémy, vzniknout.

Cílem této diplomové práce je návrh robotického pracoviště pro automatickou montáž krokových motorů NEMA 14, 17 a 23 od společnosti Nanotec. Rešeršní část je věnována poznatkům z oblasti průmyslové robotizace, programování robotů a simulačním softwarům pro jejich virtuální zprovoznění. V další kapitole je proveden systémový rozbor řešené problematiky, kde jsou na základě analýzy zadané součásti představena použitá zařízení pro montážní robotická pracoviště. Navazuje kapitola věnující se návrhu variant řešení, ve které je provedena i jejich multikriteriální analýza. Výsledek této analýzy dále určuje nejvhodnější variantu, která je zpracována jako 3D model a virtuálně zprovozněna v simulačním programu RobotStudio firmy ABB. Díky tomu lze mimo rovněž provést změření výsledného taktu linky. Práce je doplněna o ekonomické zhodnocení, kde je porovnána ruční a automatická montáž.

2 MOTIVACE

Stěžejním důvodem pro vybrání této diplomové práce byla možnost prohloubit a rozšířit své aktuální poznatky z oboru robotizace a automatizace. Jelikož se jedná o mladý a progresivní směr, je potřeba se v tomto ohledu neustále vzdělávat a zdokonalovat.

Technologie postupují mílovými kroky, což jde ruku v ruce i s automatizováním výrobních systémů. Ty mohou být reprezentovány jako menší zařízení a systémy, ale i velmi rozsáhlé komplikované linky v rozměru celých výrobních hal. Zde už pouhá představivost nedostačuje a je vhodné celý návrh virtuálně realizovat, z důvodu lepšího začlenění.

Virtuální zprovoznění je poměrně nový komplexní nástroj pro široké spektrum lidí, podílejících se na tvorbě robotického pracoviště. Díky nepřebernému množství funkcí lze odhalit různé konstrukční chyby, vytvořit layout pracovišť a v neposlední řadě ověřit jejich výrobní takt. Před příchodem simulačních programů nebylo možné, či jen komplikovaně s využitím několika různých nástrojů, zjistit finální vlastnosti jinak, než na fyzicky hotovém pracovišti.

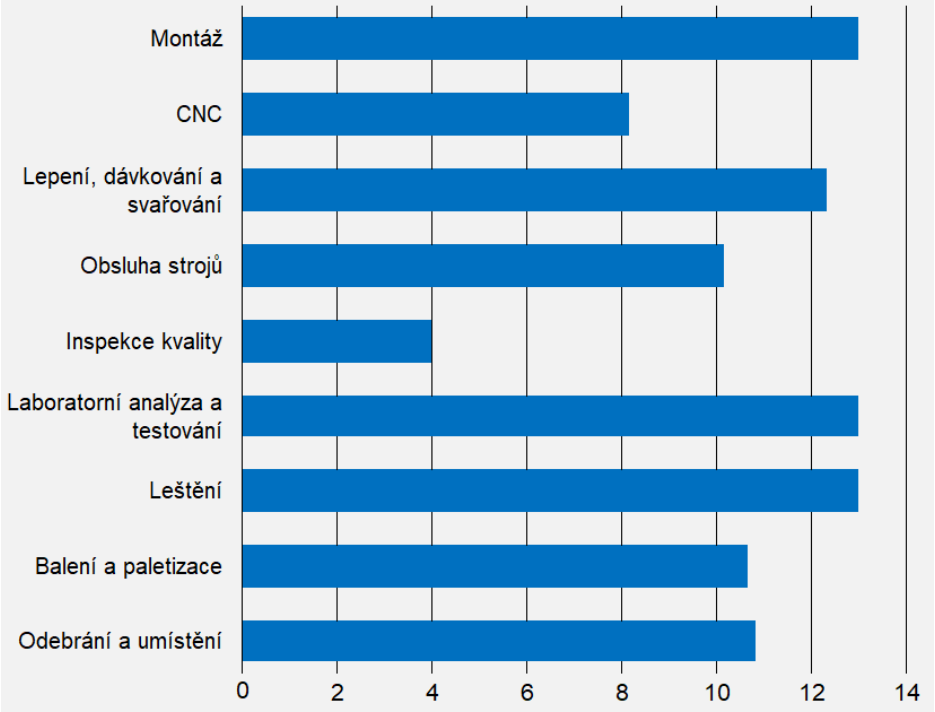
Jak již z textu vyplývá, jedná se rozvíjející se obor, o který je, s rostoucí komplikovaností výrobních systémů, stále vyšší zájem. Pro práci s návrhem robotických pracovišť ve virtuálním prostředí je potřeba znalost mnoha profesí, které jsou nezbytné k tvorbě během jednotlivých fází realizace. Právě tato univerzálnost, ve spojení se simulačními a 3D programy, mě uchvátila a motivovala k vypracování diplomové práce, zabývající se danou problematikou.

3 POZNÁNÍ SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Průmyslová robotizace

Představení prvních průmyslových robotů se datuje již do 60. let minulého století. Od té doby vývoj urazil dlouhou a rozsáhlou cestu, nicméně původní myšlenka a koncepce průmyslových robotů zůstala stejná [1].

Výrobní průmysl obecně klade stále vyšší důraz na efektivitu a kvalitu práce, avšak při trvalé snaze o zlevnění výrobních procesů. Těchto, zprvu vypadajících protichůdných požadavků, by se v případě manuální práce dosahovalo jen obtížně, nicméně při aplikaci robotizovaných pracovišť se jedná o reálný cíl. Mezi často uváděnými důvody, proč není rentabilní určitou aplikaci robotizovat, bývá nízká výrobní dávka či nerealizovatelnost procesu za pomocí robotů. Tyto argumenty jsou, díky vzrůstající variabilitě nabízených robotických pracovišť, postupně vyvraceny. V dnešní době lze v moderních továrnách nalézt kromě průmyslových robotů, které je nutno provozovat v odděleném pracovním prostoru z důvodu bezpečnosti, čím dál častěji kolaborativní robotické aplikace. Kolaborativní roboty mají přizpůsobený design a jsou vybaveny patřičnými senzory k tomu, aby mohly bezpečně spolupracovat s operátorem ruku v ruce a vyplnit tak dříve slepé místo mezi průmyslovými roboty a manuální prací.



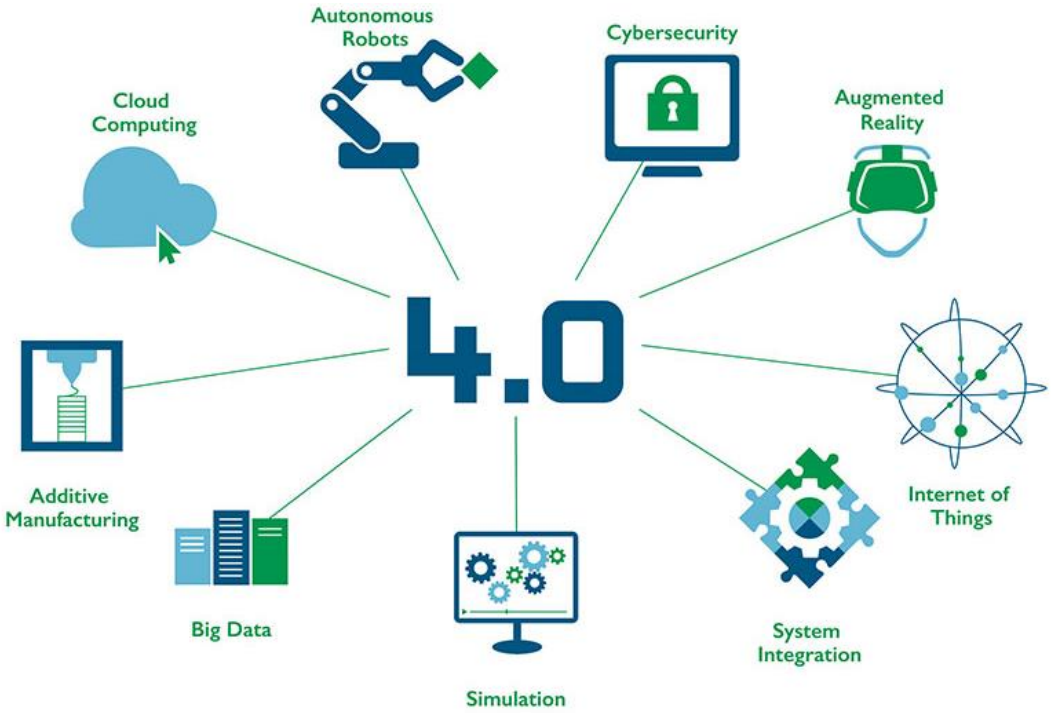
Obr. 1) Průměrná návratnost investic na základě robotických aplikací [2]

Fakt, že se jedná o správný směr, kudy by se měl výrobní průmysl ubírat, potvrzuje i meziroční nárůst instalovaných robotických pracovišť, který mimo jiné dlouhodobě sleduje Mezinárodní federace robotiky. Z jejich statistik a prognóz (viz Obr. 2) je patrný trvalý nárůst těchto pracovišť, který mírně zpomalila pandemická situace COVID-19 v roce 2019. Na základě získaných poznatků během pandemie lze usuzovat, že oblíbenost robotizovaných pracovišť, jakožto na člověku nezávislém výrobním systému, bude ještě narůstat. Tento trend

navíc podporují i neustále rostoucí požadavky na zaměstnance, s čímž souvisí nutnost vynaložení vyšších nákladů na jejich patřičnou kvalifikaci, mzdu a v neposlední řadě jejich častý nedostatek na trhu práce.

Obr. 2) Vývoj a prognóza instalovaných robotických pracovišť v tisících kusů [3]

Další skutečností, podporující počet instalovaných robotických pracovišť, je jejich začlenění v Průmyslu 4.0., kde během jeho definování roboty představovaly jednoho z nejvýznamnějších tahounů. Hlavní myšlenkou Průmyslu 4.0 je vytvořit systém, který by byl schopný se za pomocí senzorů sám řídit, v reálném čase se monitorovat včetně předávání potřebných parametrů ke vzdálenému dohledu a predikovat poruchy na základě získaných dat z provozu. Toho má být docíleno za využití devíti hlavních pilířů (viz Obr. 3). Lze předpokládat, že Průmysl 4.0 bude mít rozsáhlý vliv na robotický svět, kde bude s ještě větší intenzitou cíleno na strojové vidění a autonomní režim [4].



Obr. 3) Hlavní pilíře Průmyslu 4.0 [5]

3.2 Metody programování průmyslových robotů

K tomu, aby robot vykonával požadovanou akci, je potřeba vytvořit určitou logiku a naučit ho jednotlivé pohyby – naprogramovat. Toho lze docílit dvěma metodami, a to buď on-line nebo off-line. V praxi se převážně využívá kombinace obou zmíněných způsobů, kdy se kostra programu provede off-line a finální verze se upravuje on-line.

3.2.1 On-line programování

On-line programování představuje přímou interakci robotu s člověkem, tedy nutnost fyzické přítomnosti u již instalovaného robotu. Jedná se o neekonomickou metodu, z důvodu nezbytné odstávky robotického pracoviště, zdlouhavého a nekomfortní procesu.

Výrobci robotů však mají snahu programování zjednodušovat a zrychlovat. V poslední době se tak lze stále častěji setkat s možností programování robotů za využití grafického rozhraní na ovládacím panelu, kde jsou jednotlivé instrukce skládány do bloků. To s sebou přináší kromě vyšší intuitivnosti systému a rychlosti programování, také nižší nároky na znalost programovacích jazyků a tím i dostupnost pro širší spektrum uživatelů [6].

On-line programování dále dělíme na dvě metody a to podle způsobu určování koncových bodů.

Přímé programování

Přímé programování se provádí ručním polohováním robotu. Robot disponuje možností odblokování brzd motorů pomocí tlačítek na manipulátoru nebo ovládacím panelu. Další možností přímého programování je využití speciálního externího ovladače, který v reakci na dotek pohybuje požadovaným směrem. Přímým způsobem programování disponují zejména kolaborativní roboty pro svou vyšší bezpečnost a nižší hmotnost oproti průmyslovým robotům.

Obr. 4) Přímé on-line programování pomocí tlačítek na manipulátoru [7]

Nepřímé programování

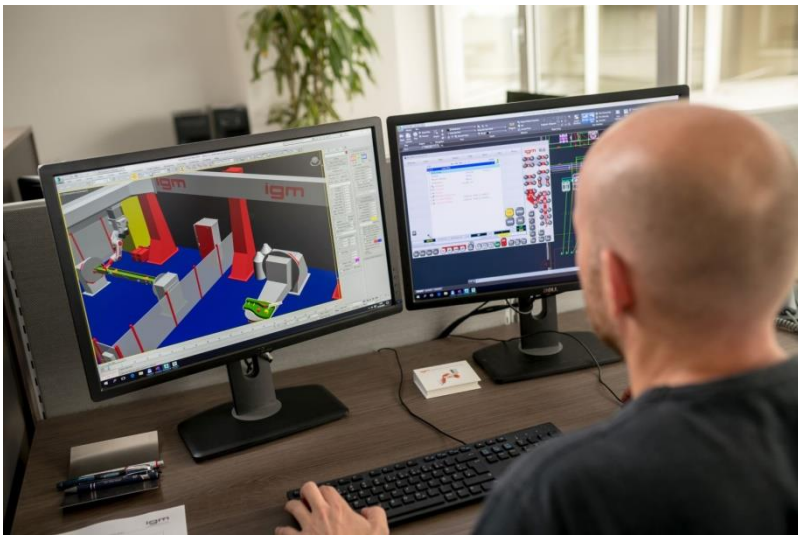
Jedná se programování pomocí ovládacího panelu, přes který jsou zadávány informace rovnou do řídicího systému. Navádění robotu je prováděno joystickem nebo 3D myší, kterou je ovládací panel vybaven.

Obr. 5) Nepřímé on-line programování pomocí ovládacího panelu [8]

3.2.2 Off-line programování

Kromě konvenčního on-line způsobu je možné provést programování průmyslových robotů off-line metodou. Ta využívá simulačního a programovacího softwaru, kde je na základě předem nahraných knihoven a importovaných 3D dat sestaven virtuální návrh, totožný se skutečným robotickým pracovištěm.

Za pomocí takto vytvořeného virtuálního návrhu je možné roboty naučit jednotlivým bodům, dráhám a činnostem dle výrobní aplikace. Tyto akce jsou zanášeny do programu, který je následně dovybaven logikou pro jejich správné řízení. V případě tvorby komplikovanějších programů, patří k bezesporným výhodám off-line programování možnost jednodušší a rychlejší orientace v programu, než v případě ovládacího panelu robotu. Mimo již uvedeného vytváření a spravování samotného programu lze v softwarech simulovat reálný chod pracoviště a tím ověřit vlastnosti robotů jako požadované dosahy a nároky na mechanické části při zatížení. Dále je možné optimalizovat konfigurace robotů s důrazem na singulární polohy, sledovat výrobní takt a testovat různé varianty k jeho urychlení, detekovat případné kolize robotů s ostatními částmi linky či dalšími použitými roboty apod. Výsledný program, je v závislosti na typu softwaru, exportován do programovacího jazyka použitého robotu a nahrán do jeho řídicího systému [1].



Obr. 6) Off-line programování [9]

3.3 Programovací jazyky průmyslových robotů

Ve světě průmyslových robotů neexistuje jednotný programovací jazyk, ale každý výrobce vyvíjí vlastní. Nicméně je nutné zmínit, že robotické jazyky jsou si podobné a liší se především v jednotlivých syntaxích, jelikož jejich základ vychází z jazyků jako BASIC, Pascal nebo C [10].

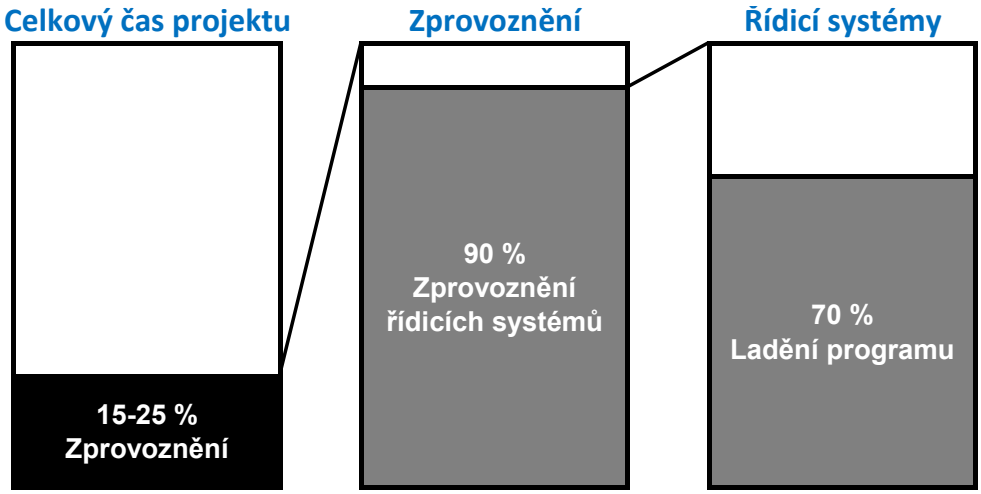
Tab 1) Programovací jazyky vybraných výrobců průmyslových robotů

Výrobce	Programovací jazyk
ABB	RAPID
Comau	PDL2
Fanuc	Karel
Kawasaki	AS
Kuka	KRL
Stäubli	VAL3
Universal robots	URScript
Yaskawa	Inform

3.4 Virtuální zprovoznění

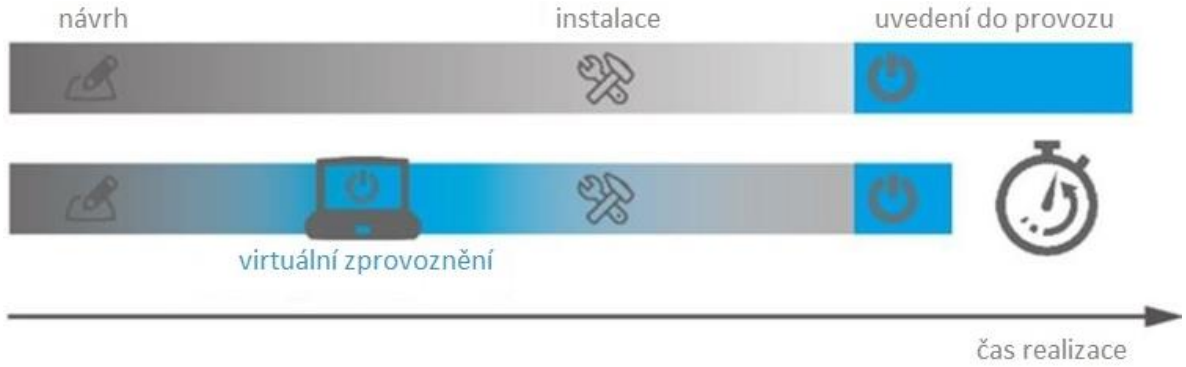
Realizace robotického pracoviště je časově náročný úkol, který, v závislosti na jeho komplikovanosti, může trvat v řádu až několik měsíců. Během této doby projekt prochází mnoha fázemi, kde i přes všechnu snahu může dojít k různým komplikacím. Ty jsou, v lepším případě, odhaleny ještě v počátku jejich vzniku, ale mnoho z nich se objeví až při závěrečném uvádění do provozu. To s sebou často přináší zpoždění a tím i vynaložení dalších nákladů na rychlé řešení.

Studie, vytvořená pro německý svaz výrobců obráběcích strojů, zjistila, že až 25 % z celkového času projektu reprezentuje jeho vlastní zprovoznění. Z toho 90 % tvoří činnosti spojené s uváděním řídicích systémů do provozu, kde 70 % představuje ladění samotných programů. Jinak řečeno, ladění programu tvoří 60 % času ke zprovoznění řídicího systému nebo 15 % z vlastního zprovoznění [11].



Obr. 7) Zprovoznění výrobního systému [11]

K tomu, aby byly komplikace odhaleny a vyřešeny v dostatečném předstihu, je využíváno virtuálního zprovoznění. Jedná se o poměrně nový nástroj, díky kterému lze připravit, otestovat a prezentovat řešení před samotným reálným spuštěním. Toho je docíleno pomocí tzv. digitálního dvojčete, což je virtuální model zamýšleného pracoviště se všemi jeho náležitostmi. Dle propracovanosti modelu a jeho komponent je možné během simulace detekovat od elementárních chyb v programu, až po konstrukční nedostatky jednotlivých prvků [12].



Obr. 8) Porovnání tradičního a virtuálního zprovoznění [13]

Včasná identifikace problému nepomáhá jen ke zkrácení času realizace, ale rovněž eliminuje zbytečné náklady na jejich řešení. Tyto výdaje rostou exponenciálně a reprezentuje je tzv. pravidlo „desítek“, které znázorňuje vztah vynaložených nákladů v závislosti na době řešení chyby [14].

Obr. 9) Pravidlo desítek [14]

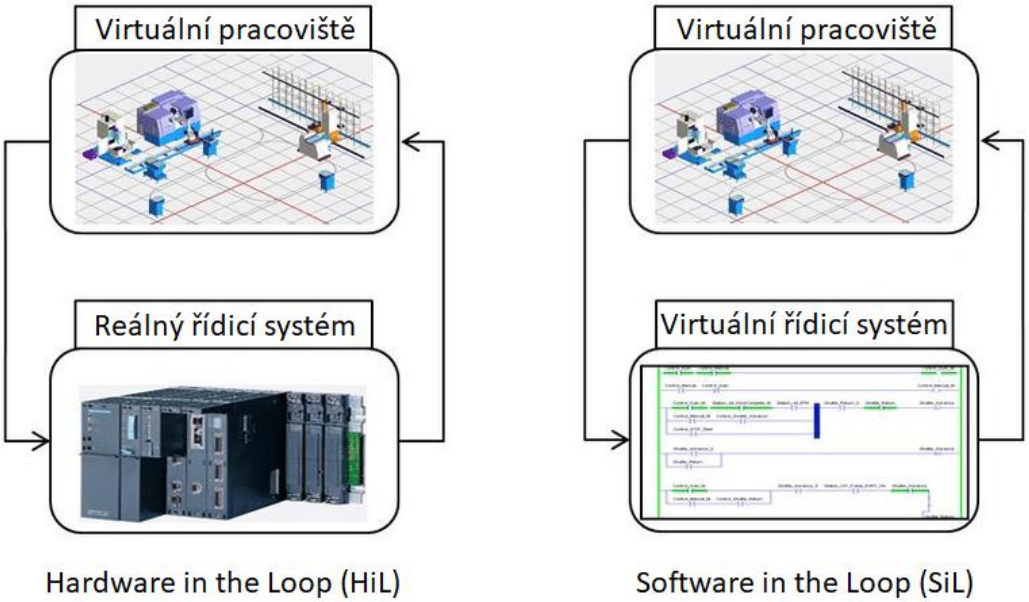
Realizací pracoviště a jeho uvedením do provozu výhody virtuálního zprovoznění nekončí. Dále je možné model využívat k úpravám programu, včetně jeho odzkoušení, nebo jako podklady k přestavbě dosluhující linky, které se běžně realizují po skončení výroby produktu. Všechny zmíněné akce je možné, díky virtuálnímu zprovoznění, dělat bez nutnosti odstávky či jiné fyzické přítomnosti komponent pracoviště, což s sebou přináší nesmírnou finanční úsporu.

V současné době se používají především dvě technologie virtuálního zprovoznění, a to Software in the Loop (SiL) a Hardware in the Loop (HiL). Přestože se jedná o metody s odlišným principem, mají některé části vykonávání stejné. Jejich společný jmenovatel je vyhodnocování v uzavřené smyčce za předem stanovených podmínek a času. Rozdíl spočívá v použitém řídicím systému [15][16].

Metoda SiL je kompletně testována ve virtuálním prostředí na počítači, kde je snaha maximálně napodobit reálné chování řídicího systému. Výhodou je možnost využití této metody bez fyzické potřeby reálného hardwaru a rychlejší ověření. Na druhou stranu je potřeba zmínit, že napodobení reálného řídicího systému není tak přesné jako při jeho skutečném použití [15][16].

Oproti tomu u metody HiL je použit reálný řídicí systém se zkompilovaným programem, který reaguje s virtuálním prostředím na počítači. Díky tomu je dosaženo výsledků jako v případě skutečného výrobního systému. Jak je patrné, nevýhodou této metody je nutnost fyzické přítomnosti řídicího systému [15][16].

V praxi se často setkáme s kombinací výše uvedených způsobů, kdy je program testován metodou SiL a jeho ověření proveden pomocí metody HiL [16].



Obr. 10) Porovnání SiL a HiL metody [17]

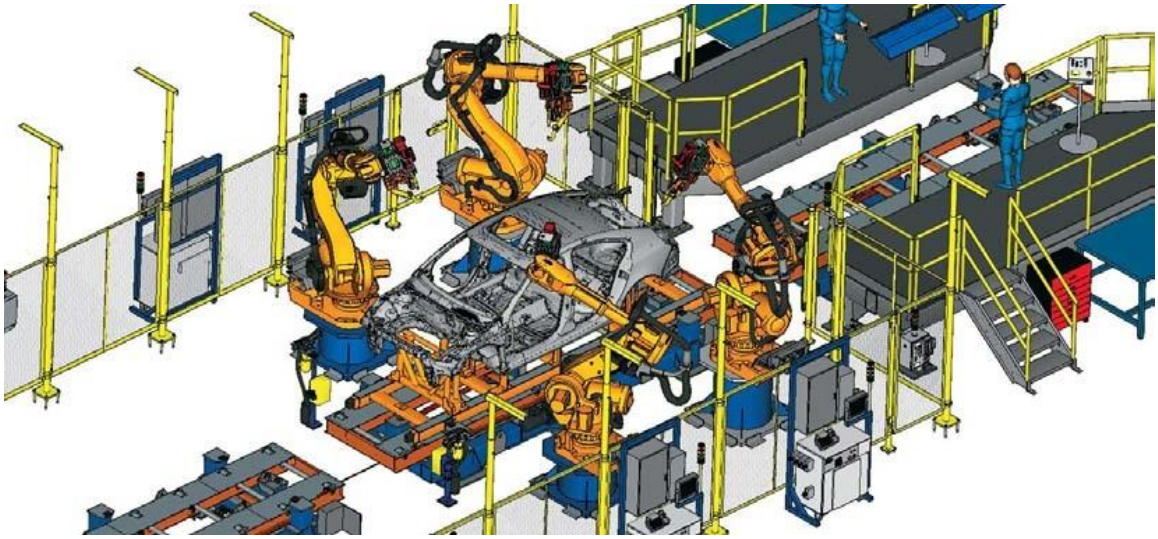
3.5 Simulační software pro robotická pracoviště

Virtuální zprovoznění robotických pracovišť se provádí v simulačních softwarech, které lze rozdělit podle kompatibility s použitými roboty do dvou hlavních skupin.

Univerzální software je možné použít pro virtuální zprovoznění bez ohledu na použité roboty, díky čemuž je vhodný především pro firmy, které se nespecializují na robotická pracoviště jednoho výrobce robotů. Jeho nevýhoda spočívá v časových rozdílech mezi simulovanou a reálnou úlohou, které ovšem lze často vyřešit dokoupením rozšiřujících balíčků. Rovněž je nutnost výsledného exportu programu do jazyku daného robotu, který v případě složitějších úloh může způsobovat komplikace a nutnost korekcí.

Software výrobců robotů spolupracuje pouze s vlastními roboty, což představuje maximální propracovanost a totožnost s reálným pracovištěm. Program je vytvářen přímo v jazyce robotu a tvoří tak věrnou kopii programu v řídicím systému. Jak je zřejmé, jeho nevýhoda spočívá v nemožnosti použití softwaru pro odlišné značky robotů.

Oblíbenost virtuálního zprovoznění prudce stoupá a s tím i počet simulačních programů na trhu. V následujících kapitolách je proveden výběr nejpoužívanějších softwarů a jejich základní popis.



Obr. 11) Virtuální zprovoznění výrobní linky pro bodové svařování karosérie automobilu [18]

3.5.1 Univerzální software

TECNOMATIX Process Simulate

Firma Siemens má ve své nabídce již řadu let platformu pro digitální továrnu TECNOMATIX. Ta nabízí virtuální nástroje pro modelování výrobního toku, vývoje strojů a technologických zařízení, analýzu ergonomie pracovišť a v neposlední řadě zprovozňování robotů. Software určený k programování a simulování robotických pracovišť se nazývá Process Simulate Robotics. Díky němu je možnost virtuálního oživení až dvaceti výrobců robotů pro technologické aplikace jako je svařování, manipulace, lakování atd. [19].

DELMIA

Stejně jako platforma TECNOMATIX, i společnost Dassault Systèmes, se svojí digitální továrnou DELMIA, cílí na komplexní řešení pro virtuální zprovoznění výrobního systému. V jejich portfoliu je tedy možné nalézt balíčky od řešení ergonomie a montáže až po programování a simulaci robotických pracovišť. Platforma DELMIA Robotics nabízí několik užitečných nástrojů pro virtuální zprovoznění, simulaci, import a export robotických programů a v neposlední řadě rozšíření zaměřené na obloukové a bodové svařování [20].

Visual Components

Původně finská společnost Visual Components byla v roce 2017 koupena německou firmou KUKA AG. I přes to si program pro virtuální zprovozňování Visual Components zanechává ideu univerzálního softwaru, s širokou škálou podporovaných robotů. Program je nabízen ve třech verzích výbavy tak, aby uspokojil koncového uživatele bez nutnosti koupení zbytečně obsáhlé licence bez jejího plného využití [21].

3.5.2 Software výrobců průmyslových robotů

RobotStudio

Jedná se o programovací a simulační software švýcarsko-švédské firmy ABB, který poskytuje možnost virtuálního zprovoznění robotů stejnojmenné značky. To probíhá vytvořením virtuálního modelu pracoviště a připojením virtuálního řídicího systému. Ke tvorbě pracoviště slouží předinstalovaná knihovna robotů a jejich příslušenství. Kromě toho program podporuje možnost importu 3D dat v běžně dostupných formátech nebo tvorbu vlastních geometrií pomocí funkce Mechanism Modeler. Tyto modely je možné doplnit o inteligentní řízení a chování díky funkci Smart Components a vytvořit tak realistickou simulaci. K dalším možnostem, které RobotStudio nabízí, patří automatické generování trajektorií AutoPath, automatické definování konfigurace robotického ramene AutoConfiguration, řízení vícero robotů pomocí jednoho řídicího systému MultiMove, nastavování bezpečnostních zón Visual SafeMove atd. RobotStudio lze využívat i jako školící prostředek, díky možnosti Virtual Flexpendant. Tento nástroj zobrazí věrnou kopii reálného ovládacího panelu robotu, díky čemuž je možné provádět školení obsluhy bez nutnosti odstávky robotu či nebezpečí poškození zařízení během zaučování. Rovněž zde lze vytvářet uživatelské obrazovky pro lepší přehlednost. K základní verzi programu je možné dokoupit balíčky PowerPacs pro optimalizaci aplikací jako je například svařování, paletizaci, lakování atd. [22].

KUKA.Sim

KUKA.Sim je software německého výrobce robotů KUKA. Software vsází na svoji modularitu, což znamená, že jeho základní verze jde rozšířit až o tři balíčky dle potřeby koncového uživatele. Balíček Modeling doplňuje základní verzi o tvorbu vlastní knihovny s CAD daty, které lze opatřit důmyslnějšími funkcemi chování pro věrohodnější simulace. Jako další rozšíření se nabízí Connectivity, díky kterému je možnost propojení celé buňky s vybranými simulátory a PLC. Třetí balíček ArcWelding je doplňkem pro svařovací aplikace, který dokáže optimalizovat nájezdové polohy robotu pro svařování i během samotného svařovacího procesu. Mimo to program nabízí funkce jako ověřování dosahu, detekce kolize a vypočítávání taktu procesu, který je, díky konzistentnosti dat, totožný s reálným systémem [23].

ROBOGUIDE

Japonský Fanuc, pro virtuální zprovoznění svých robotických pracovišť, vyvinul simulační program ROBOGUIDE. Ten obsahuje veškeré funkce srovnatelné s konkurencí, ať se jedná o import 3D dat, tvorbu trajektorií, simulací a jiné. Rovněž je možnost dovybavit základní verzi softwaru o rozšiřující nástroje podle aplikace, jako je svařování, paletizace, lakování, odstraňování otřepů atd. [24].

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Před započetím navrhování možných řešení je zapotřebí důkladně rozebrat zadanou problematiku a vyhnout se tak potížím při dalším postupu práce. Z tohoto důvodu je v úvodu kapitoly provedena analýza krokového motoru, včetně jeho montážního procesu. Na základě poznatků z analýzy jsou následně vybrány a popsány komponenty, které lze uvažovat do konceptu robotizovaného pracoviště pro montáž krokových motorů.

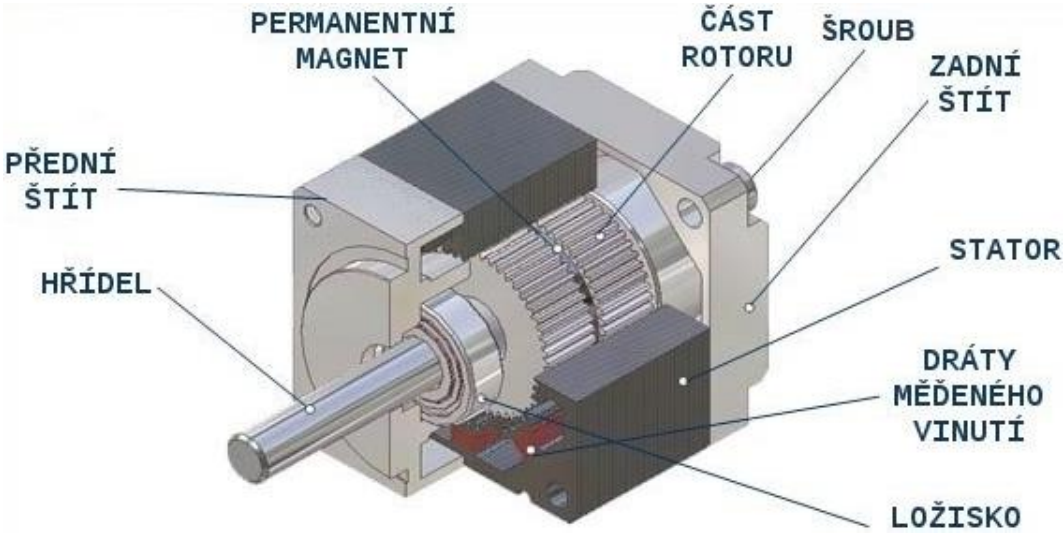
4.1 Analýza zadané součásti

4.1.1 Popis krokového motoru

Krokový motor je bezkartáčový synchronní stroj, který pro generování pohybu využívá elektromagnetismus. Přiváděním napětí do jednotlivých elektromagnetů – cívek statoru, vzniká magnetické pole. To přitahuje nebo odtlačuje vzájemně posunuté magnety rotoru oproti cívkám statoru, kde právě posun o jeden zub se nazývá krok.

Mezi části krokového motoru patří, kromě již zmíněného statoru a rotoru, přední a zadní štít, dvě ložiska, dva vymezovací kroužky, pružná podložka prohnutá a v neposlední řadě čtyři zápustné šrouby s křížovou drážkou. Stator je kovové tělo, které v sobě ukrývá kostru s cívkami tvořenými z vinutých měděných drátů. Pod pojmem rotor si můžeme představit rotující součást v těle statoru. Rotor se skládá z hřídele s magnety, na kterou jsou nasunuty vymezovací kroužky a ložiska. Ty slouží pro uložení rotoru v předním a zadním štítu, který je doplněn o pružnou podložku k dotlačení rotoru do přední části motoru. Ke spojení jednotlivých segmentů do celku se používají zmíněné šrouby.

Krokové motory dosahují vysoké přesnosti řízení a polohování i bez nutnosti zpětné vazby. Díky tomu jsou používány pro řízení os obráběcích strojů, výpočetní techniku, klasické i 3D tiskárny, automatizaci a mnoho dalších [25].



Obr. 12) Části krokového motoru [25]

V nabídce společnosti Nanotec jsou krokové motory NEMA zastoupeny širokou škálou velikostí a výkonových variant. Řešené varianty 14, 17 a 23 se nabízí v rozměrech od 25x25x30 až do 60x60x126,5 nebo 56x56x138 milimetrů v závislosti na volbě zařízení. To

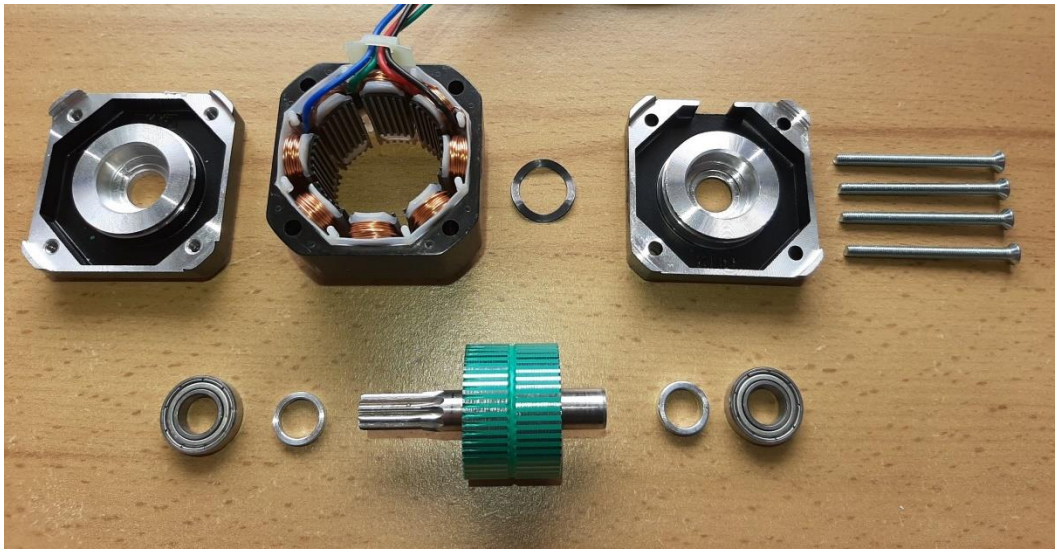
může být dodáváno ve standardní verzi, včetně integrovaného řízení, s dodatečným krytím nebo kombinací zmíněných rozšíření.

Obr. 13) Krokové motory NEMA [26]

4.1.2 Montážní proces

Jak je patrné z předešlého popisu, krokový motor je tvořen z poměrně malého počtu dílů. Jeho montážní proces se skládá z jednoduchých manipulačních úkonů a výsledného sešroubování. Proto je důležité si před zamýšlenou robotizací montážního procesu projít jednotlivé montážní operace a vyhodnotit časovou náročnost každé z nich.

Na úvod montážního procesu je potřeba vložit přední štít do přípravku, na který se nasadí stator. Dalším krokem je montáž rotoru. Ta probíhá nasunutím vymezovacích kroužků a ložisek. Takto hotový rotor se vsune do připraveného statoru. Poté následuje nasazení podložky na rotor a uzavření zadním štítem. Nakonec se sestava sešroubuje akumulátorovým šroubovákem.



Obr. 14) Rozmontovaný krokový motor

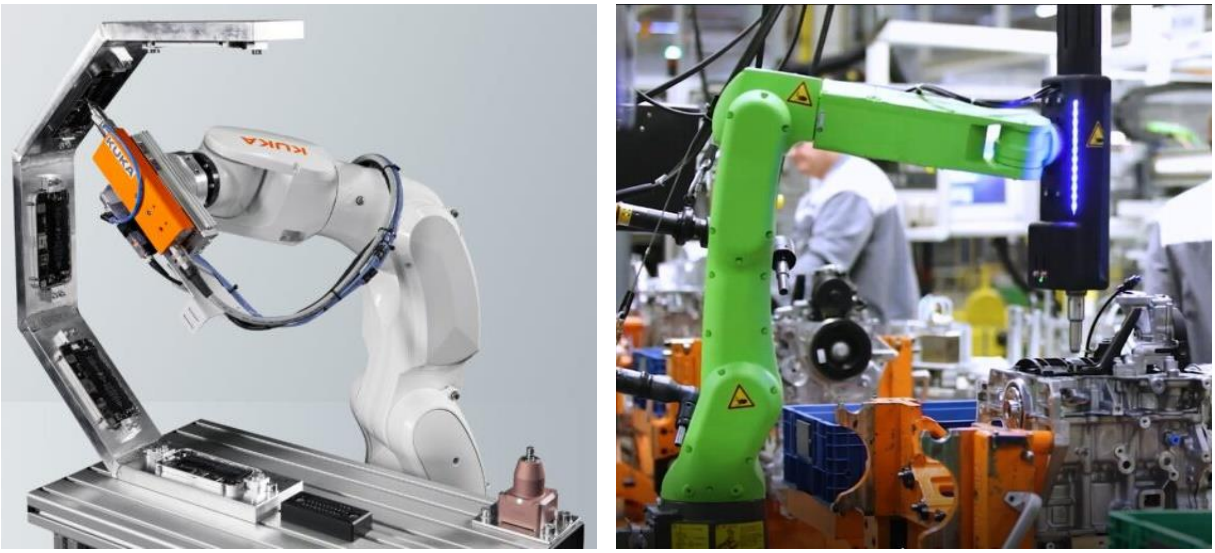
Popsaný proces byl desetkrát zopakován, včetně změření času jednotlivých montážních operací. Během měření bylo uvažováno i s manipulací, která především, v případě malých dílů, tvoří značnou část naměřených hodnot. Získané údaje byly následně zprůměrovány tak, aby výsledná hodnota maximálně odpovídala reálnému času montáže.

Tab 2) Aritmetický průměr naměřených časů pro jednotlivé montážní operace

Pořadí operace	Popis	Průměrný čas [s]
1.	Vložení předního štítu do přípravku	1,5
2.	Nasazení statoru na přední štít	3,5
3.	Nasunutí vymezovacích kroužků na hřídel	3,5
4.	Nasunutí ložisek na hřídel	5
5.	Vložení rotoru do statoru	2,5
6.	Nasunutí podložky na rotor	2
7.	Nasazení zadního štítu	2
8.	Výsledné sešroubování	22
	Celkový čas	**42**

Díky výše provedenému rozboru montážního procesu a jeho změření je možné rozlišit vhodnost jednotlivých operací pro robotické pracoviště. Z tabulky vyplývá, že nejdelší čas zaujímá výsledné sešroubování, které zabírá více než polovinu celkového času montáže krokového motoru.

Šroubování patří mezi běžné robotické aplikace, se širokou nabídkou dostupného vybavení, což znamená možnost využití standardního zařízení. To naznačuje, že využití sériově dodávaných zařízení by mělo vyžadovat nižší pořizovací náklady, než v případě tvorby individuálního řešení.

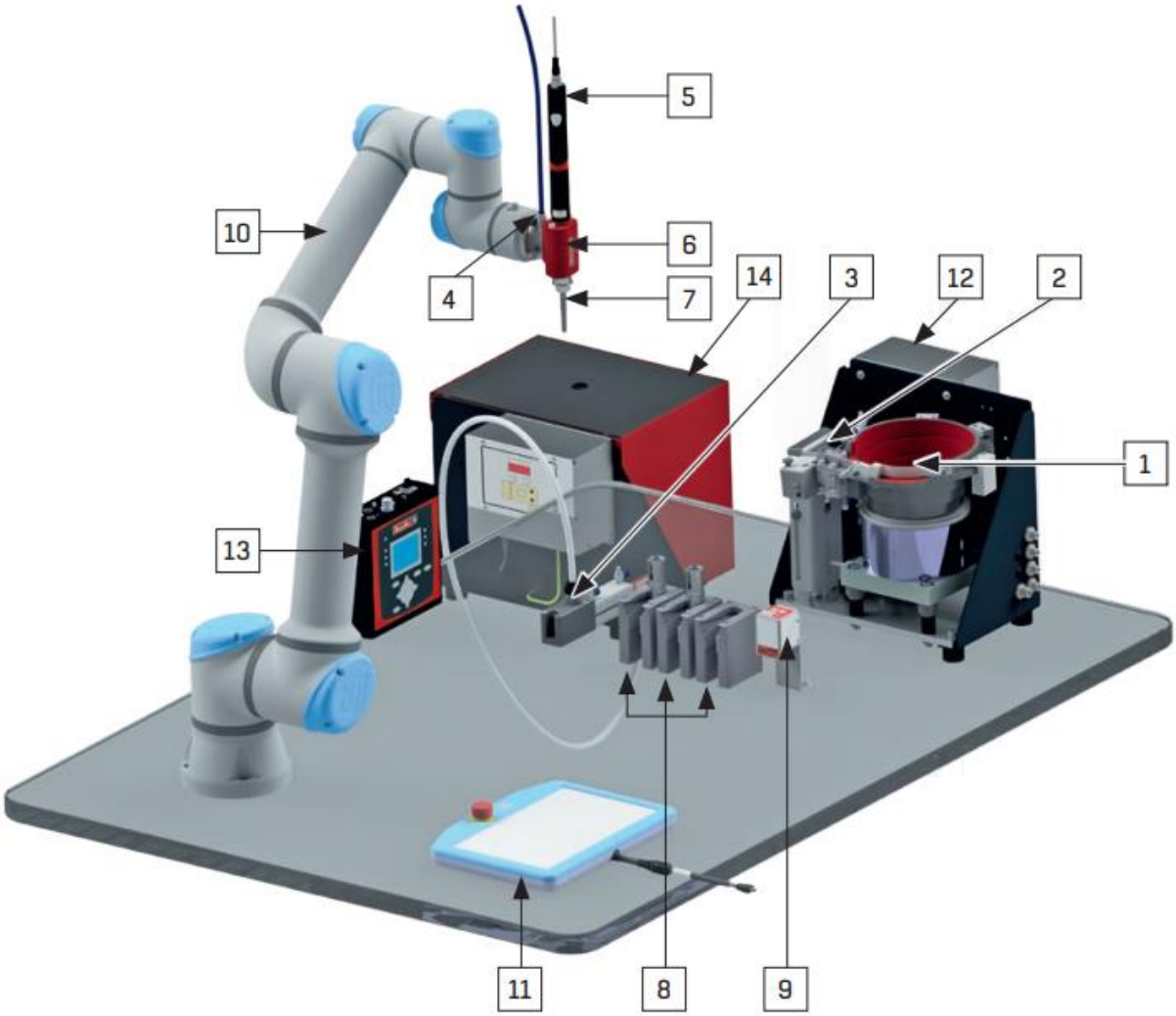


Obr. 15) Ukázka robotických šroubovacích aplikací [27]

Případná robotizace ostatních montážních operací se zdá, vzhledem k naměřeným časovým údajům a předpokládaným pořizovacím nákladům, jako nerentabilní. Z tohoto důvodu s nimi není dále uvažováno.

4.2 Vybavení robotického šroubovacího systému

1) Podavač šroubů
2) Jednotka pro přímý přívod šroubů
3) Jednotka pro nepřímý přívod šroubů
4) Přívod stlačeného vzduchu
5) Pohon šroubovací hlavy
6) Šroubovací hlava
7) Nástroj
8) Stanice pro výměnu nástrojů
9) Čtečka kódů
10) Robot
11) Ovládací panel robotu
12) Impulzní řídicí technika
13) Procesní řídicí technika
14) Robotický kontrolér



Obr. 16) Robotický šroubovací systém pro přímý i nepřímý přívod šroubů [28]

4.2.1 Podavač šroubů

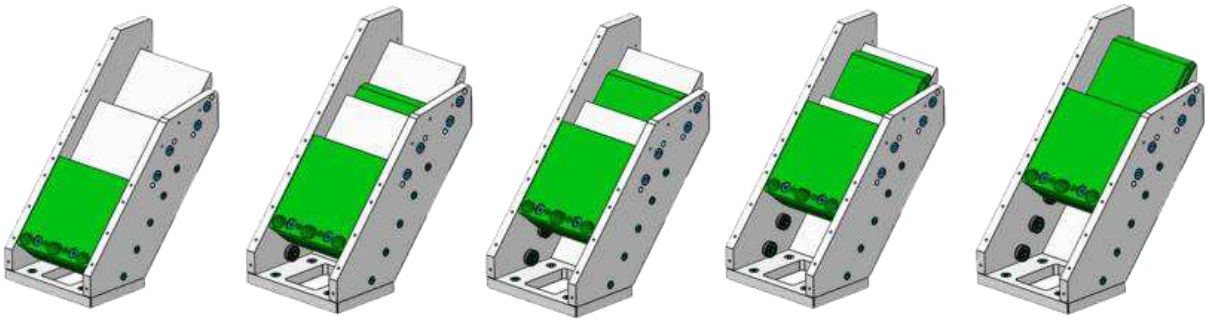
Aby bylo možné rychle a bezproblémově aplikovat šrouby, je nezbytné zajistit jejich včasné a správné nachystání k odebrání. Právě k tomu slouží podavače šroubů. Ty jsou vybaveny nádobou, do které je ručně nebo za pomoci zásobníku šroubů nasypán materiál. Odtud jsou šrouby přivedeny do lineární podávací kolejnice, kde jsou připraveny pro další článek šroubovacího systému. Zmíněný transport z nádoby do kolejnice a správnou orientaci materiálu lze realizovat třemi typy mechanismu [29][30][31]:

Vibrační

Vibrační podavače jsou vyzbrojeny svazkem pružin a řiditelným generátorem vibrací, například vibračním elektromagnetem, který umožňuje transport šroubů různých velikostí po spirálovém okraji nádoby. Díky možnosti regulace lze výšku amplitudy vibrací přizpůsobit podle velikosti materiálu a naplnění nádoby, což zajišťuje optimální zátěž pro transport a třídění. Vibrační podavače jsou, pro svou vysokou rychlost zásobování a možnost konstrukce s dvojitou spirálou, vhodné i pro obsluhu vícero zařízení. I díky tomu patří k nejčastěji nasazovanému mechanismu [29][30][31].

Krokový

Krokové, často nazývané i jako schodové, podavače jsou tvořeny podávacími deskami poháněnými elektromotorem pro možnost regulace rychlosti podávání. Právě konstrukce podávacích desek předurčuje krokové podavače především k použití pro dlouhý kruhový a asymetrický materiál. Mezi hlavní přednosti těchto zařízení patří nízká hlučnost a zejména omezení tření pouze na lineární podávací kolejnici. To dělá krokové podavače vhodnými adepty pro aplikace s požadavkem na čistotu a citlivé materiály, jako například šrouby s povrchovou úpravou [29][30][31].



Obr. 17) Princip krokového podavače [29]

Se zdvihající kolejnicí

Posledním zástupcem jsou podavače šroubů se zdvihající kolejnicí, též nazývané jako segmentové. U těchto zařízení je princip založen na výkyvném segmentu s kolejnicí, kterým je po zvednutí mechanismu dopravován materiál. Tvar kolejnice je upravován podle specifikace materiálu, nicméně obecně lze říci, že tento mechanismus je vhodný zejména pro menší velikosti šroubů. Díky využití gravitace a úplné eliminaci vibrací jsou tato zařízení ještě tišší a čistší než krokové podavače [30][31].

Obr. 18) a) Vibrační podavač [30], b) Krokový podavač [30], c) Segmentový podavač [29]

Ke zvýšení míry automatizace je možné podavače šroubů rozšířit o opční doplňky jako lineární kolejnice a zásobníky šroubů.

Lineární kolejnice

Lineární kolejnice slouží k vytvoření větší zásoby dílů a překonání dopravních vzdáleností. Její princip spočívá na stejné bázi jako u vibračních podavačů, tedy na sestavě pružin a vibračním elektromagnetu s možností regulace [30].

Zásobník šroubů

Jedná se o opční uzel pro automatické šroubovací pracoviště, který konstrukčně vychází z pásového dopravníku doplněného o násypku materiálu. Jeho hlavními úkoly jsou prodloužení doplňovacího intervalu a udržení stabilního množství náplně podavače šroubů. Jakmile v podavači šroubů klesne materiál pod určitou hladinu, je vyslán signál do řídicího systému. Ten aktivuje pásový dopravník, který přivede materiál na skluz, ústící do podavače šroubů [32][33].

Obr. 19) Pásový zásobník šroubů [32]

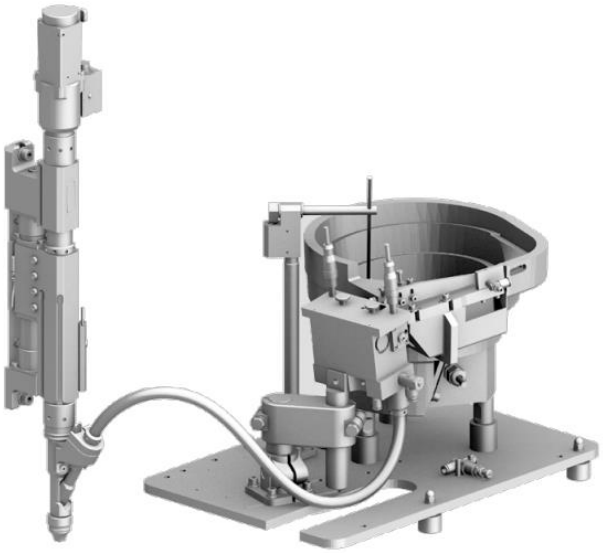
4.2.2 Jednotka pro přívod šroubů

Jednotky pro přívod šroubů slouží k přenosu spojovacího materiálu z podavače šroubů do šroubovací hlavy. To je možnost realizovat dvěma způsoby, a to buď přímo, nebo nepřímo.

Přímý

V tomto případě je šroubovací hlava zásobena přímo z podavače šroubů pomocí přívodní hadice. Ta je individuálně přizpůsobena jednotlivým typům šroubů tak, aby se předcházelo jejich zkřížení a tím i zablokování přívodní hadice. Pro rychlé doplnění šroubu je šroubovací hlava vybavena mechanismem s parkovací polohou, odkud je po jejím uvolnění dopraven další šroub.

Díky eliminaci nutnosti najíždění na odebírací polohu a možnosti paralelního doplňování šroubů během posuvu robotu se jedná o velmi rychlou variantu dopravy. Jako nevýhodu je nutné zmínit riziko ucpání přívodní hadice nečistotami nebo zkřížením šroubu v důsledku nevhodné konfigurace [34].



Obr. 20) Doprava šroubů přívodní hadicí [34]

Nepřímý

Jedná se o tzv. pick and place postup, při kterém se robot musí před každým zašroubováním přesunout k separátně instalovanému podavači šroubů. Tam dojde k odebrání šroubu a robot poté najíždí do šroubovací pozice. V případě odebrání šroubu řídicí systém podavače vydá signál k jeho automatickému doplnění.

Tato metoda se využívá pro šrouby s krátkou stopkou a v případech, jež neumožňují připojit přívodní hadici šroubů ke šroubovací hlavě. Její hlavní nevýhodou je časová náročnost, kdy robot pro každé doplnění musí přejet do odebírací polohy, což prodlužuje celkový čas cyklu [35].

Obr. 21) Robotické šroubování metodou pick and place [36]

4.2.3 Přívod stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch je nedílnou součástí robotické montážní aplikace. Využívá se zde především k dopravě šroubů, ať už se jedná o postup s přímým nebo nepřímým přívodem. V procesech, jako je montáž elektronických dílů, jsou kladeny vysoké požadavky na čistotu systému

a komponent. Tyto nároky se vztahují i na šrouby, které jsou během přepravy o sebe otírány, čímž vzniká jemný prach. K zachycení nečistot tak, aby se dále neroznášely a nebyly součástí montáže, je možné systém vybavit filtrací pevných částic. To probíhá zastavením šroubu v mechanismu filtrace, odkud jsou nečistoty odsáty a transportovány do filtru [37][38].

Obr. 22) Filtrace nečistot [37]

4.2.4 Šroubovací hlava

Šroubovací hlava reprezentuje koncový efektor robotu určeného pro šroubovací aplikaci. Hlavním cílem této techniky je přenos připraveného materiálu a provedení jeho následného zašroubování do požadovaného místa. Pro správnou volbu je před samotným výběrem nutné znát parametry jako je velikost šroubu, potřebný utahovací moment a dostupnost šroubového spoje.

Pojem šroubovací hlava zahrnuje komplexní mechanismus, pod nímž se skrývá celá řada různých komponent, od pohonu až po samotné vřeteno s nástrojem. Z tohoto důvodu je vhodné mít kromě již zmíněných parametrů určitý přehled o principech nabízených šroubovacích hlav. Dále v této kapitole je provedeno jejich základní dělení, včetně stručného popisu a výčtu hlavních výhod a nevýhod.

Podle pohonu:

Pneumatický pohon patří k hojně využívané variantě pro utahovací nářadí, které najde své uplatnění i v případě robotických aplikací. Pneumatické nářadí ve srovnání s elektrickým obecně dosahuje vyšších výkonů, odolnosti proti nečistotám a celkově lepší životnosti. Jak je zřejmé, jeho nevýhodou je nutnost přítomnosti stlačeného vzduchu na pracovišti a často nevybavenost robotů pro přímé napojení, což s sebou nese nutnost externího vedení ke koncovému robotu.

Elektrický pohon má hlavní výhodu právě v jednoduchosti instalace na zápěstí manipulátoru, na kterém je zpravidla připravena možnost pro připojení k interně vedenému aplikačnímu napájení. Díky tomuto řešení nehrozí nebezpečí neúmyslného zachycení o předměty v blízkosti manipulace nebo tzv. „obmotání“ okolo ramen či kloubů manipulátoru.

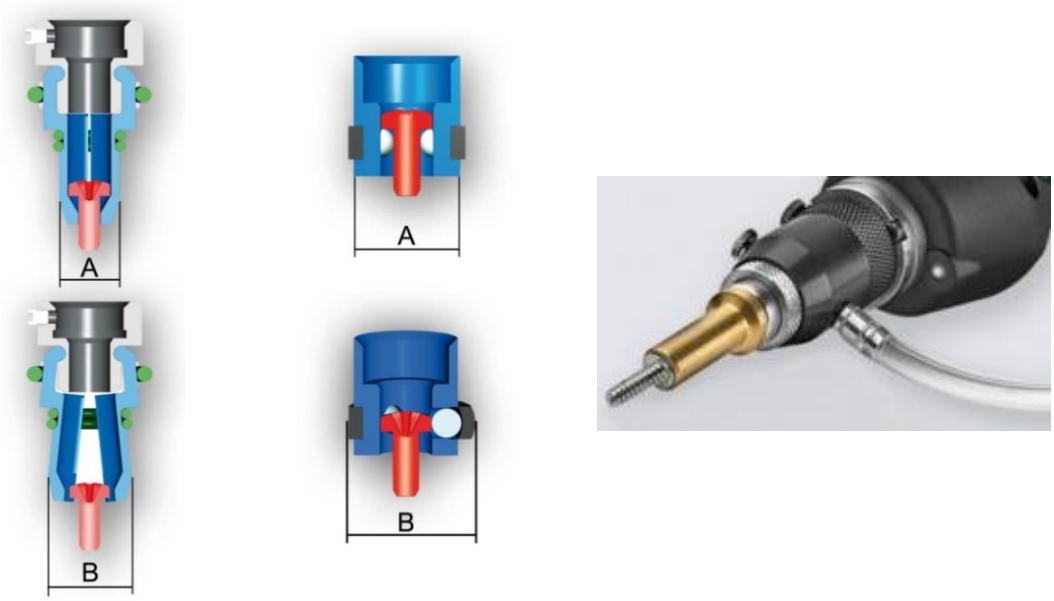
Obr. 23) a) Externí vedení stlačeného vzduchu [39], b) Připojení k interně vedeným energiím a signálům [40]

Podle úchopu šroubu na konci hubice:

Čelisťové pouzdro patří k základnímu a nejčastěji nasazovanému mechanismu šroubovacích hlav. Princip čelisťového pouzdra je založen na dělené kónické koncové hubici, která drží šroub za hlavu tak, že z ní vyčnívá pouze závitová část šroubu. Jakmile je přepraven šroub do požadované polohy, je vysunut nástroj šroubovací hlavy a čelisťové pouzdro rozevřeno. Jedná se o spolehlivý systém, který najde své uplatnění ve většině průmyslových použití. Oproti dále představeným variantám spočívá jeho nevýhoda v potřebě dodatečného prostoru pro rozevření čelistí v místě aplikace [41].

Kuličkové pouzdro je řešení s jednou nebo dvěma řadami kuliček v hubici, která drží šroub v požadované poloze do doby, než nástroj přitlačí šroub ke spojovanému materiálu. Díky této rozměrově elegantní variantě je šroubovací hlava s kuličkovým pouzdrem vhodná zejména pro aplikace, které jsou náročné na okolní prostor. V případě volby tohoto mechanismu je žádoucí, aby otvor šroubu měl sraženou hranu pro přesnější navedení a eliminaci nebezpečí zpříčení šroubu. To může nastat z důvodu nižší odolnosti mechanismu na nesprávnou aplikační polohu [41].

Podtlakový mechanismus představuje ideální variantu šroubovací hlavy především pro případy, kde je nutnost šrouby aplikovat v hlubokých a stísněných otvorech. Toho je docíleno úzkou hubicí, dodávanou v různých délkách podle potřeby. Princip úchopu je zde realizován pomocí podtlaku, který je aktivován při najetí nad šroub a nasáván za horní stranu hlavy. Jak tedy vyplývá, tento mechanismus je nutno spárovat s nepřímým podáváním šroubů. Kromě delších časů podávacího cyklu sebou toto řešení nese i nevýhodu v náchylnosti systému na nasávání nečistot, což klade vyšší požadavky na jeho pravidelnou a častější údržbu.

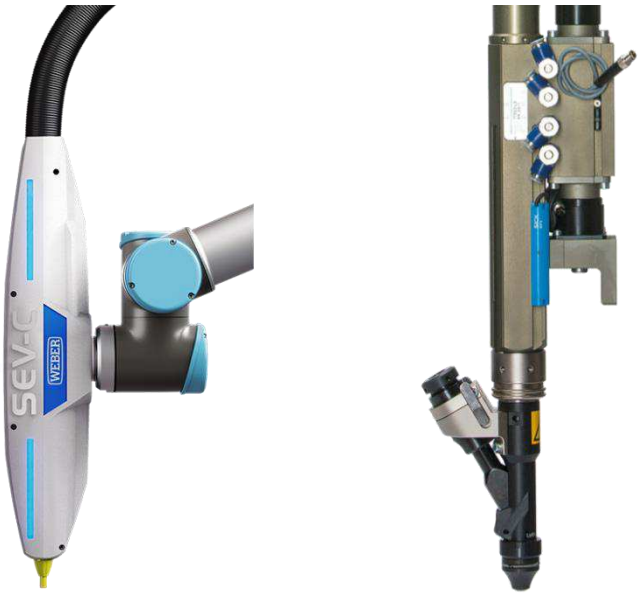


Obr. 24) a) Čelisťové pouzdro [41], b) Kuličkové pouzdro [41], c) Podtlakový mechanismus [42]

Podle interakce s člověkem:

Kolaborativní šroubovací hlavy jsou vybaveny senzory pro možnost přímé interakce operátora s kobotem bez nutnosti investice do dalšího bezpečnostního vybavení. To s sebou přináší výhody v jednoduché a rychlé implementaci. Na druhou stranu maximální rychlost kobotu musí být snížena v závislosti na rozvržení pracoviště, což může působit problémy s balancováním času linky.

Průmyslovou šroubovací hlavu lze od kolaborativní snadno rozeznat pro její robustnost a surové tvary. Tyto hlavy jsou konstruovány s důrazem na rychlost aplikace, vysoké objemy a bezúdržbovost, což s sebou často přináší i vyšší hmotnost. Z těchto důvodů je nezbytné pracoviště doplnit o bezpečnostní prvky.



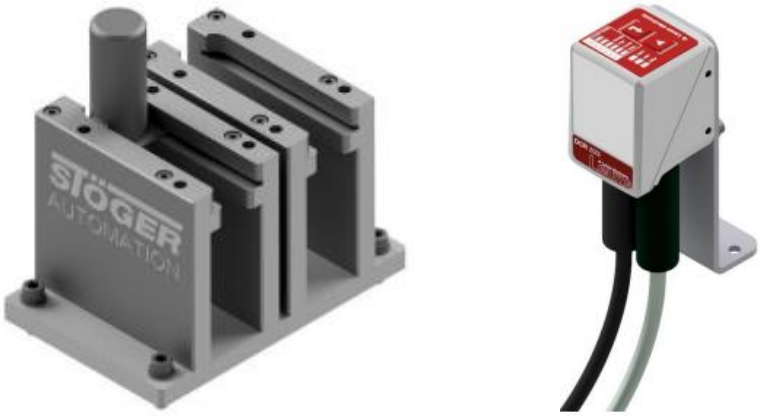
Obr. 25) a) Kolaborativní šroubovací hlava [43], b) Průmyslová šroubovací hlava [44]

Podle přívodu šroubů:

Přímý a **nepřímý** způsob přívodu šroubů byl již detailně představen v samostatné kapitole 4.1.2. Je potřeba si uvědomit, že ke každé variantě přívodu šroubů musí být kromě podavačů přizpůsobeny i šroubovací hlavy.

4.2.5 Stanice pro výměnu nástrojů

Robotické pracoviště lze vybavit opčním uzlem pro automatickou výměnu nástrojů. Ta musí být vybavena koncovým efektorem s rychloupínacím mechanismem, stanicí nástrojů a čtečkou kódů. Princip je založen na najetí robotu do stanice nástrojů, kde robot pomocí rychloupínacího mechanismu odebere nástroj a čtečka nasnímá kontrolní kód na jeho těle. Na základě této informace je volán obslužný program pro daný typ nástroje. V případě potřeby výměny nástroje dojde k jeho odložení do stanice a následné odebrání požadovaného nástroje. Díky tomu může jeden robot zastávat jak manipulační, tak i šroubovací funkci, popřípadě, ve spojení s více podavači, šroubovat různé velikosti šroubů. To je vhodné především pro aplikace, kde není prioritou výsledný takt, ale naopak jsou kladeny vysoké požadavky na zastavěný prostor [45].



Obr. 26) a) Stanice nástrojů, b) Čtečka kódů [45]

4.2.6 Řídicí technika

Řídicí technika je nezbytnou součástí všech systémů a šroubovacího pracoviště nevyjímaje. Jsou na ni kladeny požadavky pro bezproblémové připojení každého zařízení a možnost zpětného ovládání ostatních členů pracoviště. K tomu se zpravidla využívá PLC nebo průmyslový počítač doplněný o HMI rozhraní pro jednodušší ovládání a vizualizaci. Pro komunikaci s nadřazeným řídicím systémem je potřeba uvedené vybavení propojit pomocí průmyslových sběrnic jako Profibus, ProfiNet nebo Ethernet s TCP/IP protokolem. Řídicí techniku pro robotické šroubovací pracoviště lze rozdělit na impulzní a procesní, kde každé obstarává jinou řídicí funkci v systému [46][47].

Impulzní

Impulzní řídicí technika je nadřazená řídicí metoda pro šroubovací stanice. Zajišťuje tedy správnou funkci jak šroubovacího procesu, tak i periférií, například podavače šroubů, přívodní jednotky, snímače apod.

Procesní

Procesní řízení slouží ke kontrole, regulaci, dokumentaci a vyhodnocení samotného šroubovacího procesu. Na základě komplexnosti aplikace je možné volit zařízení, které může

obsluhovat procesy jako sepnutí šroubovacího vřetene podle zadaného průběhu a otáček, korigování utahovacího momentu a hloubku zašroubování.

Obr. 27) Řídicí jednotky s integrovanou obrazovkou [48]

4.2.7 Robot

Pro automatizaci šroubovacího systému je nutný výběr z rozmanité nabídky robotů, kde díky rozmachu těchto zařízení v průmyslu připadá v úvahu stále více možných variant. Ke správné volbě je tedy potřeba si uvědomit požadavky na robotické vybavení, které se odvíjí od mnoha parametrů. Mezi základní parametry patří počet polohovatelných os, manipulační dosah, maximální dovolené zatížení, opakovatelnost, přesnost atd. To vše je při výběru nového zařízení nezbytné vzít do kontextu s pořizovací cenou.

Roboty lze mimo jiné dělit podle kinematiky na paralelní a sériovou. Paralelní roboty vynikají svou vysokou rychlostí a přesností. Naopak komplikované je jejich řízení v případě dodatečného dynamického zatížení, které je tvořeno součástkami jako přívodní hadice a jiné volně uchycené předměty. Jejich hlavní uplatnění je především v aplikacích pro jemnou manipulaci, například v chemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Z tohoto důvodu je dále proveden popis robotů pouze se sériovou kinematikou.

Kartézské

Kartézský, souřadnicový nebo lineární robot, to je výčet názvů pro typicky lineární modulární stavebnicový systém. Jeho pohyb je zpravidla realizován v kolmých, nezávisle na sobě řízených osách, které je možné doplnit o dodatečné spřažené osy. Právě modularita představuje hlavní výhodu ve snadné implementaci do výrobní linky při zachování nízkých vstupních nákladů [49][50].

Obr. 28) Kartézský robot [50]

Průmyslové

Jedná se o komplexní zařízení, které je možné díky jejich univerzalitě nalézt v každém průmyslovém odvětví. Průmyslové roboty jsou konstruovány především jako čtyř, pěti či šestiosé angulární manipulátory se širokou škálou parametrů pro dosažení optimální aplikační pozice. Většinu průmyslových robotů je možné montovat v různých polohách, tzn. standardně vertikálně, pod úhlem, zavěsit nebo dokonce instalovat na pojezdové dráhy. To je, spolu s jejich velmi rozšířenou nabídkou, činí aktuálně nejčastěji nasazovanými roboty, u kterých je zaručena vhodnost pro každou zamýšlenou aplikaci.

Obr. 29) Průmyslový robot [51]

SCARA

SCARA robot je druh průmyslové robotu kombinující angulární a lineární pohyb pro dosažení vysokých rychlostí a přesností celku. Typicky jsou SCARA roboty dodávány jako čtyřosé manipulátory, kde první, druhá a čtvrtá osa vykonává rotační pohyb a třetí osa translační pohyb. Tím je docíleno, oproti klasickým průmyslovým robotům, poměrně jednoduché konstrukce při nižších výrobních nákladech. Mezi jejich hlavní využití patří manipulační, kontrolní nebo základní montážní operace, u kterých není potřeba natočení koncového efektoru.

Obr. 30) SCARA robot [52]

Kolaborativní

Kolaborativní roboty, též nazývány jako koboty, jsou zásluhou svých tvarů, použitých materiálů a především snímačů přizpůsobeny pro přímou interakci s člověkem. Jejich bezpečnostní funkce spočívá v nižší maximální rychlosti a detekci nárazu pomocí citlivých snímačů, které v případě vyhodnocení doteku ihned zastaví zařízení. Díky tomu je možné koboty osazovat bez nutnosti ochranných prvků a využít spolupráce s člověkem. Před jejich volbou je nezbytné ověřit, zda zamýšlená aplikace je vhodná a bezpečná pro kolaborativní použití a to včetně uvažovaného periferního zařízení.

Obr. 31) a) Kolaborativní robot se dvěma pažemi [53], b) Sedmiosý kolaborativní robot [54]

4.3 Manipulace

Pro urychlení toku materiálu a eliminaci manipulačních časů operátorů je optimální zařadit maximální míru automatizace i v případě mezioperační dopravy výrobního procesu. To lze řešit způsoby jako dopravníkové systémy, roboty nebo manipulátory nesoucí chapadlo. Mimo rozbor vhodných řešení mezioperační dopravy je dále provedena analýza nezbytné senzoriky pro manipulaci a montáž krokových motorů.

4.3.1 Dopravníky

Na trhu je nabízeno nepřeberné množství dopravníkových systémů, mezi kterými může být obtížné vybrat právě tu správnou volbu pro zamýšlenou aplikaci. Jelikož zadané téma se zabývá automatizací výrobního procesu, jsou z uvažovaných řešení vyloučeny nepoháněné dopravníky a důraz je kladen pouze na poháněné varianty s možností řízení. Kromě toho je nutné brát v potaz uložení součástek na dopravníkovém systému. Z důvodu robotické šroubovací operace je vhodné uvažovat uložení v zakládacích paletách tak, aby byla zaručena přesná poloha bez potřeby dodatečného kamerového navádění.

Na základě uvedených faktů lze uvažovat varianty jako řetězový, řemenový, válečkový a alternativně pásový dopravník, nesoucí speciálně pro tyto účely konstruovanou zakládací paletu. Tu je nutné v určité pozici zablokovat tak, aby mohly probíhat požadované operace. K tomu se využívá pneumatických válců, které často slouží, kromě aretace, k zvednutí celé zakládací palety nad dopravník. Tím je dosaženo vysoké přesnosti polohování a lepší přístupnosti.

Při dalším rozhodování, který z vyjmenovaných dopravníků je ten pravý, je rovněž důležité zaměřit se na linii dráhy a případnou nutnost přítomnosti výhybek či křižovatek. Díky těmto zařízením je možné vytvořit velmi členité a variabilní dráhy, což může dále zvýšit výrobní kapacitu procesu [55][56][57].

Obr. 32) a) Řemenový dopravník s aretací, b) Válečkový dopravník se zakládací paletou [57]

4.3.2 Chapadla

Chapadla bývají zpravidla použity jako koncové efektory robotů a manipulátorů, kde představují nedílnou součást manipulačních a montážních celků. Jejich volba se provádí na základě tvaru, velikosti, hmotnosti a vlastnostech přepravovaného materiálu. V praxi se vyskytují sériově nebo individuálně řešená chapadla.

Nabídka sériově vyráběných typů chapadel se díky vysoké poptávce a rostoucímu počtu výrobců neustále zvětšuje. Na trhu je možné najít komplexní řešení pro optimalizaci transportu výrobků více či méně standardních tvarů. Zde je možné setkat se především s uchopovacími mechanismy, které jsou vybaveny řízenými uchopovacími čelistmi. Chapadlo s otevřenými čelistmi přejede do určené uchopovací polohy, kde pomocí uzavření čelisti odebere součást a provede její transport. Jakmile je součást v požadované poloze, proběhne otevření čelistí a odjezd chapadla.

I přes široké portfolio sériově dostupných uchopovacích chapadel je nutné uspokojit specifické požadavky zákazníků. To se týká zejména chapadel pracujících na principu podtlaku, která bývají konstruována jako modulární systémy. U těchto typů se využívá hlavně hliníkových profilů pro základní rám, který je doplněný o přísavky. Tím je zaručena možnost jednoduché adaptability dle potřeb zákazníka. V závislosti na přepravovaném materiálu je možné využít i jiných prvků, například elektromagnetů.

Obr. 33) a) Kolaborativní uchopovací mechanismus [58], b) Podtlakové chapadlo [59]

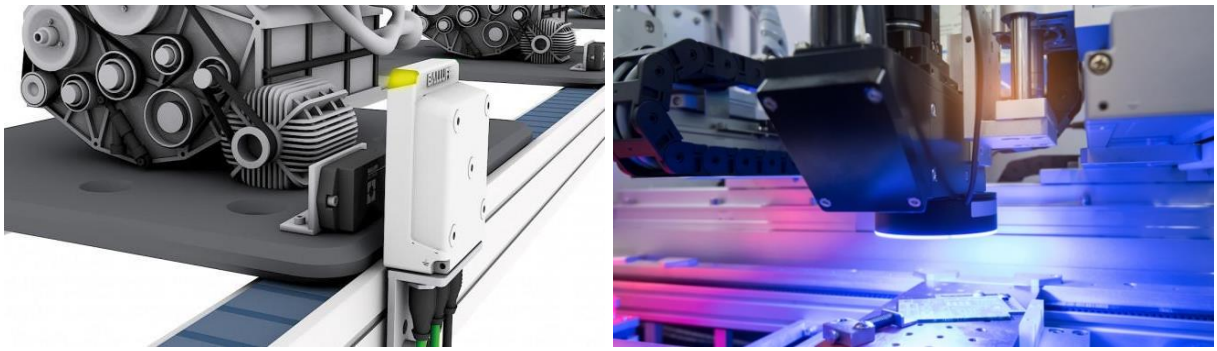
4.3.3 Senzorika

Automatizovaný výrobní proces se neobejde bez kontroly aktuálních stavů a jejich zpětném reportování do řídicího systému. Právě k tomu jsou určeny prvky jako snímače, průmyslové čtečky a strojové vidění.

Snímače představují základní element každého automatizovaného pracoviště. Mají za úkol předávat informace do řídicího systému, aby bylo možné vyhodnocovat, v jakém stavu se výrobní a bezpečnostní část systému nachází. U montážních pracovišť, jako je to zadané, lze předpokládat především využití přítomnostních, polohových a rychlostních snímačů. Díky jejich velkému rozšíření a oblibě pro nízkou cenu a spolehlivost je na výběr z širokého portfolia produktů.

Pro identifikaci součástek, přípravků nebo zakládacích palet se používají průmyslové čtečky. Ty lze rozdělit na průmyslové čtečky čárových kódů nebo RFID čtečky, kdy každá pracuje na jiném principu, vhodném pro odlišné použití. Standardní průmyslové čtečky čárových kódů skenují kódy (DMC, QR, atp.) pomocí laseru a instalují se pro aplikace jako načítání obslužného programu, ověřování správnosti použitého materiálu, evidování do informačního systému a podobně. V případě potřeby nejen čtení, ale i zapisování a editace kódů je možné použít RFID technologii, která pracuje na principu radiofrekvenční identifikace. Mezi její další výhody patří možnost zašifrování údajů a schopnost čtení bez přímé viditelnosti kódu. Na druhou stranu standardní průmyslové čtečky mají nižší pořizovací i provozní náklady [60].

Kromě snímačů a čteček je možné se v poslední době setkat s čím dál častěji vyžadovaným strojovým viděním. Jeho účel spočívá v dosažení vyšší adaptability systému na náhodné podněty, ať už se jedná o nasazení pro kontrolu kvality produktu, sběr dat nebo navádění strojů. Pro řešenou problematiku tato možnost přichází v úvahu především pro sběr dat a navádění strojů. Nicméně pokud to situace nevyžaduje, je vhodné se nasazení strojového vidění vyhnout z důvodu vysoké ceny, náchylnosti na rozlišení kontur a barev materiálů, delší době vyhodnocení a s tím i spojeného navýšení výrobního času [61].



Obr. 34) a) RFID čtečka ve výrobní lince [62], b) Kontrola pomocí strojového vidění [61]

4.4 Řídicí systém

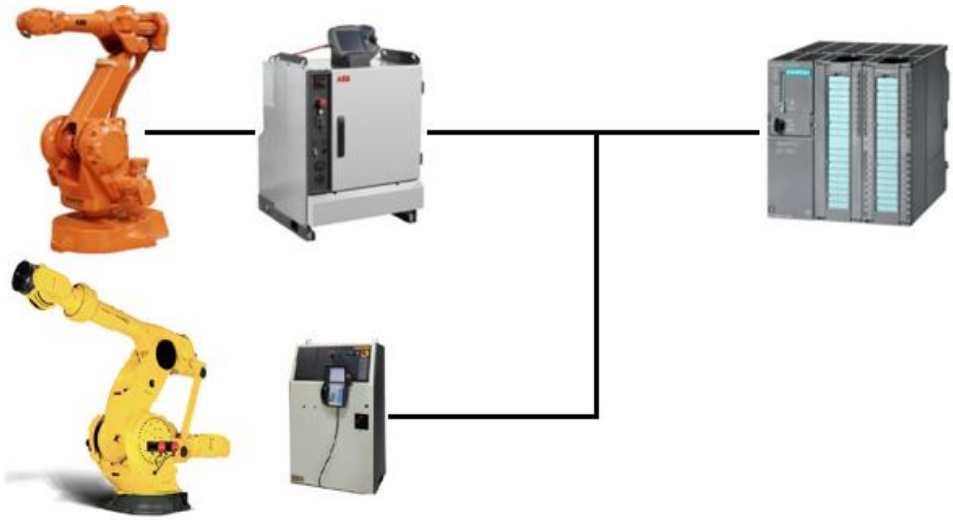
Základní smysl řídicího systému byl popsán již v úvodu kapitoly 4.1.6, kde je proveden popis řídicí techniky pro robotický šroubovací proces. Ta má za úkol řídit pouze vlastní šroubování, kdežto nadřazený řídicí systém zastřešuje celé výrobní pracoviště. Jedná se tedy o pomyslný mozek, který na základě přijatých signálů a naprogramovaných dat ovládá od jednotlivých akčních členů, přes roboty, až po podružné řídicí systémy jako je ten pro šroubovací proces.

4.4.1 PLC

Programmable Logic Controller, zkráceně PLC, je kompaktní a jednoduchý průmyslový počítač. Je navržený aby zvládal nepříznivé podmínky v průmyslu, což mu přiděluje pozici nejčastěji využívané techniky pro řízení výrobních systémů. V automatizovaných procesech se s ním můžeme setkat u různých výrobních strojů, linek a také robotů. Nejen kvůli své velké rozšířenosti, ale i pro jednodušší orientování je zavedena mezinárodní norma, která definuje podobu všech jeho pěti programovacích jazyků.

Řízení robotických pracovišť pomocí PLC probíhá tak, že PLC zastupuje nadřazený řídicí systém, který předává povely jednotlivým robotickým kontrolérům. To umožňuje propojení a řízení odlišných značek robotů, včetně zapojení různých dalších řídicích systémů a akčních členů. Jako další výhoda je již zmíněná standardizace ovládací techniky, tedy softwaru a ovládacího rozhraní. Díky tomu se programátor nemusí učit specifické programovací jazyky pro každou značku robotů, což přináší rychlejší uvedení do provozu a snadnější údržbu.

Z toho vyplývá, že PLC řídicí systém je u robotických aplikací vhodný zejména pro výpočetně náročné úlohy. Pod tím si lze představit především rozsáhlé aplikace s více ovládanými zařízeními, například jako nasazení většího počtu robotů v kombinaci s komplikovanými dopravníkovými systémy, kontrolními buňkami, naváděním za pomoci strojového vidění atd. [63].



Obr. 35) PLC řízení [64]

4.4.2 Robotický kontrolér

Jak vyplývá z kapitoly zabývající se řízením pomocí PLC, každý robot musí mít svůj vlastní robotický kontrolér. Ty jsou konstruovány v podobě kompaktního rozvaděče, který v sobě ukrývá všechnu nezbytnou techniku pro správnou funkci robotu. Kromě standardní výbavy jako jsou řídicí a bezpečností moduly, může být kontrolér doplněn o širokou škálu dalších opcí. Z tohoto důvodu dodavatelé robotů nabízí více možných variant velikostí v závislosti na zvolené úrovni výbavy.

Robotické kontroléry primárně slouží pro řízení samotných pohybů robotu a připojeného koncového efektoru. Nicméně jejich využití lze rozšířit jak pro řízení více robotů, tak i v omezeném měřítku pro řízení celého výrobního systému. To je zajištěno

vyčleněním jednoho robotického kontroléru, který funguje jako nadřazený řídicí systém pro ostatní připojené kontroléry. Díky tomu lze řídit robotické pracoviště včetně podružných akčních členů pomocí jednoho ovládacího panelu.

Možnost soustředit řízení celého výrobního pracoviště do robotického kontroléru sebou přináší mnoho výhod. V první řadě se jedná o dostupnost všech dat přes jeden ovládací panel, ať už se jedná o programování, seřizování, zálohování a další správu. Rovněž je možnost využít simulační softwary výrobců robotů, díky čemuž se vytvoří věrná kopie zamýšleného pracoviště včetně jeho odladění a zjištění výsledného taktu. V neposlední řadě je vhodné zmínit výhodu nižších nákladů na hardware a programování, s kterými by, v případě využití PLC řízení, bylo nutné počítat.

Centralizace řízení do robotického kontroléru má však své limity. Ty jsou především v omezených schopnostech výkonu, připojení řídicích signálů, nemožnosti vypnutí řídicího kontroléru v případě provozu pouze opčních uzlů apod. Proto je tato metoda využívána především pro méně náročné úlohy [65].

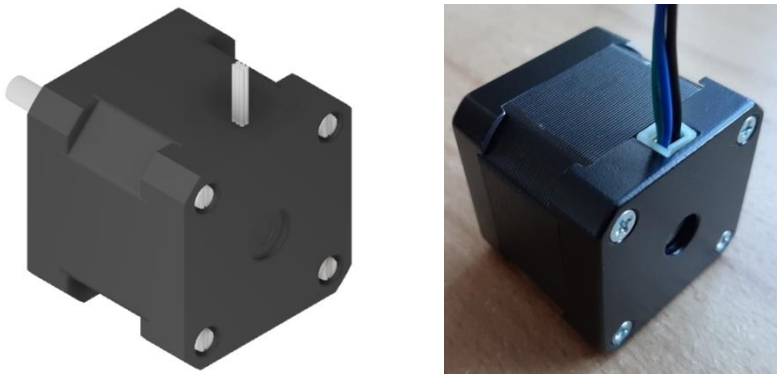
Obr. 36) Řízení robotickým kontrolérem [66]

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ

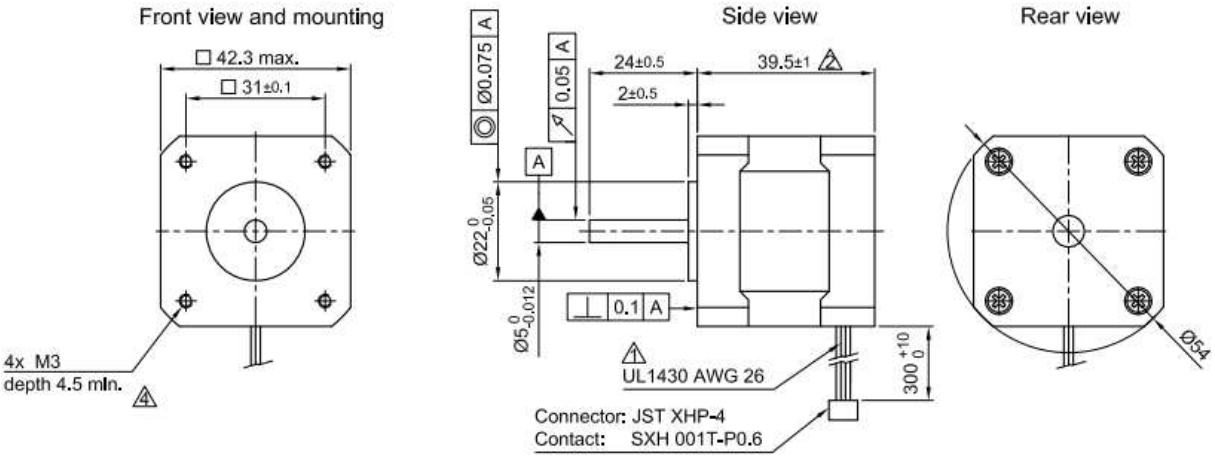
Jak bylo uvedeno v předešlé kapitole, nejvýhodnější montážní operací pro změnu z ručního na automatizovaný proces představuje výsledné sešroubování krokového motoru. Z tohoto důvodu jsou dále představeny varianty robotických pracovišť, zabývající se automatickým šroubováním s ručním sestavením a založením součástek do přípravku.

Před samotným navrhováním je potřeba představit parametry řešeného krokového motoru. Zadání práce určuje modely NEMA 14, 17 a 23, které se vyrábí v rozměrech od 25x25x30 až do 60x60x126,5 nebo 56x56x138 milimetrů v závislosti na zvoleném typu. Jelikož se jedná o poměrně velký rozptyl, je při navrhování nutné myslet na tento fakt a konstruovat pracoviště s možností pojmout celou škálu požadovaných rozměrů. Nicméně pro zjednodušení dalšího postupu práce byl jako výchozí krokový motor vybrán model NEMA 17 s typovým označením ST4209M1704-A, který s rozměry 42x42x39,5 milimetrů spadá zhruba do středu řešených modelů. Pro tento typ byl stanoven limit 16 kusů na jeden přípravek. V případě aplikace jiného modelu pak vzniká rozdíl pouze v upínacích rozměrech, tedy počtu kusů v přípravku, a naprogramovaných aplikačních polohách.

V neposlední řadě je potřeba vzít v potaz šrouby. U všech řešených modelů jsou použity šrouby se zápustnou hlavou a křížovou drážkou. Avšak rozdíl nastává ve velikostech závitu, kdy je podle rozměrů krokového motoru použit závit M3 či M4, kvůli čemuž je potřeba uvažovat s výměnou nástrojů. Rovněž je velmi častá odlišná délka závitu, která musí být řešena buď výměnou materiálu v podavači, nebo zapojením více podavačů do systému.



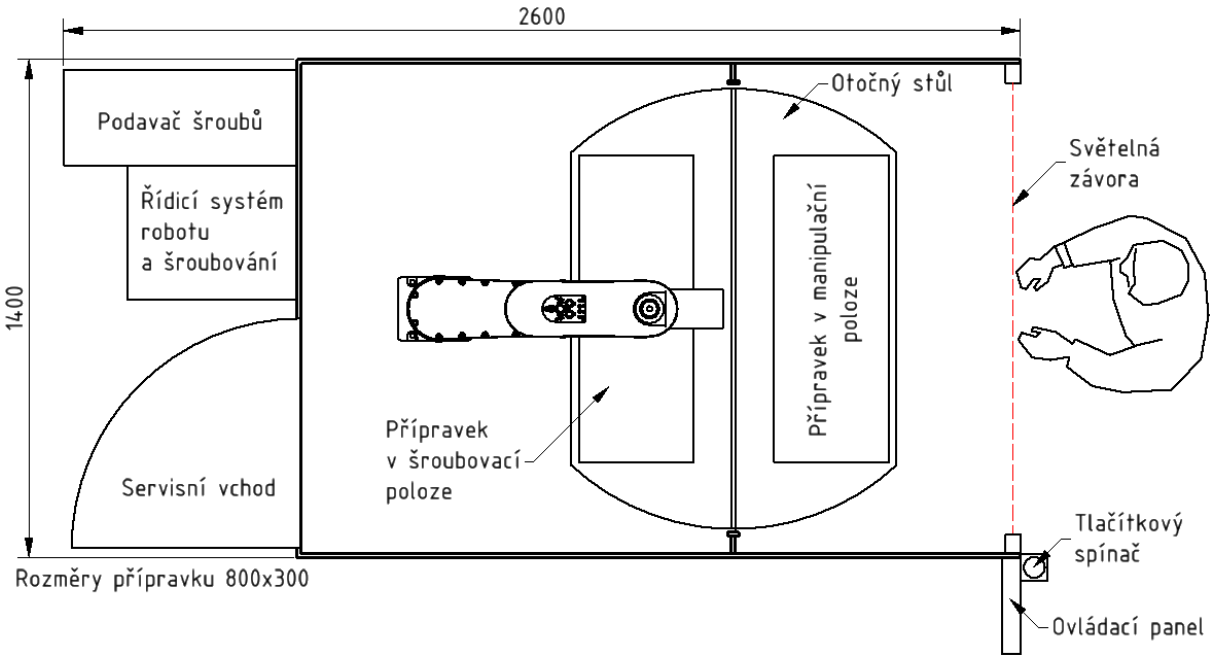
Obr. 37) 3D model použitý pro tvorbu návrhu ve srovnání s reálným krokovým motorem



Obr. 38) Rozměry výchozího krokového motoru ST4209M1704-A [67]

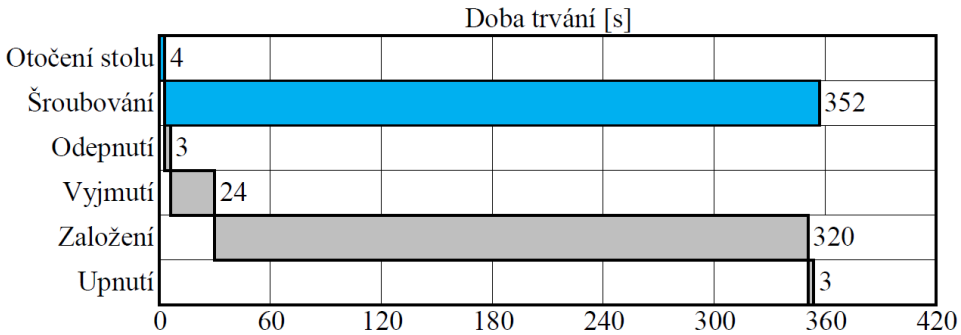
5.1 Varianta A

První varianta je založena na využití SCARA robotu s průmyslovou šroubovací hlavou, u které se počítá s manuální výměnou nástrojů. Pracoviště je vybaveno jednotkou pro přímý přívod šroubů, přičemž podavač a řídicí systémy jsou umístěny mimo oplocený prostor pracoviště. To umožňuje doplňování materiálu a různé softwarové úkony řešit i během provozu. Dopravu zajišťuje otočný stůl, kde je šroubovací a manipulační prostor stolu rozdělen pomocí pevné zástěny. Díky tomu může ve stejný okamžik robot šroubovat a obsluha odebírat hotové kusy nebo chystat výrobky ke šroubování. Obě strany stolu jsou si totožné a jejich konstrukce byla navržena s důrazem na upnutí co možná nejvyššího počtu šroubovaných kusů na jedno otočení. Z bezpečnostních důvodů je manipulační prostor oddělen světelnou závorou, která má za úkol zamezit otočení stolu v případě výskytu obsluhy v jeho blízkosti.



Obr. 39) Nákres pracoviště varianty A

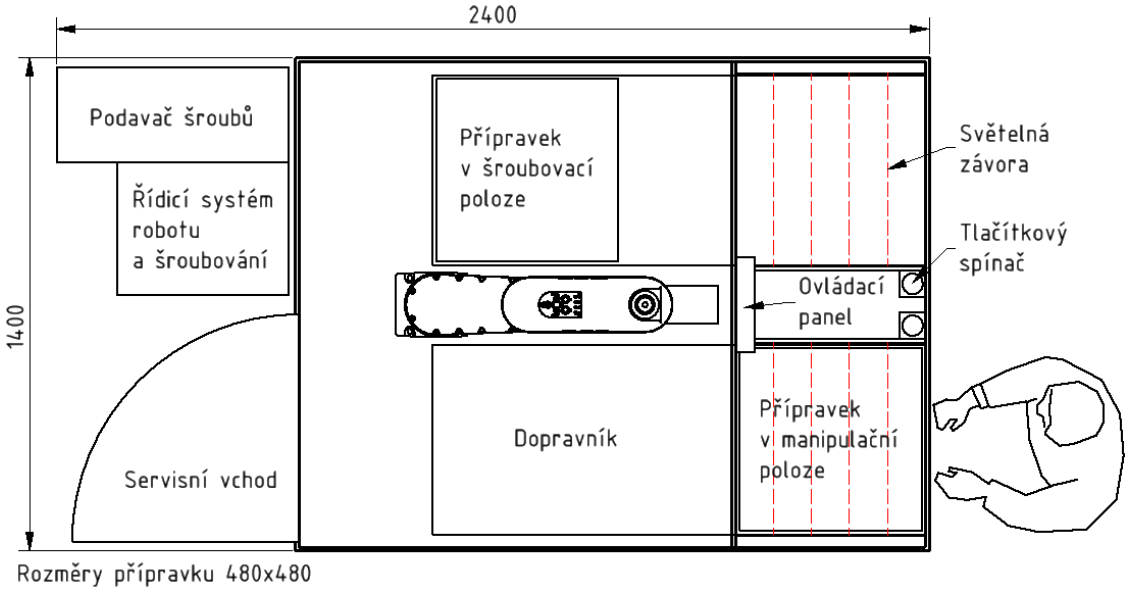
Pracoviště s otočným stolem je z uvedených variant nejnáročnější na zastavěnou plochu. To je způsobeno především předepsanou vzdáleností otočného stolu od světelné závory, která je nezbytná pro bezpečné zastavení v případě vstupu osoby. Nicméně tento prostor lze využít pro vychystání potřebných dílů k sestavení krokového motoru.



Obr. 40) Ganttův diagram varianty A

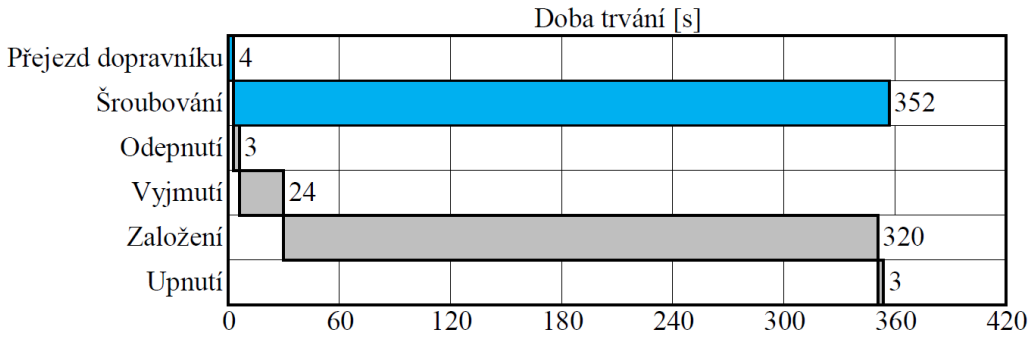
5.2 Varianta B

Tato koncepce pracoviště vychází z předešlé varianty, kde je hlavní konstrukční rozdíl tvořen v dopravě sestavené součástky k robotu. V tomto případě je využito dvou stejných typů dopravníkových systémů, které nesou paletu s přípravkem. Zde se předpokládá střídání palet, kdy jedna je ve šroubovací poloze, zatímco druhá v manipulační poloze. Pracoviště je ze zadní a boční strany oplocené, zatímco v manipulačním prostoru v přední části jsou umístěny světelné závory. Ty mají, stejně jako v předešlé variantě, za úkol kontrolovat přítomnost operátora, respektive jeho horních končetin, a zamezit jeho zranění způsobené pohybem dopravníku. Manipulační prostory jednotlivých dopravníků jsou odděleny a hlídány pomocí separátně instalovaných světelných závor. Díky tomu je možnost na jedné straně měnit přípravek či provádět jiné servisní úkony nezávislé na druhé straně.



Obr. 41) Nákres pracoviště varianty B

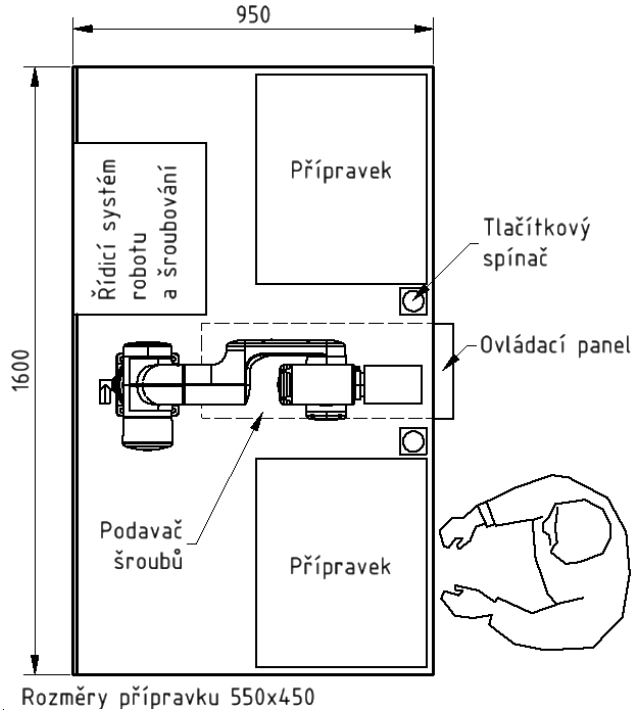
Oproti předchozí koncepci je zde manipulace zajištěna dopravníkovým systémem, díky kterému je dosaženo menších zastavěných prostor při zachování totožných výrobních časů. Jako další výhoda se jeví vytvoření nezávislé dopravy, což umožňuje předzásobení dílů v šroubovací poloze. Tím je možné nejen zkrátit výrobní čas o přejezd dopravníku, ale rovněž využít operátora na další drobné úkony jako je příprava materiálu apod. Na druhou stranu lze předpokládat mírně vyšší náklady, z důvodu implementace dvou dopravníků a příslušenství.



Obr. 42) Ganttův diagram varianty B

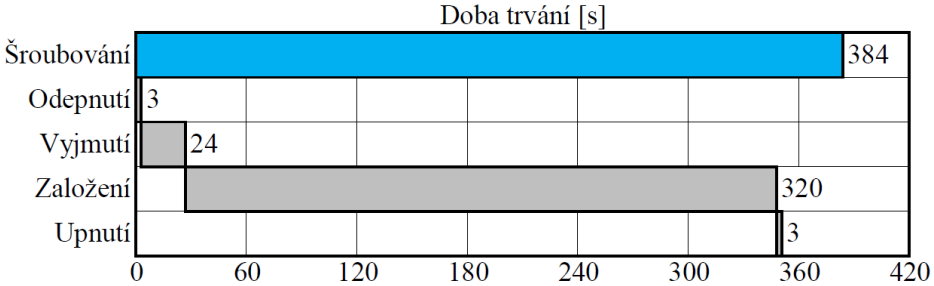
5.3 Varianta C

Poslední návrh řešení představuje kolaborativní pracoviště realizované na samostatně stojícím stole. Kolaborativní robot, umístěný ve středu stolu, obsluhuje na základě stlačení tlačítkového spínače dva stacionární přípravky po stranách stolu. Pracoviště je vybaveno kolaborativní šroubovací hlavou, u které je výměna nástrojů řešena manuálně. Z důvodu zachování kompaktnosti pracoviště je stůl konstruován s policí pod hlavním pracovním prostorem pro uložení podavače šroubů. Další rozměrově úsporné řešení se nachází v zadní části pracoviště, kde je na stěně zavěšen řídicí systém robotu a šroubovacího procesu. Zmíněné konstrukční prvky přináší výhody především v malé zastavěné ploše, absenci nákladů na dodatečné bezpečnostní systémy a v neposlední řadě možnost snadné a rychlé přestavby layoutu s požadavkem pouze na přívodní energie.



Obr. 43) Nákres pracoviště varianty C

Poslední varianta je díky využití kolaborativního robotu pracovištěm s nejmenšími požadavky na zastavěnou plochu. Mimo svou kompaktnost je patrné využití méně prvků, jak manipulačních, tak i bezpečnostních, což značí nižší pořizovací náklady. Nevýhodou kolaborativních aplikací je snížená rychlost pohybů, která má u tohoto pracoviště za následek delší šroubovací čas.



Obr. 44) Ganttův diagram varianty C

5.4 Popis Ganntových diagramů a stanovení jeho vstupních dat

Pro úplnost je vhodné doplnit informace o uvedených Ganntových diagramech, které obecně slouží ke znázornění časových průběhů a možnosti vzájemného prolínání jejich úkonů. V našem případě jsou aplikovány k zobrazení předpokládané doby trvání dvou paralelně běžících procesů výrobního cyklu 16 kusů krokových motorů NEMA 17 ST4209M1704-A. Dále je proveden popis stanovení časových údajů pro použitá vstupní data:

- Otočení stolu, přejezd dopravníku – získané z katalogových listů zařízení
- Šroubování – znalosti z vlastní praxe, kde průměrný čas aplikace jednoho šroubu činí 5,5 sekundy pro SCARA robot a 6 sekund pro kolaborativní robot, hodnota se liší podle délky pohybů robotu, typu a rozměru šroubu
- Odepnutí, upnutí – odhadovaný čas manipulace všech upínek
- Vyjmutí – odhadovaný čas odebrání a umístění hotových kusů do balení
- Založení – viz kapitola 4.1.2

5.5 Porovnání jednotlivých variant

K výběru nejoptimálnější varianty je použita multikriteriální analýza. Jejím prvním krokem je stanovení kritérií, kterým je následně přiřazena váha na základě předpokládané důležitosti pro koncového zákazníka.

Tab 3) Hodnocená kritéria pracoviště

Označení	Kritérium	Popis	Váha
K1	Čas cyklu	Výrobní čas pro stanovený počet kusů	30 %
K2	Vstupní náklady	Odhadnuté pořizovací náklady na realizaci	20 %
K3	Zastavěná plocha	Prostorové požadavky pracoviště	15 %
K4	Údržba	Předpokládaný čas a náklady na údržbu	15 %
K5	Ergonomie	Komfort pracoviště pro obsluhu	10 %
K6	Variabilita	Možnost dodatečných úprav a adaptace	5 %
K7	Komplikovanost	Náročnost konstrukce a zprovoznění pracoviště	5 %

Jako další krok je nezbytné udělat obodování jednotlivých kritérií, kde nižší hodnota představuje vhodnější řešení. To znamená, že 1 bod je nejlepší možný výsledek.

Tab 4) Obodování jednotlivých kritérií

	Varianta A	Varianta B	Varianta C
K1	2	1	3
K2	2	3	1
K3	3	2	1
K4	1	2	3
K5	3	2	1
K6	3	2	1
K7	2	3	1

Nakonec je potřeba provést sumu všech součinů kritérií s přidělenou váhou pro každou variantu. Uvedený výpočet je vyjádřen v níže uvedených vztazích [68]:

$$\begin{aligned} V_A = {} & V_{K1} \cdot B_{K1A} + V_{K2} \cdot B_{K2A} + V_{K3} \cdot B_{K3A} + V_{K4} \cdot B_{K4A} + V_{K5} \cdot B_{K5A} + \\ & + V_{K6} \cdot B_{K6A} + V_{K7} \cdot B_{K7A} = 0{,}3 \cdot 2 + 0{,}2 \cdot 2 + 0{,}15 \cdot 3 + \\ & + 0{,}15 \cdot 1 + 0{,}1 \cdot 3 + 0{,}05 \cdot 3 + 0{,}05 \cdot 2 = 2{,}15 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} V_B = {} & V_{K1} \cdot B_{K1B} + V_{K2} \cdot B_{K2B} + V_{K3} \cdot B_{K3B} + V_{K4} \cdot B_{K4B} + V_{K5} \cdot B_{K5B} + \\ & + V_{K6} \cdot B_{K6B} + V_{K7} \cdot B_{K7B} = 0{,}3 \cdot 1 + 0{,}2 \cdot 2 + 0{,}15 \cdot 3 + \\ & + 0{,}15 \cdot 1 + 0{,}1 \cdot 3 + 0{,}05 \cdot 3 + 0{,}05 \cdot 2 = 1{,}85 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} V_C = {} & V_{K1} \cdot B_{K1C} + V_{K2} \cdot B_{K2C} + V_{K3} \cdot B_{K3C} + V_{K4} \cdot B_{K4C} + V_{K5} \cdot B_{K5C} + \\ & + V_{K6} \cdot B_{K6C} + V_{K7} \cdot B_{K7C} = 0{,}3 \cdot 3 + 0{,}2 \cdot 1 + 0{,}15 \cdot 1 + \\ & + 0{,}15 \cdot 3 + 0{,}1 \cdot 1 + 0{,}05 \cdot 1 + 0{,}05 \cdot 1 = 1{,}9 \end{aligned} \tag{3}$$

Závěrečný výpočet multikriteriální analýzy ukázal jako nejoptimálnější variantu B, se kterou je dále počítáno pro vlastní práci. Na druhém místě skončila, o pouhých pět desetin bodu, varianta C. Při porovnávání těchto dvou pracovišť se však zabýváme diametrálně odlišnými systémy, kde na jedné straně stojí rychlé průmyslové zařízení oproti kompaktnímu kolaborativnímu řešení. Tento fakt je vhodné mít na paměti, přičemž variantu C lze považovat za záložní možnost pro případ, kdy zákazník dává větší váhu zastavěné ploše před rychlostí vlastního procesu.

Tab 5) Výsledné hodnocení porovnávaných variant

	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Výsledné hodnocení	2,15	1,85	1,9

6 VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ

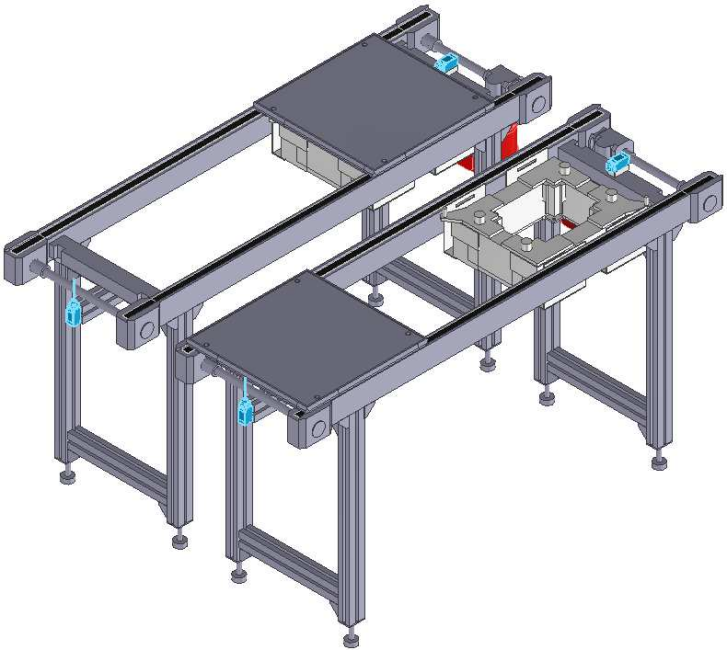
Virtuální zprovoznění robotických pracovišť lze obecně rozdělit do čtyř částí. Na úvod je nezbytné vybrat komponenty a vytvořit 3D model zamýšleného pracoviště. Poté přichází definování signálů a logiky pracoviště tak, aby bylo možné nastavit správné řízení systému. V další části probíhá programování, kde jsou nadefinována potřebná data, dráhy a proveden popis vlastního řídicího programu. Na závěr je uskutečněno změření výsledného taktu linky.

6.1 Popis a 3D model pracoviště

V této kapitole jsou vybrány vhodné komponenty a za pomoci programu Autodesk Inventor Professional 2022 je vytvořen 3D model pracoviště.

6.1.1 Dopravník

Přeprava dílů je řešena dvěma totožnými, nezávisle stojícími, dopravníkovými systémy. Jejich dodávku kompletně zajišťuje společnost Bosch Rexroth se svým modulárním transportním řešením TS 2plus. Srdcem systému je vlastní dopravníková část, kterou v tomto případě obstarávají řemenové dopravníky BS 2 o délce 1700 milimetrů, s možností reverzní funkce posuvu. Tato sekce je dodávána jako hotový celek, kde lze volit parametry motoru podle vlastních potřeb. Kromě vysoké variability pro výběr tohoto typu dopravníku rovněž hovoří nízká hlučnost a vysoká čistota provozu.



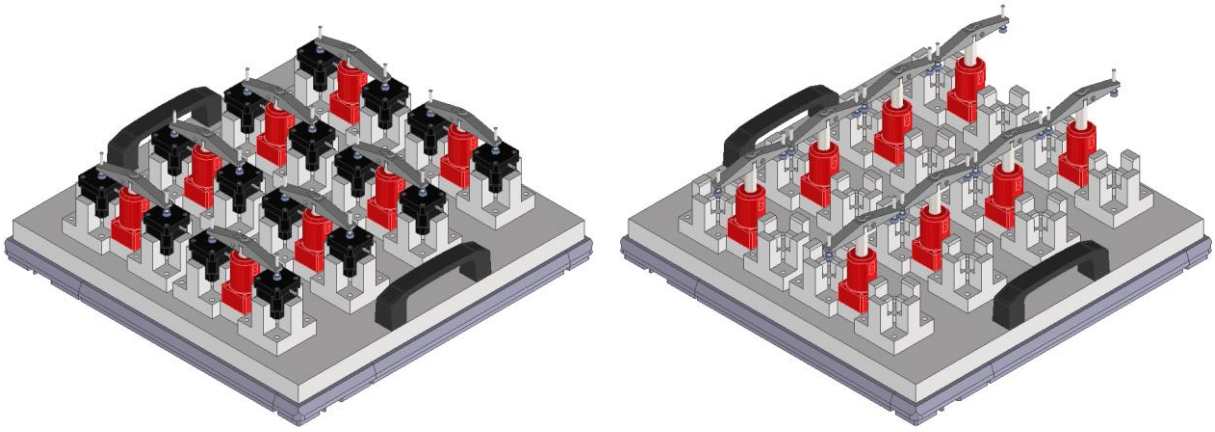
Obr. 45) Řemenový dopravníkový systém Bosch Rexroth TS 2plus

Dopravníkový systém je pro automatizovaný proces nutné dovybavit prvky umožňující přesné polohování a řízení transportu. K tomuto účelu byla vybrána paleta WT 2 s půdorysnými rozměry 480x480 milimetrů, která je pro polohování ve šroubovací poloze doplněna o poziční jednotku PE 2/X. Poziční jednotka je opatřena čtyřmi čepy, které se zasunou do pouzder palety a následně ji, pomocí pneumatických válců, vyzvednou o 33 milimetrů nad dopravník. Aby se paleta zastavila ve správnou chvíli, dopravník je na obou stranách vybaven koncovými spínači.

Obr. 46) a) Paleta WT 2, b) Poziční jednotka PE 2/X [69]

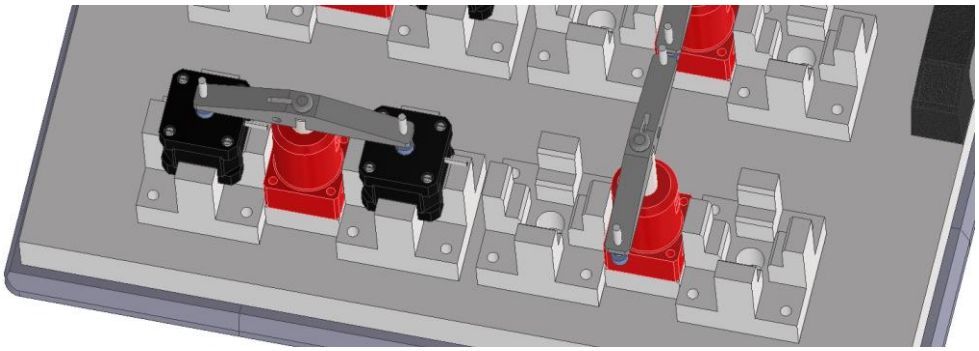
6.1.2 Přípravek

Zadání práce požaduje řešení montáže více typů krokových motorů. Jak bylo již objasněno, jednotlivé varianty krokových motorů se od sebe rozměrově poměrně značně liší, a tak bylo nezbytné s tímto faktem počítat. Z tohoto důvodu byl zkonstruován přípravek, který nabízí možnost opětovného ustavení a výměny na paletě dopravníku. Díky tomuto řešení není potřeba pořizovat pro každý přípravek paletu nebo přizpůsobovat jejich spodní stranu jako komplikovanou repliku pojezdové části palety.



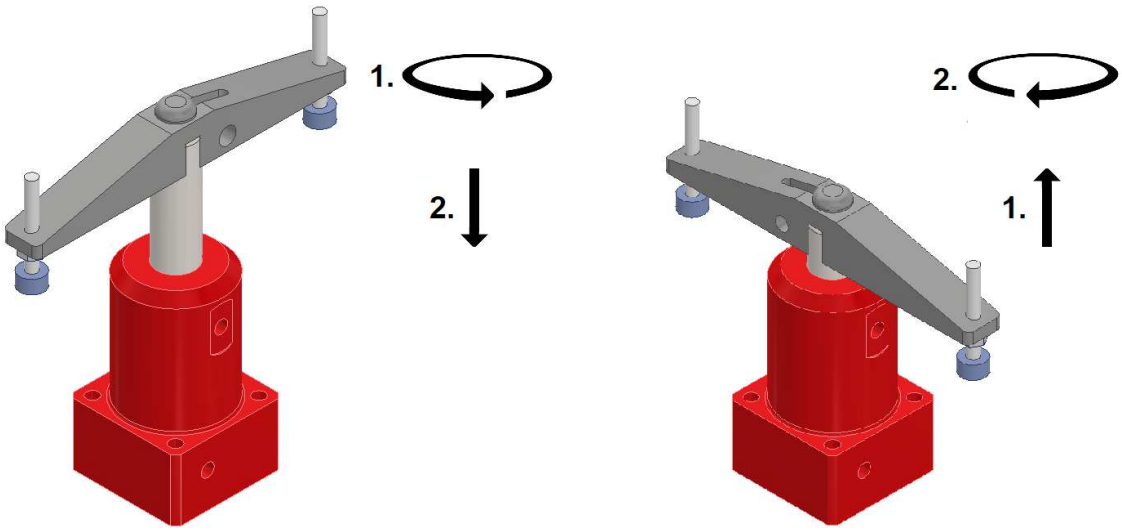
Obr. 47) Přípravek na paletě WT 2 připravený pro šroubování a zakládání

Konstrukci přípravku tvoří frézovaná hliníková deska, která je vybavena pozičními otvory pro upínací hnízda a průchozími otvory pro hřídele krokových motorů. Upínací hnízda jsou k desce přišroubovaná, což nabízí možnost jejich výměny v případě poškození. Dosedací plocha pro krokové motory je schodovité konstrukce. Tím bylo docíleno možnosti upnout více velikostí v jednom přípravku, což přineslo snížení jejich celkového počtu. Pro upnutí krokových motorů jsou použity dvojčinné pneumatické upínky Destaco 035-225-190.



Obr. 48) Detail na upínací mechanismus

Použité dvojčinné upínky vykonávají otočně posuvný pohyb, který je realizován posloupně. To se pro dosažení uzavřené polohy projevuje tak, že je napřed vykonána rotace a poté zasunutí. V případě otevřené polohy upínky je postup opačný, tedy prvně je provedeno vysunutí a následně rotace. K ovládání těchto poloh je upínka vybavena dvěma samostatnými přívody stlačeného vzduchu na boční straně válce. Součástí upínky je rameno s tlačnými prvky, které přenášejí upínací sílu na krokové motory. Výškové seřízení těchto prvků umožňují závitové díry a pojistné matice.



Obr. 49) Posloupnost pohybů upínky

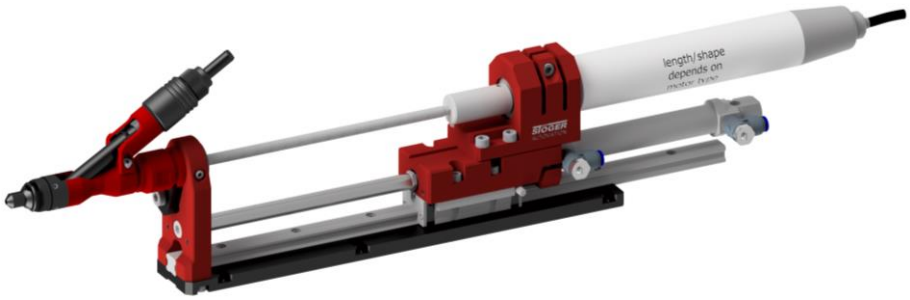
6.1.3 Robot

Pro řešenou šroubovací aplikaci, která nevyžaduje naklápění koncového efektoru, byl vybrán nový čtyřosý SCARA robot IRB 920T-6/0,55 od firmy ABB. Jak vyplývá z označení, jeho jmenovitá nosnost představuje 6 kilogramů při dosahu 550 milimetrů od středu otáčení. Díky možnosti nasazení SCARA robotu je ve srovnání se standardními šestiosými průmyslovými roboty docíleno rychlejších přejezdů, vyšší přesnosti, menší poruchovosti a to vše při nižší pořizovací ceně.

Obr. 50) Čtyřosý SCARA robot ABB IRB 920T-6/0,55 [70]

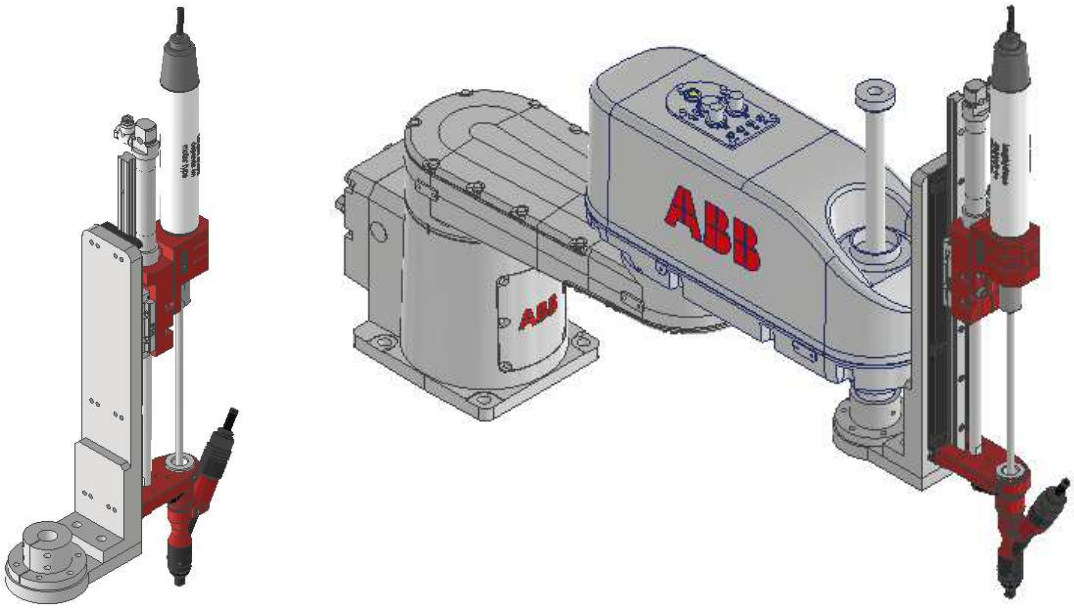
6.1.4 Šroubovací hlava

Z důvodu dané nosnosti robotu a nutnosti dosažení poloh s omezenou přístupností, byla vybrána průmyslová šroubovací hlava firmy STÖGER AUTOMATION GmbH s označením SRL 21. Tento model je nabízen jak s pneumatickým tak i elektrickým pohonem včetně automatické dopravy šroubů a jejího bezobslužného vyhození v případě vadného kusu. Mimo to dokáže sledovat a dokumentovat hodnoty jako je krouticí moment, hloubka zašroubování, rychlost a další. Šroubovací hlava SRL 21 je kompatibilní se šrouby o velikosti M2 až M8, kde je, pro jednotlivé velikosti a typy šroubů, potřeba manuální výměna šroubovacího bitu. Ta, díky rychloupínacímu mechanismu, zabere pouze pár desítek sekund. Mezi další základní parametry patří krouticí moment až 20 newton metrů, hmotnost 3,3 kilogramů a délka šroubovacího cyklu od 2 sekund v závislosti na délce závitu.



Obr. 51) Šroubovací hlava STÖGER AUTOMATION GmbH SRL 21 [71]

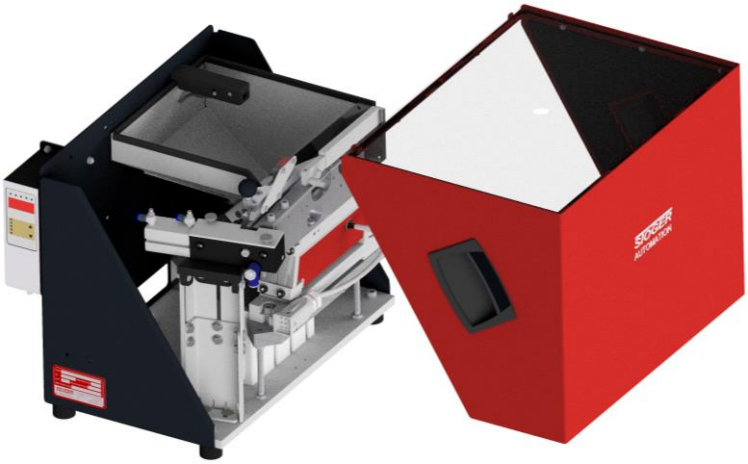
Aby šroubovací hlava mohla sloužit jako koncový efektor, je nutné zajistit její spojení s vertikální osou robotu. Jelikož pro tyto účely neexistuje standardně dodávaný upínací mechanismus, bylo nutné navrhnout vlastní konstrukci. Ta je, z důvodu jednodušší výroby, složena ze tří hliníkových dílů. První z nich, příruba, funguje na principu kleštiny, kde se nachází poziční díra totožná jako na vertikální ose robotu. Ke kleštině je připojena spojnice, která je pak sešroubovaná s nosnou platformou šroubovací hlavy. Hmotnost držáku byla pomocí 3D programu určena na bezmála 2 kilogramy, což v součtu s 3,3 kilogramy vážicí šroubovací hlavy dává celkovou hmotnost 5,3 kilogramů.



Obr. 52) Spojení šroubovací hlavy a robotu

6.1.5 Podavač šroubů

Pro automatické podávání je nezbytné šroubovací systém vybavit vhodným podavačem šroubů. Protože se v řešené úloze jedná o šrouby s povrchovou úpravou, je na místě zvolit variantu podavače s krokovým transportem. Ten k realizování pohybu generuje vibrace, které způsobují vzájemný otěr materiálu a tím zvyšování nebezpečí znečištění systému, pouze v lineární podávací kolejnici. Pro snadnou kompatibilitu byl vybrán krokový podavač stejné značky jako šroubovací hlava, tedy od firmy STÖGER AUTOMATION GmbH, konkrétně model STF 8010 ELK. Právě tento model je vhodný pro šrouby velikosti M3 až M6. Předností tohoto krokového podavače jsou, kromě nižšího tření, tichý chod a možnost připojení dodatečného zásobníku šroubů pro vytvoření delšího doplňovacího cyklu.

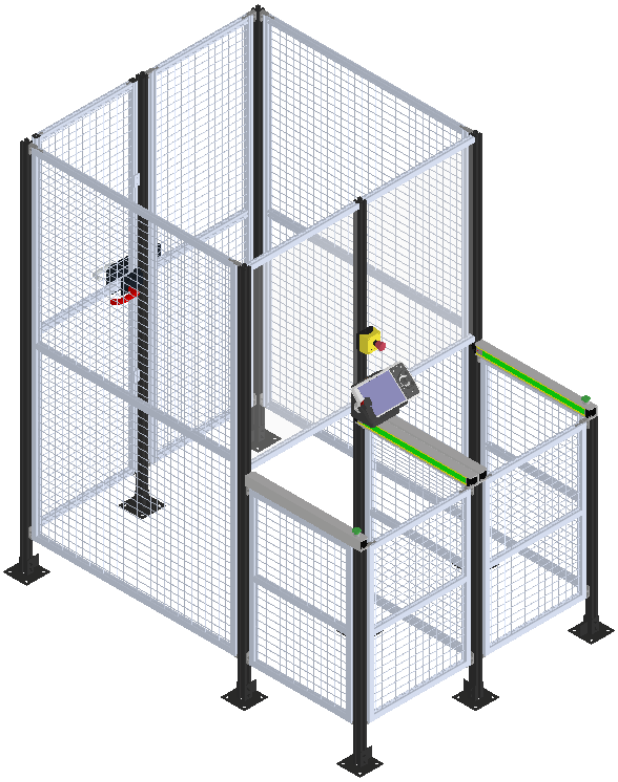


Obr. 53) Podavač šroubů STÖGER AUTOMATION GmbH STF 8010 ELK [71]

6.1.6 Bezpečnostní a ovládací prvky

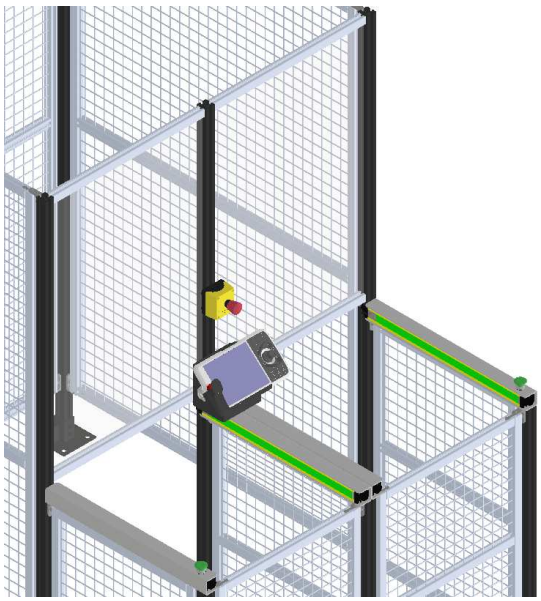
Z bezpečnostních důvodů je nezbytné každé robotizované pracoviště opatřit prvky, které v automatickém režimu zaručeně zamezí konfrontaci člověka s robotem. Tak jako u ostatních zařízení, se tímto úkolem zabývá analýza rizik. Jedná se o obsáhlou studii, která vyhodnocuje všechny potenciálně nebezpečné situace a navrhuje jejich řešení či alespoň zmírnění. Analýza rizik u řešené problematiky je však již nad rámec této práce a tak jsou dále uvedeny pouze základní bezpečnostní a ovládací prvky.

Jako hlavní bezpečnostní prvek představeného pracoviště je navrženo oplocení, které má za úkol oddělit pracovní prostor robotu od okolí. Přístup do oploceného prostoru zajišťují servisní dveře v zadní části, které jsou doplněny o bezpečnostní zámek. Pokud je robot v automatickém režimu, zámek nedovolí vstup, a naopak pokud jsou servisní dveře otevřené, robot nemůže být spuštěn v automatickém režimu. Přední část pracoviště, kde se nachází pracovní prostor obsluhy, je rozdělena pracovní deskou na dvě poloviny. Pro ochranu obsluhy je ve spodní polovině použito oplocení, zatímco v horní polovině je oddělení obsluhy od pracovního prostoru řešeno bezpečnostním plexisklem. Pracovní deska je vybavena dvěma otvory, které slouží jako přístupové místo k dopravníkům. Hlídání, aby se dopravník nepohyboval ve chvíli přítomností rukou obsluhy, zajišťují nezávislé světelné závory pro oba otvory. Pokud je jejich paprsek přerušen, příslušný dopravník se okamžitě zastaví. Neodmyslitelnou součástí výrobních zařízení jsou tlačítka nouzového zastavení. Ta se nachází jak v zadní části pracoviště na zámku dveří, tak v přední části v pracovním prostoru obsluhy na středovém sloupku oplocení a v neposlední řadě na ovládacím panelu.



Obr. 54) Oplocení pracoviště

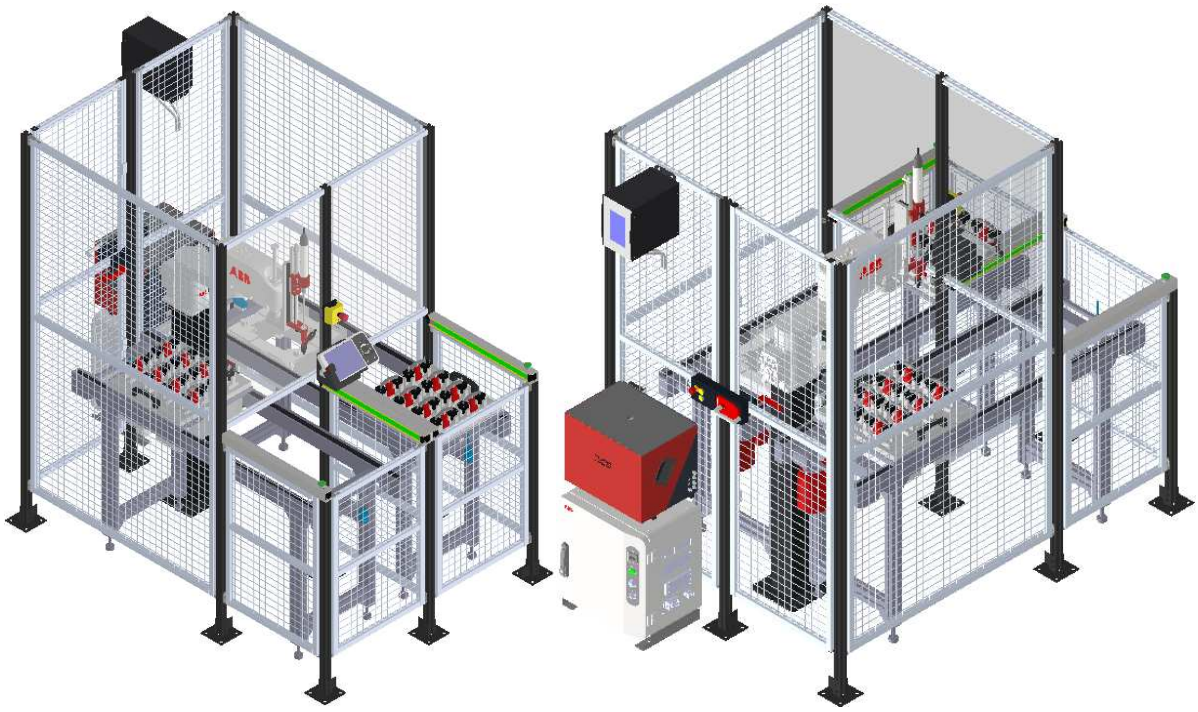
Při seznamování se s bezpečnostními prvky pracoviště je vhodné se podívat i na jeho ovládání. Již byl zmíněn ovládací panel, který je umístěn na pracovní desce. Ten v automatickém provozu slouží především k volbě programu a sledování funkcí jako je počet vyhotovených kusů, stav naplnění zásobníku šroubů a podobně. Robot pracuje samočinně, to znamená, že nachází-li se přípravek novými díly ve šroubovací poloze, je dán pokyn robotu ke šroubování. K tomu, aby paleta s přípravkem do této polohy odjela, je potřeba zmáčknout tlačítkový spínač a ten v případě nepřerušeného paprsku bezpečnostní závory aktivuje dopravník.



Obr. 55) Detail na pracovní prostor obsluhy

6.1.7 Výsledný 3D model pracoviště

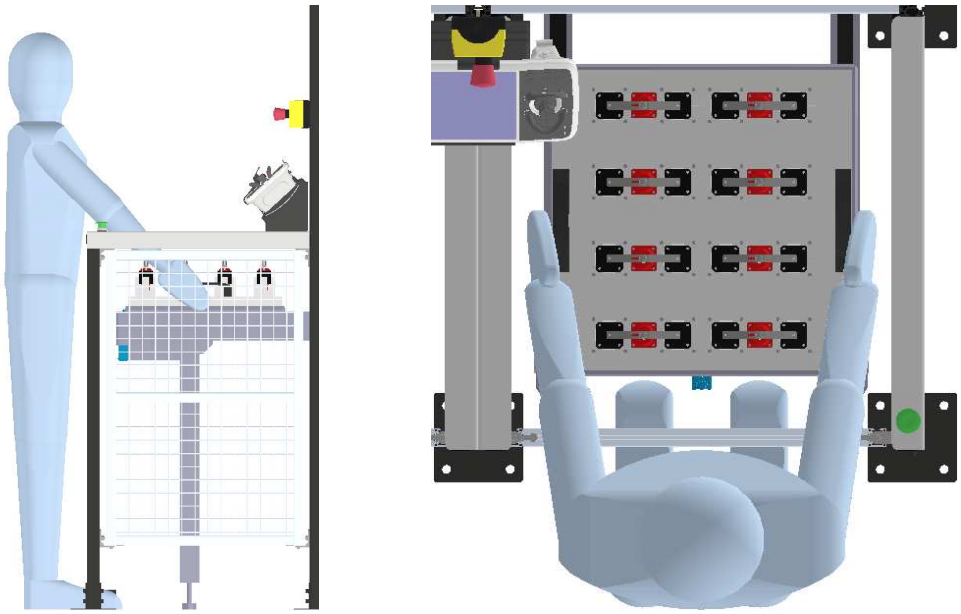
Výsledný 3D model pracoviště je importován do softwaru ABB RobotStudio. Tam proběhne výměna statických komponent, které byly využity především pro znázornění, za dynamické a jeho následné virtuální oživení.



Obr. 56) Výsledný 3D model pracoviště

6.1.8 Ergonomie pracoviště

Pro optimální rozvržení pracoviště byla během tvorby 3D modelu použita figurína, simulující operátora o výšce 176 centimetrů. Díky tomu bylo možné ověřit základní prvky ergonomie jako je nevyhovující výška nebo dostupnost pracovního prostoru.

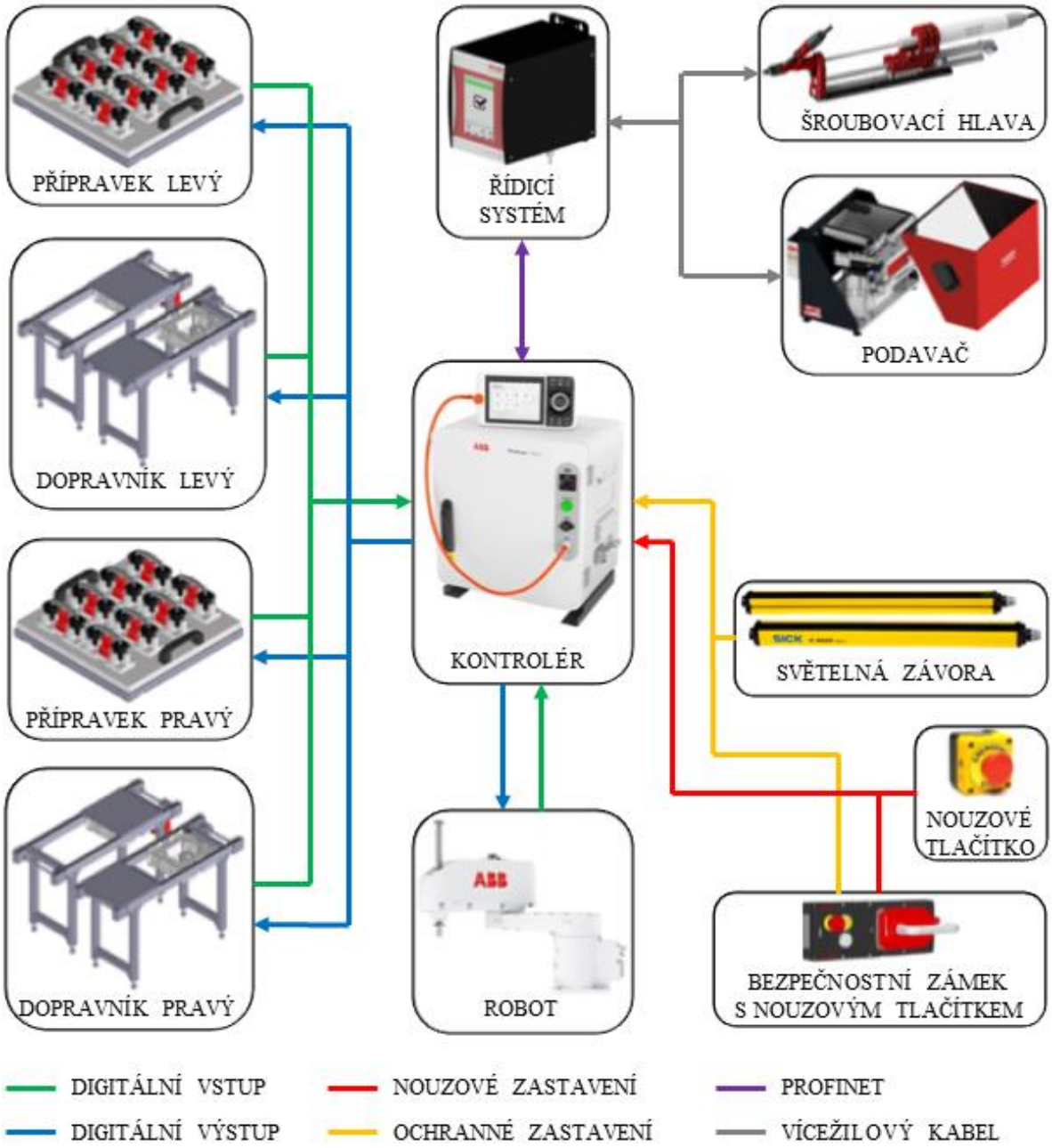


Obr. 57) Ergonomie pracoviště

6.1.9 Řízení pracoviště

Řízení robotických systémů je možné realizovat pomocí PLC nebo vlastním robotickým kontrolérem. Jelikož představené pracoviště patří k jednodušším a není potřeba vysokých výkonových požadavků, je zvolena varianta řízení pomocí robotického kontroléru ABB OmniCore C90XT. Ten nabízí dostatečný prostor pro vybavení ke komunikaci nejen s robotem, ale i s dopravníky, přípravky, hlídáním bezpečnostního okruhu a řídicí technikou šroubovacího systému.

Šroubovací systém je řízen vlastní technikou od firmy STÖGER AUTOMATION GmbH. Konkrétně byl z jejich nabídky zvolen základní řídicí systém eControl 3051. Ten obsahuje již zabudované funkce pro kompletní ovládání všech komponent zapojených do šroubovacího systému. Uživatel pouze nastaví parametry předpřipravených programů, které jsou dle potřeby voleny přímo z robotického kontroléru.



Obr. 58) Schéma komunikace pracoviště

6.2 Definování signálů a logiky pracoviště

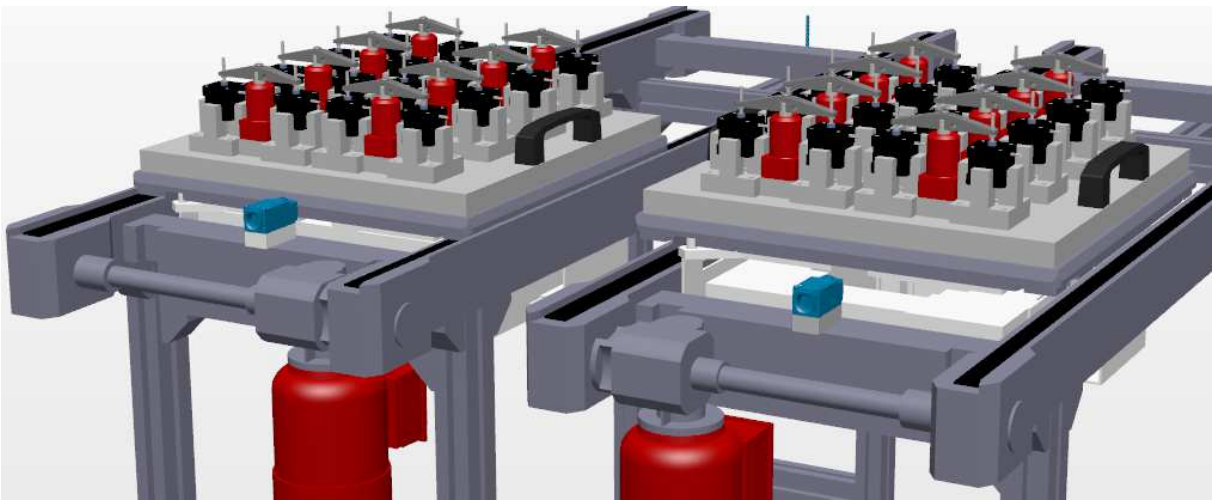
Součástí virtuálního zprovoznění je definování vstupních a výstupních signálů komponent, které slouží k vytvoření programu a logiky pracoviště. Pod tím si lze představit, že vstupní signál, typicky ze snímače, předá informaci o aktuálním stavu měřeného objektu nebo veličiny do řídicího systému. Ten, na základě naprogramované logiky, vyvodí akci a pomocí výstupního signálu dá pokyn k jejímu provedení, například akčnímu členu.

Pro provedení simulace popsaných úkonů je program ABB RobotStudio vybaven nástroji Create Mechanism a Smart Component. Nástroj Create Mechanism slouží k tvorbě vazeb mezi jednotlivými objekty. Druhý jmenovaný, Smart Component, je určen pro dodání požadovaných vlastností prvkům. Jejich princip a využití je detailně popsáno v dalším postupu práce.

6.2.1 Doprava materiálu

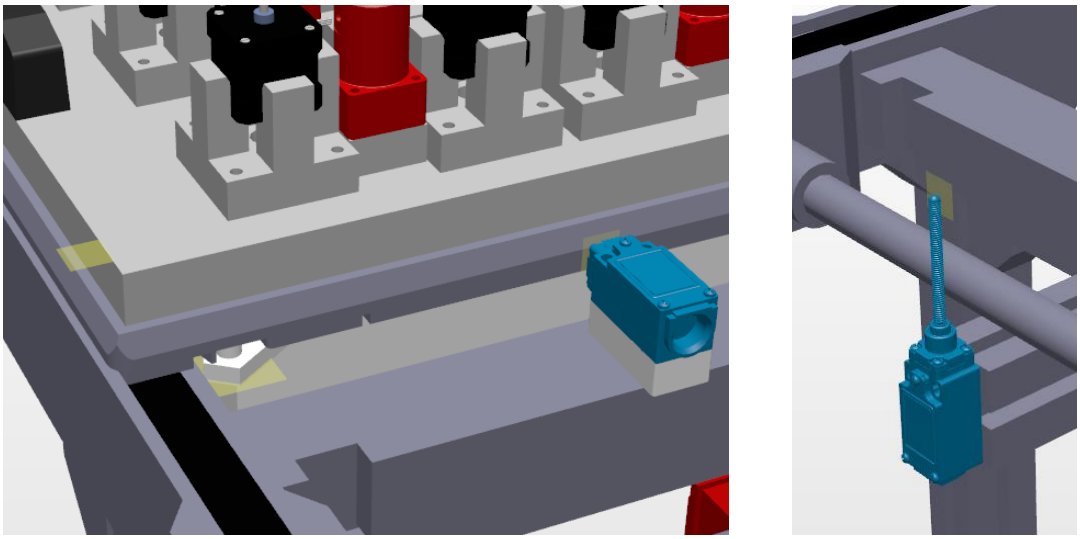
Doprava materiálu, která je v tomto případě zastoupena dopravníky, včetně jejich připojených dílů (6.1.1) a přípravků, je tvořena zrcadlově řešenými částmi. Díky tomu lze interakci zrealizovat do finální podoby pro jednu stranu a následně ji snadno aplikovat i na stranu opačnou.

Prvně je potřeba nastavit vazbu mezi dopravníkem a poziční jednotkou palety tak, aby v okamžiku její aktivace bylo možné paletu s přípravkem zajistit a vyzvednout. K tomu je využit nástroj Create Mechanism, kde základní pevnou část představuje dopravník a pohyblivá část je zastoupená poziční jednotkou, konkrétně její horní deskou a kolíky. Dále je nezbytné vybrat typ vazby a její rozsah. Jelikož se v našem případě jedná o lineární posuv, je vybrána vazba posuvná, s délkou dráhy 33 milimetrů. Posledním krokem při nastavování vazby je určení dolní a horní polohy poziční jednotky, kde dolní poloha je brána jako výchozí. Tyto polohy jsou následně propojeny nástrojem Event manager s nadefinovanými signály.



Obr. 59) Mechanismus pohybu poziční jednotky – levá v dolní (výchozí) poloze, pravá v horní (aretované) poloze

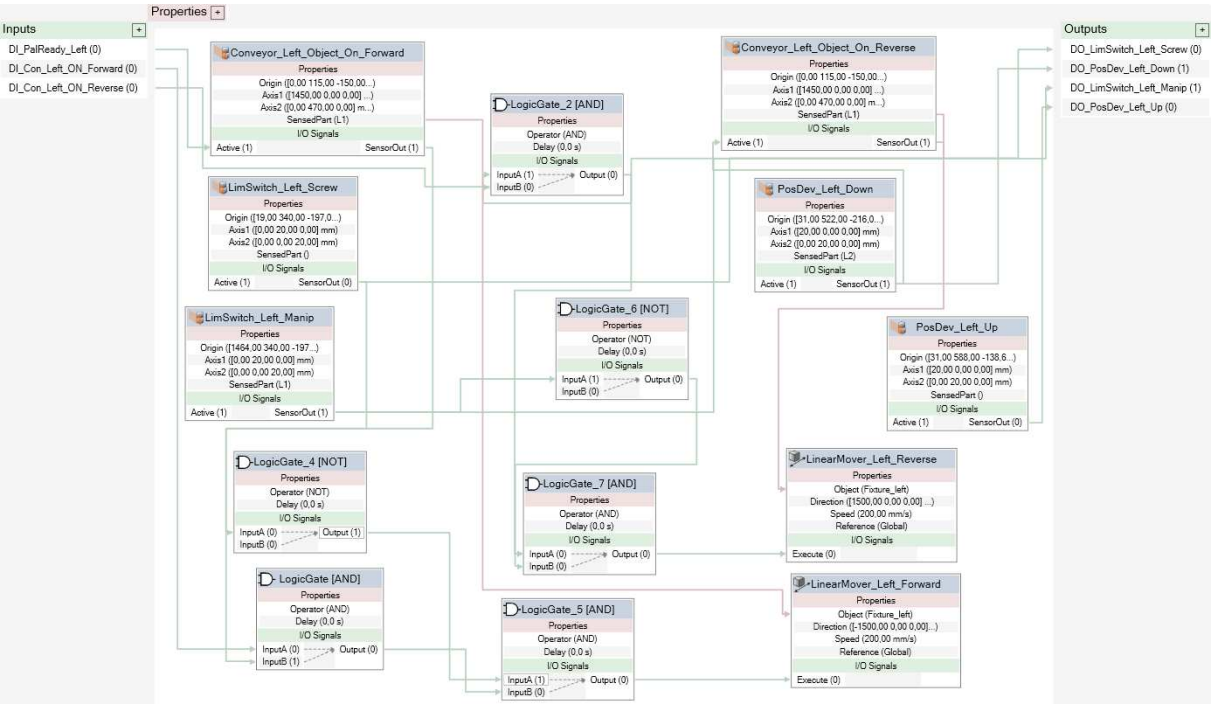
Takto vytvořené vazbě jsou dodány vlastnosti pomocí nástroje Smart Component. Z jeho nabídky komponent je vybrán Plane Sensor, který umožňuje vytvoření pole pro detekci objektů. Jakmile je pole přerušeno jakýmkoliv objektem, komponenta to vyhodnotí a převede tuto informaci na signál. Toho je využito pro simulaci koncových snímačů dopravníků a detekci polohy poziční jednotky.



Obr. 60) Detekce polohy pomocí komponenty Plane Sensor

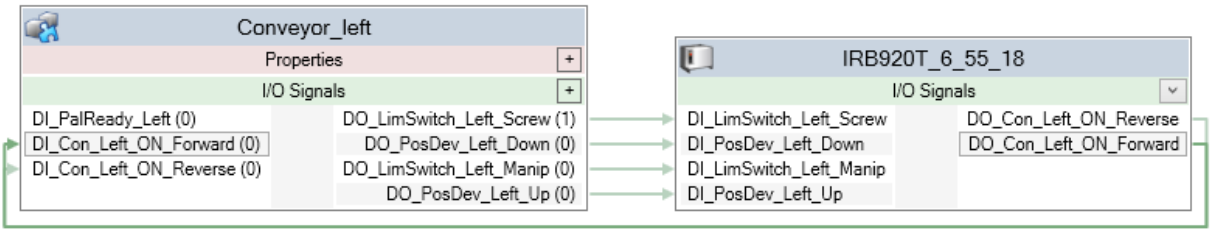
Pro kompletní simulaci dopravy materiálu je model doplněn také o transport palety a přípravku po dopravníkové dráze. K tomuto účelu slouží, již představený, Plane Sensor pro detekci palety a dvě komponenty Linear Mover, které umožňují uvedení objektů do pohybu. Jelikož dopravník nabízí obousměrný chod, bylo nutné definovat Linear Mover separátně pro oba směry pohybu.

Po vytvoření a nastavení parametrů všech komponent dopravníkového systému, přichází na řadu definování jejich logiky. To znamená, že je potřeba určit vztahy jednotlivých komponent a dodat jim logické funkce tak, aby bylo dosaženo požadované akce. Definování logiky se v programu RobotStudio provádí dvěma způsoby, buď volbou z rozevíracího menu, nebo propojením pomocí mapy. V neposlední řadě je nezbytné doplnit logiku o vstupní a výstupní signály, které umožňují řízení a sledování simulace dopravníkového systému.



Obr. 61) Logika komponent levého dopravníkového systému

Na závěr je nezbytné přiřadit signály dopravníkového systému k signálům kontroléru v nástroji Station Logic. Díky tomu je synchronizována simulace s dále vytvořeným robotickým programem, což umožňuje sledovat průběh v reálném čase. Princip pro přiřazení vztahů je stejný jako při definování logiky mezi komponenty, tedy buď výběrem z menu, nebo propojením v mapě.



Obr. 62) Vztahy mezi levým dopravníkovým systémem a kontrolérem

V následující tabulce jsou vypsány všechny potřebné vstupní a výstupní signály dopravníkových systémů, včetně popisu jejich funkce. Kromě uvedených signálů byly v nástroji Smart Component pro dopravníkové systémy použity signály DI_PalReady_Left a DI_PalReady_Right, které reprezentují signály tlačítkových spínačů. Ty jsou zařazeny do samostatné kapitoly, zabývající se ovládáním pracoviště a budou představeny v dalším postupu práce (6.2.5).

Tab 6) Signály dopravníkových systémů

Typ signálu	Název	Popis
Digitální vstup	DI_PosDev_Left_Down	Poziční jednotka levá v dolní poloze
Digitální vstup	DI_PosDev_Left_Up	Poziční jednotka levá v horní poloze
Digitální vstup	DI_PosDev_Right_Down	Poziční jednotka pravá v dolní poloze
Digitální vstup	DI_PosDev_Right_Up	Poziční jednotka pravá v horní poloze
Digitální vstup	DI_LimSwitch_Left_Manip	Kontakt levého koncového spínače v manipulační poloze
Digitální vstup	DI_LimSwitch_Left_Screw	Kontakt levého koncového spínače v šroubovací poloze
Digitální vstup	DI_LimSwitch_Right_Manip	Kontakt pravého koncového spínače v manipulační poloze
Digitální vstup	DI_LimSwitch_Right_Screw	Kontakt pravého koncového spínače v šroubovací poloze
Digitální výstup	DO_PosDev_Left_Up	Poziční jednotka levá aktivována
Digitální výstup	DO_PosDev_Right_Up	Poziční jednotka pravá aktivována
Digitální výstup	DO_Con_Left_ON_Forward	Dopravník levý zapnutý dopředu
Digitální výstup	DO_Con_Left_ON_Reverse	Dopravník levý zapnutý dozadu
Digitální výstup	DO_Con_Right_ON_Forward	Dopravník pravý zapnutý dopředu
Digitální výstup	DO_Con_Right_ON_Reverse	Dopravník pravý zapnutý dozadu

Aby simulace dopravy materiálu byla kompletní, je potřeba provést uvedený postup zprovoznění i pro přípravky. Jelikož je pohyb všech upínek přípravku paralelní, jsou pro simulaci jejich vazby, komponenty a signály zjednodušeny do jedné společné logiky. Díky tomu je dosažena úspora vykonaných operací během virtuálního zprovoznění na osminu, ale bez jakéhokoliv vlivu na kvalitu zhotovené simulace. V případě reálného zprovoznění pracoviště je pak vhodné vytvořit samostatné signály pro každou operaci zvlášť. To umožní snadnější sledování a detekování případných potíží při servisních úkonech.

Obr. 63) Zjednodušená společná logika komponent levého přípravku

Tab 7) Signály ovládání reálných přípravků

Typ signálu	Název	Popis
Digitální vstup	DI_Clamp_Left_1_Closed ….. DI_Clamp_Left_8_Closed	Upínka 1 levého přípravku uzavřena ….. Upínka 8 levého přípravku uzavřena
Digitální vstup	DI_Clamp_Left_1_Opened ….. DI_Clamp_Left_8_Opened	Upínka 1 levého přípravku otevřena ….. Upínka 8 levého přípravku otevřena
Digitální vstup	DI_Clamp_Right_1_Closed ….. DI_Clamp_Right_8_Closed	Upínka 1 pravého přípravku uzavřena ….. Upínka 8 pravého přípravku uzavřena
Digitální vstup	DI_Clamp_Right_1_Opened ….. DI_Clamp_Right_8_Opened	Upínka 1 pravého přípravku otevřena ….. Upínka 8 pravého přípravku otevřena
Digitální výstup	DO_Clamp_Left_1_Close ….. DO_Clamp_Left_8_Close	Uzavření upínky 1 levého přípravku ….. Uzavření upínky 8 levého přípravku
Digitální výstup	DO_Clamp_Left_1_Open ….. DO_Clamp_Left_8_Open	Otevření upínky 1 levého přípravku ….. Otevření upínky 8 levého přípravku
Digitální výstup	DO_Clamp_Right_1_Close ….. DO_Clamp_Right_8_Close	Uzavření upínky 1 pravého přípravku ….. Uzavření upínky 8 pravého přípravku
Digitální výstup	DO_Clamp_Right_1_Open ….. DO_Clamp_Right_8_Open	Otevření upínky 1 pravého přípravku ….. Otevření upínky 8 pravého přípravku

6.2.2 Šroubovací proces

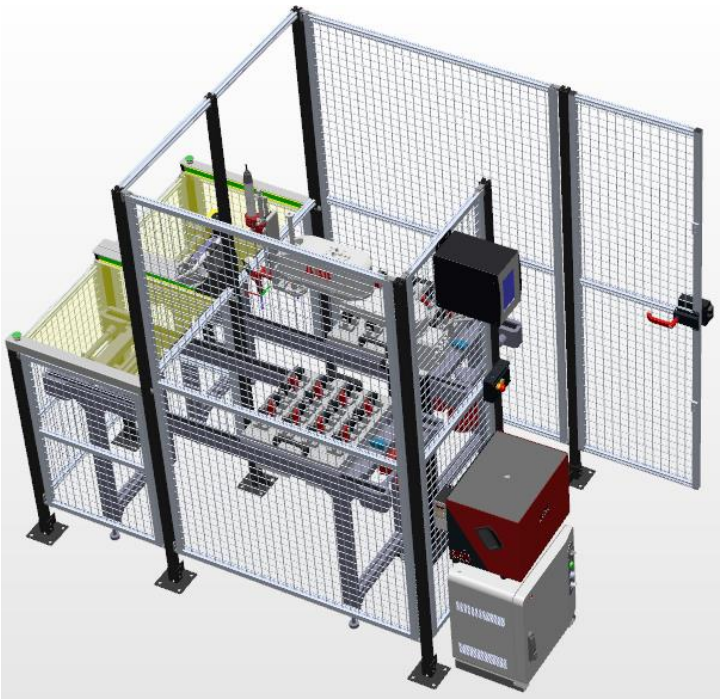
Ovládání šroubovacího procesu probíhá speciálně určeným řídicím systémem, který je pro tyto účely vyvinut a nabízen přímo dodavatelem šroubovací techniky a příslušenství. Toto komplexní řešení je v režii společnosti STÖGER AUTOMATION GmbH, což je výhodné pro rychlou a nenáročnou implementaci. Jednotlivé parametry šroubovacího procesu, jako jsou krouticí moment, rychlost šroubování, povely podavači šroubů apod., probíhají nastavením programu přímo na řídicí jednotce. Zde jsou programy uloženy a následně volány pomocí signálů z nadřazeného řídicího systému, tedy robotického kontroléru.

Definování signálů mezi master a slave systémem je v tomto případě individuální na základě požadavků zákazníka. Jelikož všechny parametry jsou viditelné na displeji šroubovací řídicí jednotky, jako nezbytné se jeví pouze signály pro volbu konkrétního typu šroubovacího programu. Další, především servisní programy a stavové informace, pak mohou být voleny pouze přímo z panelu šroubovací jednotky, nebo propojeny signály s ovládacím panelem pracoviště pro zvýšení komfortu řízení.

6.2.3 Bezpečnostní okruh

Oddělení pracovních a okolních prostor je u pracoviště zajištěno především mechanickými částmi, mezi které patří oplocení a ochranné plexisklo. K tomu, aby byl umožněn přístup a robotický systém na to mohl reagovat, je ovšem nutné pracoviště dovybavit bezpečnostními prvky. Bezpečnostní prvky použité v tomto pracovišti jsou světelná závora, zámek servisních dveří a tlačítka nouzového zastavení. Pro simulaci jednotlivých prvků bylo využito nástrojů Create Mechanism a Smart Component.

Pomocí nástroje Create Mechanism byla vytvořena rotační vazba pro pohyb servisních dveří. V místě zavřených dveří se nachází komponenta Plane Sensor, která vyhodnocuje jejich přítomnost a tím simuluje funkci bezpečnostního zámku. Komponenta Plane Sensor je pak použita i pro simulaci snímaného pole světelnými závorami.



Obr. 64) Pohled na otevřené servisní dveře a komponentu Plane Sensor simulující světelné závory

Tab 8) Signály bezpečnostního okruhu

Typ signálu	Název	Popis
Digitální vstup	DI_LightCurtain_Left	Světelná závora levá aktivní
Digitální vstup	DI_LightCurtain_Right	Světelná závora pravá aktivní
Digitální vstup	DI_ServiceDoor_Closed	Servisní dveře zavřené
Digitální vstup	DI_EStop_ServiceDoor	Nouzové tlačítko servisních dveří
Digitální vstup	DI_EStop_Operate	Nouzové tlačítko v pracovním prostoru

6.2.4 Ovládání

Ovládání stanice probíhá pomocí ovládacího panelu robotu umístěného v přední části pracoviště. Ten slouží pro volbu programu, seřizování a další servisní úkony. Potvrzení připravené palety však probíhá tlačítkovými spínači, které jsou oddělené pro oba materiálové toky. Jejich signály jsou pulsní, což představuje automatické resetování po uplynutí stanovené doby.

Tab 9) Signály ovládání

Typ signálu	Název	Popis
Digitální vstup	DI_PalReady_Left	Paleta levá připravena
Digitální vstup	DI_PalReady_Right	Paleta pravá připravena

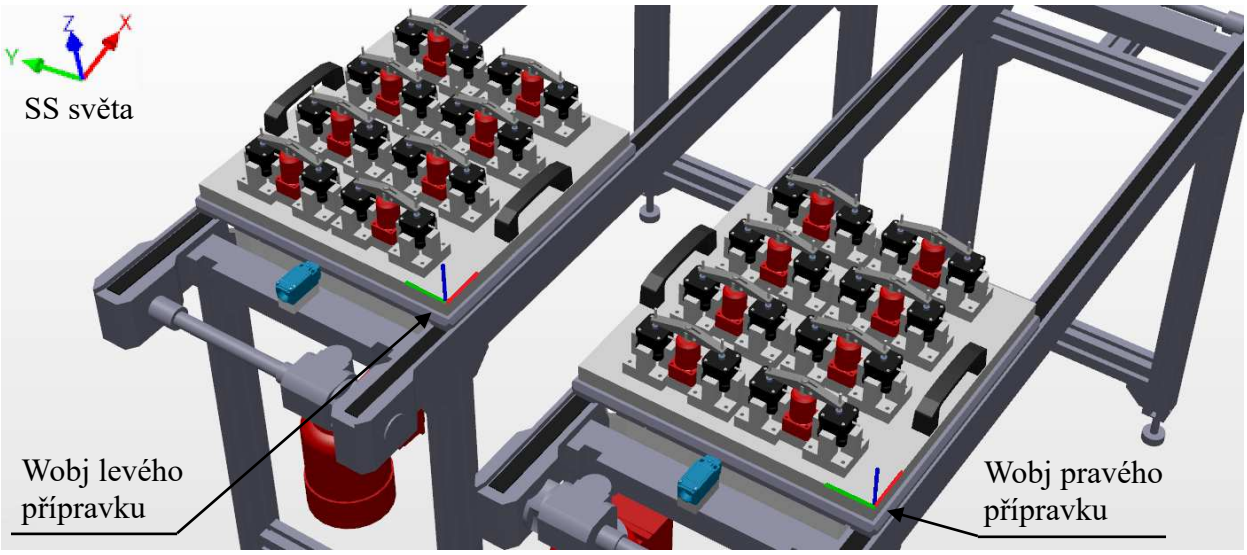
6.3 Programování

Programování robotických pracovišť není pouze psaní samotného programu. Ještě než se přejde k této fázi, je potřeba nadefinovat pracovní objekt a nástroj. Tato data usnadní nejen programování a seřizování, ale jak bude podrobněji vysvětleno dále, jsou potřebná i pro správný chod robotu. Poté je nutné provést učení pozic a trajektorií robotu, které mají být přeneseny do reálného pracoviště. Nakonec přichází na řadu již zmíněné psaní programu, kam patří sestavení vývojových diagramů, definování signálů, deklarace dat, tvorba rozhodování atd. Jelikož je pracoviště vybaveno robotem ABB, a o řízení se stará robotický kontrolér stejné značky, je program psán v jazyce RAPID.

6.3.1 Definování roviny pracovního objektu

Před učením pozic robotu je vhodné definovat rovinu pracovního objektu, která je u robotických systémů firmy ABB nazývána jako workobject. Jedná se o virtuální rovinu s vlastním souřadným systémem, k níž jsou vztaženy naprogramované pozice.

Hlavní výhoda této funkce spočívá v jednoduché transformaci souřadnic v případě změny pracovního objektu. Stačí pouze předefinovat rovinu a všechny vztažené pozice jsou přeneseny podle aktualizovaného souřadného systému. Tato funkce najde své uplatnění během výměny nebo posunutí přípravku, ale také při přenášení off-line programů do reálného pracoviště. Díky totožnosti 3D dat s reálným pracovištěm je možnost snadno převést off-line naučené pozice a dráhy pomocí předefinování virtuální roviny pracovního objektu za skutečnou. U takto přeneseného programu jsou pak nutné jen drobné korekce, které jsou způsobeny výrobními a montážními tolerancemi. U řešeného pracoviště je počátek roviny definován vždy na rohy přípravků, což u reálného pracoviště zaručuje jednoduché odměření.



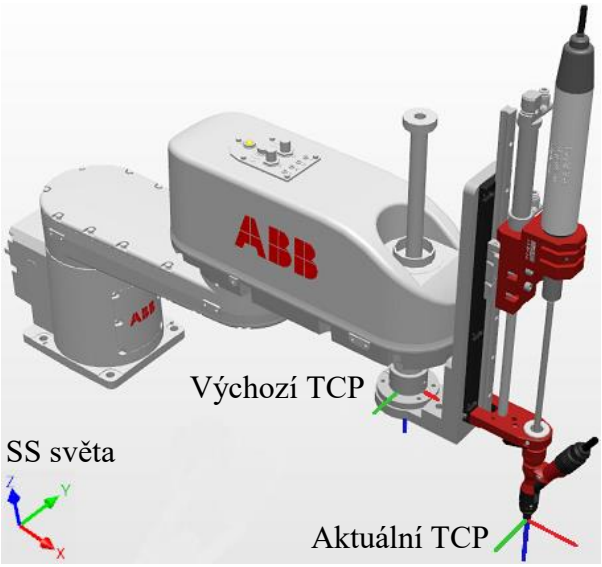
Obr. 65) Pracovní objekty pracoviště

6.3.2 Definování nástroje

Každý nesený nástroj neboli koncový efektor robotu musí mít definované základní parametry. Do těchto hodnot je nutno počítat nejen se šroubovací hlavou, ale i s jejím držákem a dalším příslušenstvím. Typy zadávaných parametrů lze rozdělit do dvou kategorií podle toho, k čemu slouží.

V prvním případě se jedná o parametry pro výpočet dynamických vlastností. Do této kategorie patří hmotnost a těžiště nástroje, které jsou nezbytné pro správný výpočet momentu setrvačnosti a přesnosti drah. Kdyby tyto parametry byly definovány špatně či vůbec, může docházet k přetěžování mechanických částí robotu a jejich rychlejšímu opotřebení, eventuálně minutí určené pozice.

Druhou kategorií jsou parametry pro určení referenčního bodu nástroje, v robotice známého spíše pod označením TCP. Tento bod se používá jako počátek souřadného systému nástroje, ke kterému jsou vztaženy všechny naprogramované pozice. Díky tomu je možné, při výměně koncového efektoru, snadno adaptovat pozice a provádět reorientace os.



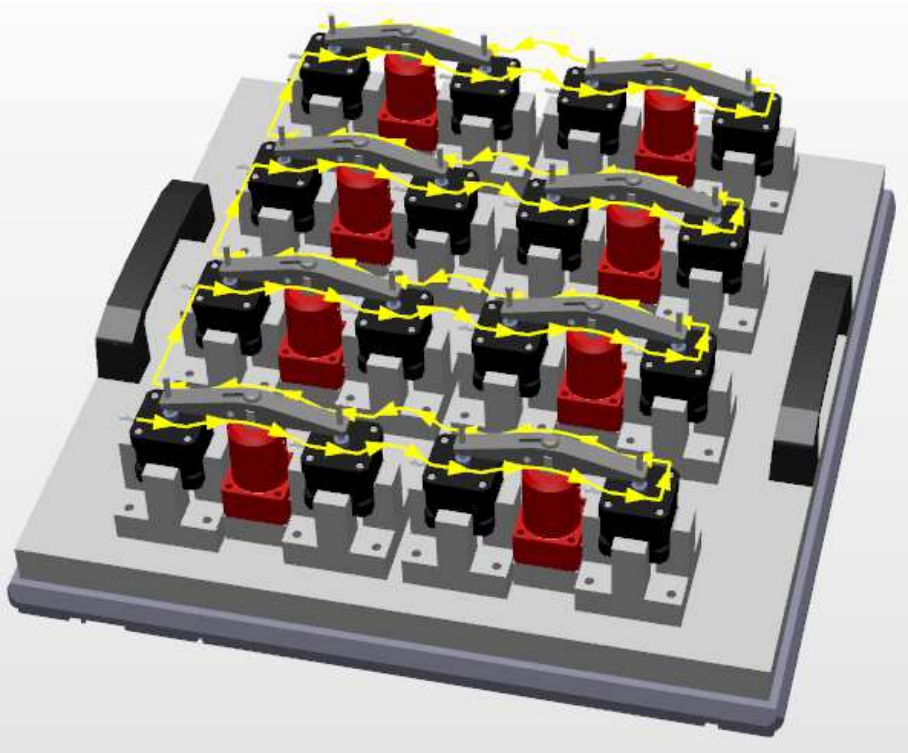
Obr. 66) Orientace souřadných systémů a pozice TCP

6.3.3 Tvorba pozic a trajektorií robotu

Pohyby robotu se skládají z jednotlivých pozic, které jsou na základě posloupnosti v programu pospojovány do určité trajektorie robotu. Počet pozic se odvíjí jak od komplikovanosti pohybů, tak od požadované přesnosti.

Pro námi řešené pracoviště je vytvořena tzv. domácí pozice robotu s nulovým natočením a vysunutím os. Ta je rovněž použita jako výchozí i cílová pozice robotu. Šroubovací program se skládá z pozic šroubů a přejezdů mezi jednotlivými upínacími hnízdy. Trajektorie robotu není koncipována pro šroubování po celých dílech, jak by k tomu mohlo vybízet, ale je realizována po přímých liniích s důrazem na co nejkratší čas přejezdu. K pozicím jsou dodány pohybové instrukce, které určují rychlost, aproximaci dráhy, použitý nástroj a přiřazenou rovinu pracovního objektu.

Díky tvorbě pozic v off-line programu bylo možné definované pozice a trajektorie zrcadlit na opačný přípravek, kde byla pouze vyměněna rovina pracovního objektu.

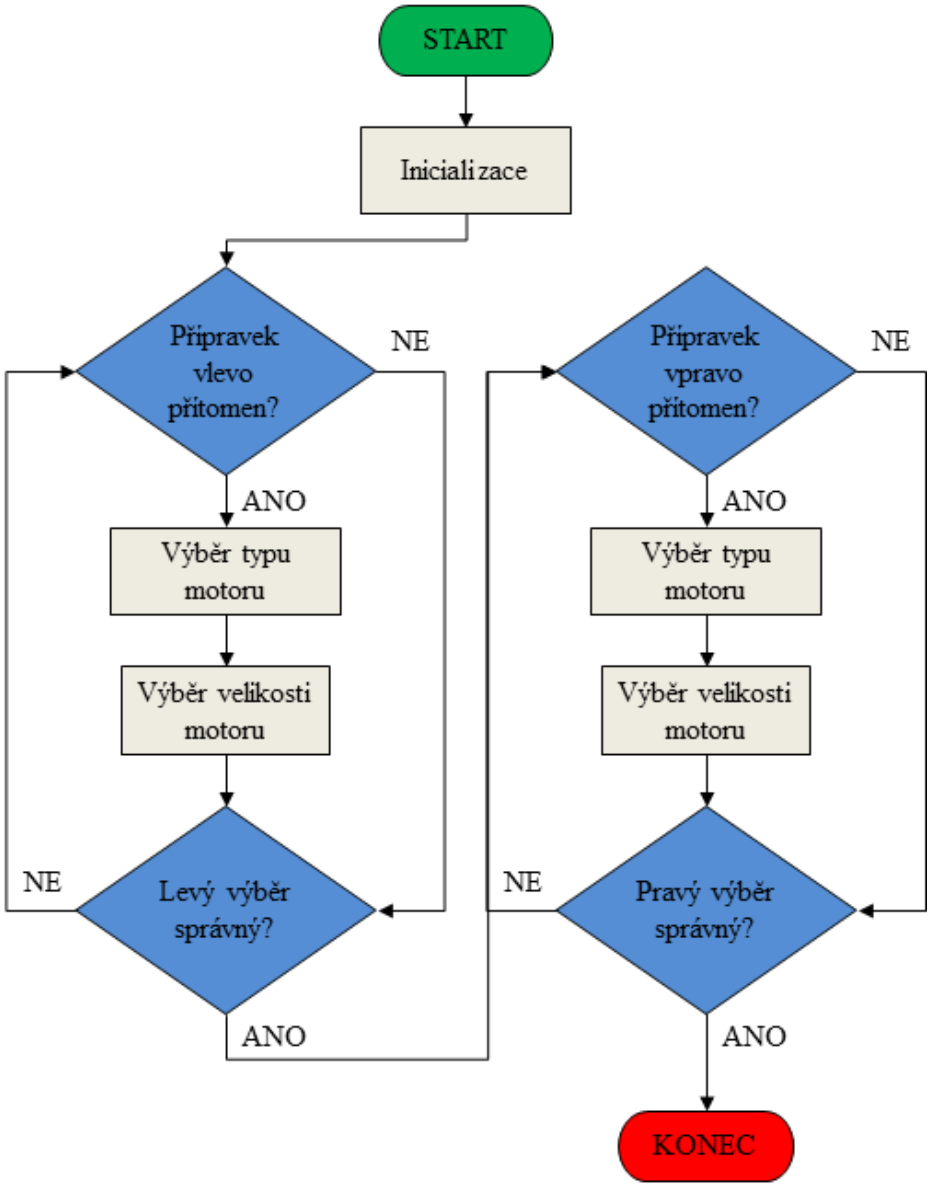


Obr. 67) Trajektorie robotu při šroubování

6.3.4 Popis programu

Po zapnutí pracoviště je načtena inicializační procedura, která slouží k nastavení parametrů na výchozí hodnoty. Poté přichází na řadu výběr přípravků pro oba dopravníky zvlášť, díky čemuž je umožněna výroba odlišných krokových motorů souběžně, eventuálně aktivace pouze jedné strany pracoviště. Přípravky jsou voleny podle typu a velikosti krokového motoru, což je nakonec, z důvodu kontroly, nutno potvrdit.

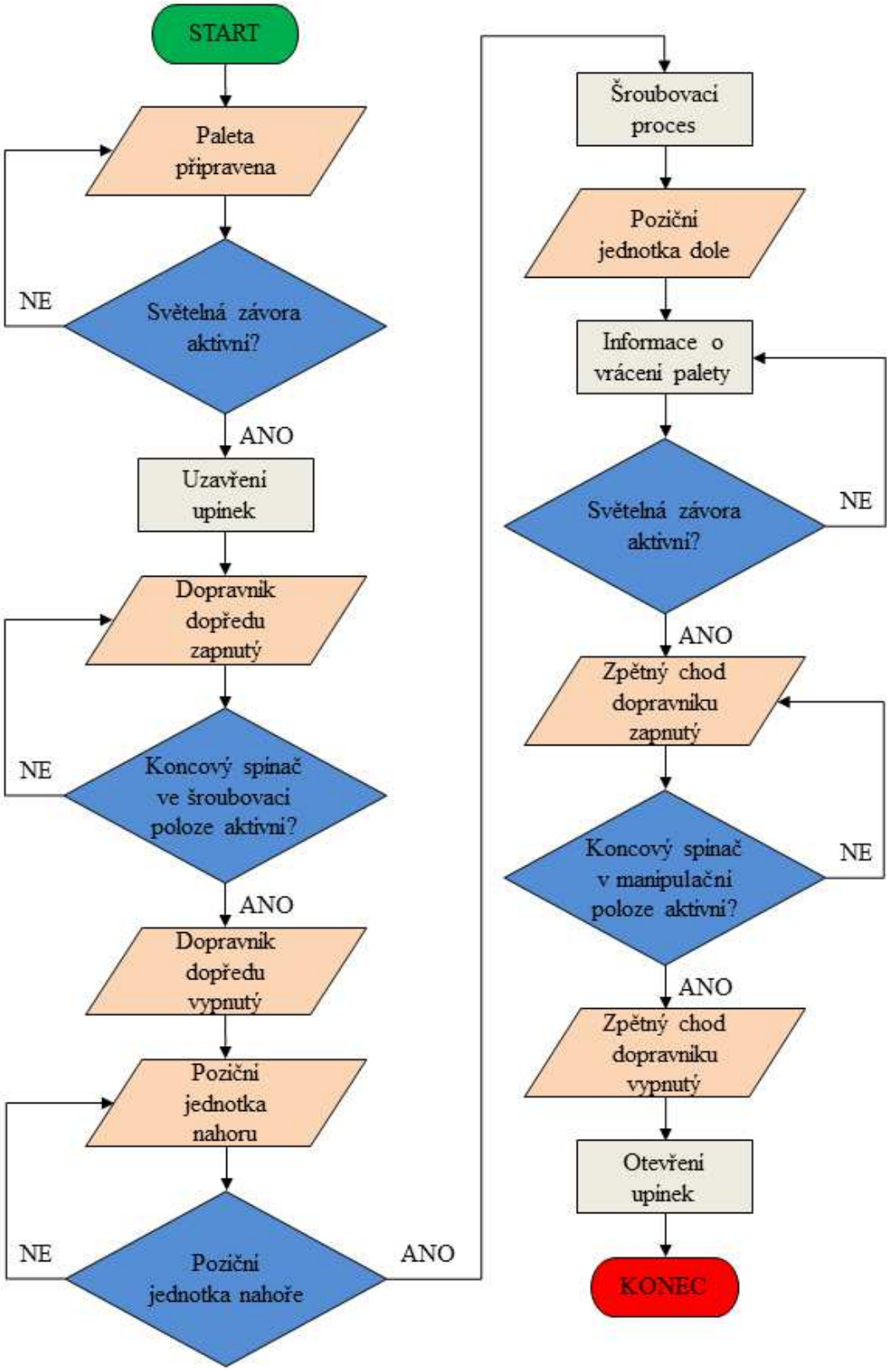
Proces volby přípravku probíhá přes vyskakovací okno, kde jsou přímo zobrazeny možné varianty. Postup pro výběr výchozího motoru pak vypadá následovně: Přípravek levý: ANO → Typ motoru: NEMA 17 → Velikosti motoru: ST 4209 → Výběr správný: ANO. V případě nepřítomnosti přípravků, ignorování výběru nebo jeho nedokončení, není možné spustit výrobní proces v automatickém režimu.



Obr. 68) Vývojový diagram výběru přípravků

Vlastní výrobní proces začíná založením jednotlivých dílů do přípravku. Jakmile jsou vyskládána všechna upínací hnízda, operátor zmáčkne tlačítkový spínač, čímž dá řídicímu systému signál o připravenosti palety. Když je aktivní světelná závora, tedy v manipulačním prostoru palety se nenachází horní končetiny operátora apod., proběhne uzavření upínek a spuštění dopředného chodu dopravníku. Ten je zapnutý do doby, než paleta přejede na konec dopravníku a dotkne se koncového snímače. Poté je dán signál poziční jednotce pro aktivaci vysunutí. Ve chvíli, kdy je poziční jednotka v horní poloze, je spuštěn šroubovací proces. Po jeho dokončení a přijetí signálu o poziční jednotce v dolní poloze, je nutné zajistit dopravení palety zpět do manipulačního prostoru. To je kvůli bezpečnosti umožněno pouze v případě aktivní světelné závory. Princip vypnutí dopravníku je stejný jako při dopředném chodu, tedy deaktivací pohonu dopravníku signálem z koncového snímače. Posledním krokem před odebíráním hotových krokových motorů je otevření upínek.

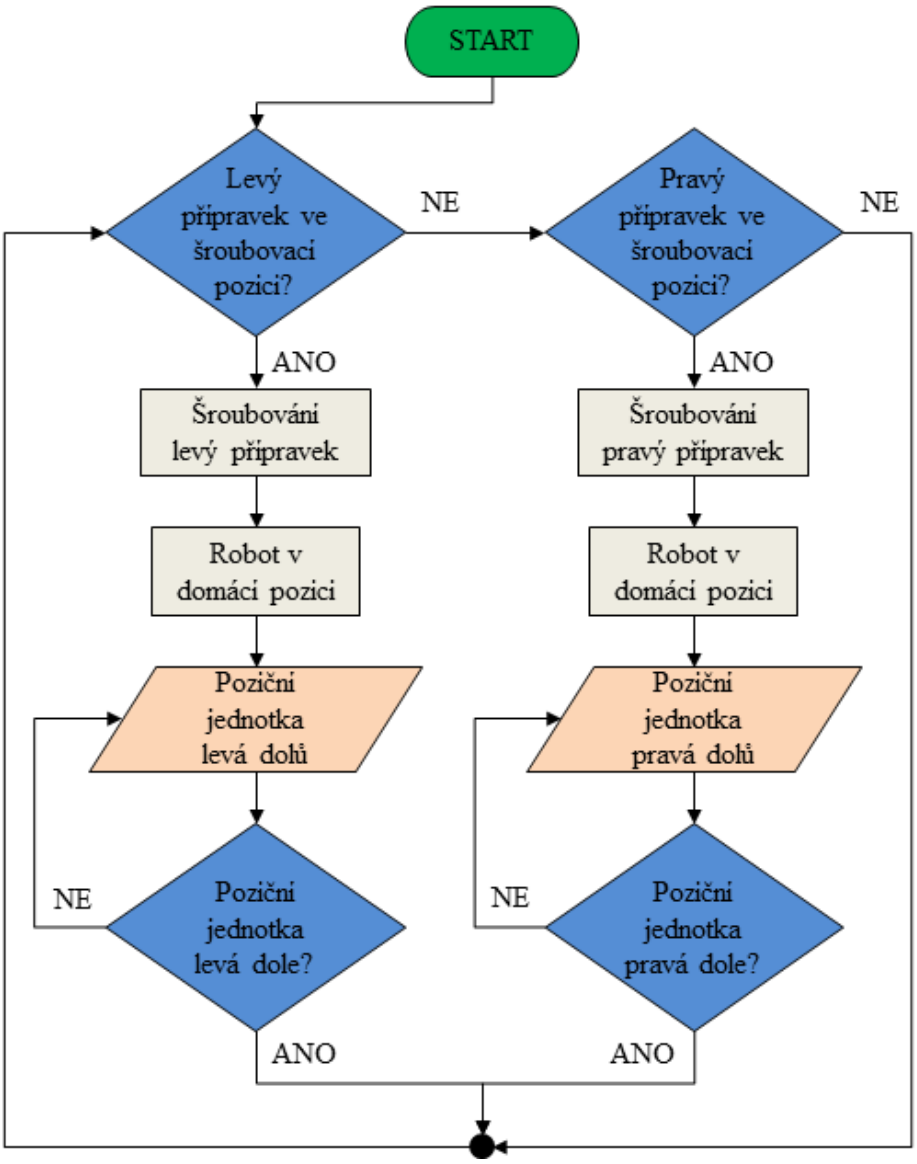
Jelikož jsou dopravníky řešeny zrcadlově, jejich algoritmus ovládání je totožný pro obě strany.



Obr. 69) Vývojový diagram dopravníku

Celý šroubovací proces běží ve smyčce a neustále hlídá, zda se některá z pozičních jednotek nenachází v horní poloze. Pokud dojde k detekci palety v horní poloze, spustí se šroubovací program podle vybraného krokového motoru. Po dokončení šroubování robot

přejede do domácí pozice a předá informaci ke spuštění poziční jednotky dolů. Jakmile je poziční jednotka v dolní poloze, robot je připraven pro další šroubování.



Obr. 70) Vývojový diagram šroubovacího procesu

Vykonávání programu robotu a jednotlivých dopravníků je nezávislé. To znamená, že robot může šroubovat na jedné straně, zatímco na opačné straně je paleta v pohybu. Díky tomu odpadá nutnost čekat na transport palety a lze dosáhnout maximální míry využití robotu a zvýšení produkce.

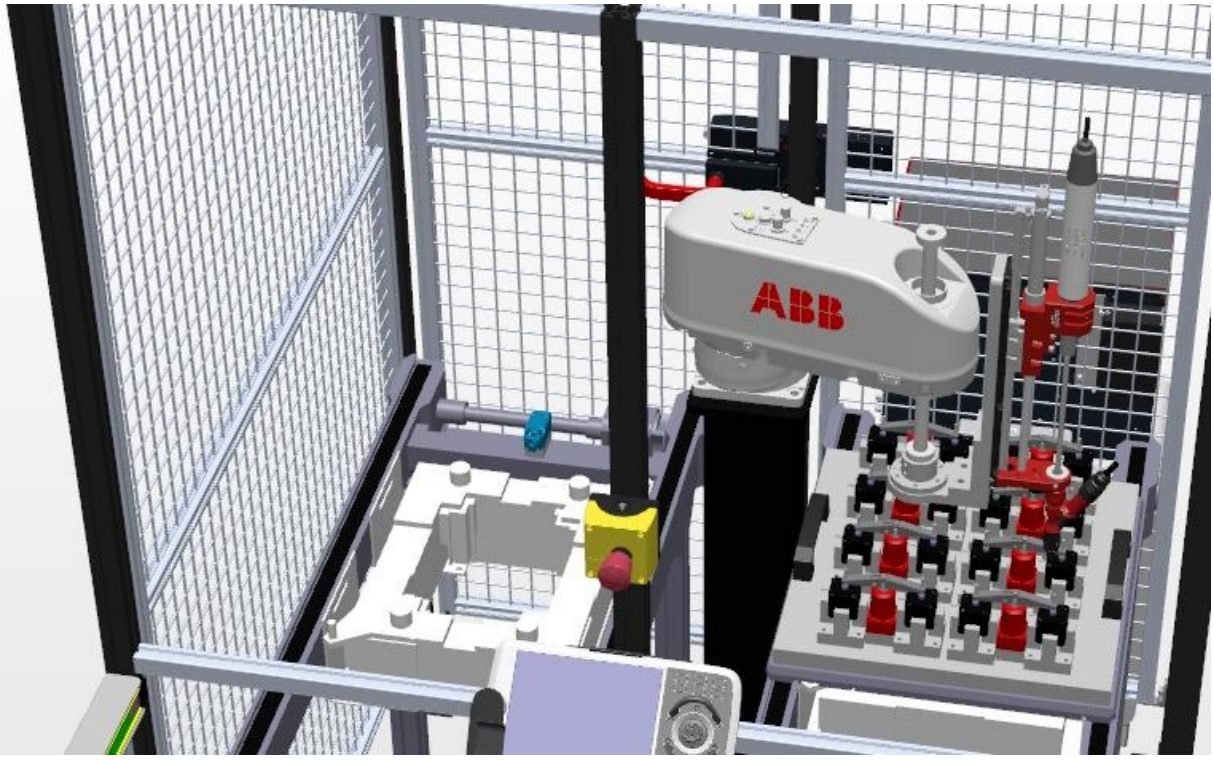
6.4 Takt linky

Pro ověření výsledného taktu linky bylo nezbytné nasimulovat chování a všechny parametry, jako by se jednalo o reálné pracoviště. K tomuto účelu byly použity hodnoty dostupné z katalogových listů dopravníku, upínek a poziční jednotky.

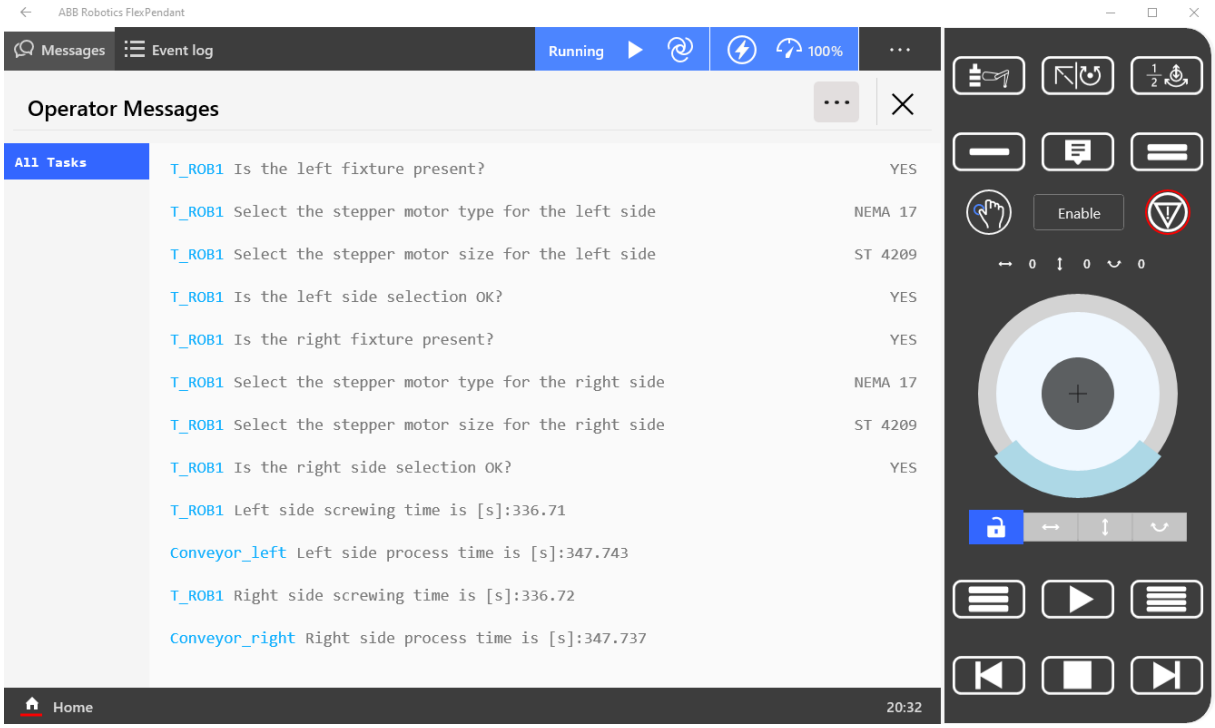
Hodnotu vlastního šroubování bylo však nutné odhadnout na základě získaných znalostí z praxe. Tento postup musel být zvolen z důvodu nedostatečných informací v katalogovém listu dodavatele, kde je sice uvedena hodnota nejkratšího dosažitelného času,

nicméně bez relevantních informací o parametrech šroubu a testované součásti. V případě nutnosti ověření této hodnoty je na místě provedení experimentálního měření.

Zjištění výsledného taktu probíhalo dodáním stopek do programu a následným spuštěním simulace. Stopky byly dodány pro ověření času jak samotného procesu šroubování, tak i pro cyklus zahrnující transport palety včetně manipulace upínek (viz Obr. 72).



Obr. 71) Pohled do pracovního prostoru během simulace



Obr. 72) Výsledný čas procesů zobrazený ve zprávách ovládacího panelu

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Důležitým aspektem při rozhodování, zda výrobní proces automatizovat či nikoliv, je doba návratnosti investic. Díky tomu je možné ověřit vhodnost zamýšlené investice a předejít tak jejímu nesplacení před očekávaným koncem výroby.

Pro tyto účely je možné využít elementární výpočet, založený na podílu vstupních investic k ušetřeným nákladům. Je nutné podotknout, že tento výpočet nepočítá s náklady vynaloženými na provoz a údržbu [72]:

$$\text{Doba návratnosti} = \frac{\text{vstupní investice}}{\text{ušetřené náklady}} \tag{4}$$

Vstupní investice jsou zastoupeny veškerými náklady, s kterými je nutné počítat při realizaci navrhovaného pracoviště. Jak vyplývá z definice, kromě hmatatelných částí pracoviště je nezbytné počítat i s náklady spojenými s instalací pracoviště. K sestavení těchto nákladů byly použity dostupné internetové zdroje a znalosti z vlastní praxe.

Tab 10) Odhadované náklady realizace

Popis	Náklady [Kč]
Podavač	250 000
Šroubovací hlava včetně přívodní techniky	250 000
Držák šroubovací hlavy	35 000
Řídicí technika šroubovací systému	150 000
Robot včetně kontroléru	800 000
Podstavec robotu	50 000
Transportní systém	600 000
Přípravky	300 000
Oplocení pracoviště	250 000
Bezpečnostní prvky	200 000
Mechanická, elektronická a pneumatická konstrukce	250 000
Celkem	**3 135 000**

Dalším faktorem výpočtu je určení ušetřených nákladů. Zde se jedná o náklady ušetřené za operátora, který by jinak byl potřebný pro vykonávání automatizovaných úkonů. Náklady pak lze vypočítat jako součin ušetřeného ručního času a mzdové náklady operátora, to vše vztažené na jeden kus.

Tab 11) Vstupní parametry pro výpočet ušetřených nákladů

	Hodnota	Poznámka
Čas ruční montáže [s]	42	Viz kapitola 4.1.2
Čas automatizované montáže [s]	21	Viz kapitola 6.4
Měsíční náklady [Kč]	40 135	Hrubá mzda [73]

Jelikož poměr času ruční a automatizované montáže je poloviční, je dále počítáno s časovou úsporou rovnající se jednomu operátoru.

$$\text{Doba návratnosti} = \frac{\text{vstupní investice}}{\text{ušetřené náklady}} = \frac{3\,135\,000}{40\,135} = 78{,}1 \text{ měsíců} \qquad (5)$$

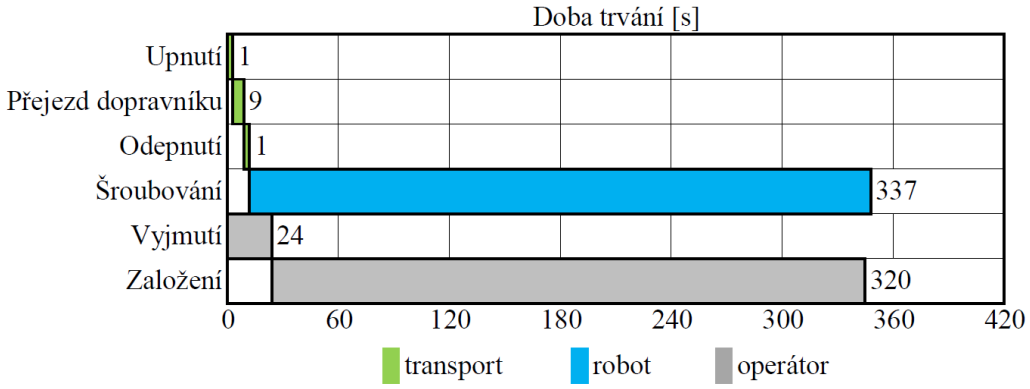
Výpočet doby návratnosti investic byl proveden pro všechny standardní pracovní režimy, tedy od jednosměnného až po nepřetržitý provoz.

Tab 12) Výsledné hodnocení návratnosti

	Jednosměnný	Dvousměnný	Třísměnný	Nepřetržitý
Počet uspořených operátorů	1	2	3	4
Návratnost [měsíc]	78,1	39,1	26	19,5

Jak je patrné z uvedeného výpočtu, průběh doby návratnosti je lineární s klesající tendencí v případě vyšší vytíženosti stroje. Je obecně známo, že automatizovaná pracoviště pracují především v nepřetržitém, eventuálně třísměnném provozu. Při porovnání hodnoty získané pro nepřetržitý provoz 19,5 měsíce s průměrnou dobou návratnosti investic, která je pro montážní pracoviště udávána jako 13 měsíců (viz Obr. 2), je nutno konstatovat, že se jedná zhruba o třetinu delší dobu. I přes to lze realizaci označit za vhodnou z důvodu eliminace opakující se práce, usnadnění obsluze, zvýšení produkce a to při stále přijatelné době návratnosti.

Pro úplnost je ekonomické zhodnocení doplněno o Ganntův diagram výsledného řešení. Ten, na základě získaných dat ze simulace, s ještě větší přesností potvrzuje optimální vybalancování strojního a ručního času. V celkovém součtu jednotlivých operací se pak jedná o rozdíl pouhých dvou sekund ve prospěch strojního času. Na druhou stranu lze, díky možnosti nezávislého transportu palety, po úvodním cyklu uvažovat zkrácení času přejezdu dopravníku ze zmíněných devíti sekund na polovinu, což představuje pomyslný prostor pro případ zrychlení obsluhy po jejím zapracování. Ke zmíněnému zkrácení by došlo za předpokladu využití obou dopravníků a aktivace palety před příjezdem protější strany.



Obr. 73) Ganttův diagram výsledného řešení

8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Hlavním cílem této diplomové práce bylo virtuálně zprovoznit vlastní návrh robotického pracoviště pro automatickou montáž krokových motorů s označením NEMA 14, 17 a 23. K úspěšnému dosažení zadaného cíle bylo postupováno systematicky a s postupným řešením dílčích úkolů.

První část práce je věnována teoretické stránce programování robotů a virtuálního zprovoznění. Na ni navazuje obsáhlá rešerše, zabývající se systémovým rozborem řešené problematiky. V jejím úvodu je provedena analýza zadané součásti, která udává další směr práce. Tím je robotické šroubování, které je, společně s možnostmi automatické manipulace a řídicími systémy, důkladně rozebráno v následující části kapitoly.

Na základě nabytých informací jsou vytvořeny tři návrhy robotických šroubovacích pracovišť pro krokové motory. Jejich porovnání bylo provedeno pomocí multikriteriální analýzy, která určila nejvýhodnější variantu. Vítězná varianta byla, s komentářem vybraných dílů, zpracována v programu Autodesk Inventor jako kompletní 3D model pracoviště. Zde byl brán zřetel i na ergonomii a komunikaci pracoviště. Vytvořený 3D model byl poté naimportován do simulačního programu ABB RobotStudio, kde proběhlo jeho virtuální zprovoznění. To obsahuje nadefinované signály, dráhy, logiku a další potřebná data k tomu, aby mohl být program přenesen do reálného pracoviště. Rovněž tím byla umožněna simulace pracoviště, díky které byl zjištěn výsledný čas cyklu. Na závěr byl pro navržené pracoviště zhotoven odhad nákladů na jeho realizaci, který, v porovnání s náklady vynaloženými na lidskou pracovní sílu, podtrhuje správnost volby automatizace šroubovacího procesu.

Práce díky své komplexnosti ukázala důležitost systémového přístupu k řešení úkolů, který je nezbytný nejen v problematice virtuálního zprovoznění. Jasně demonstruje, že ač požadavky mohou nabádat k automatizaci celé linky, je nezbytné myslet na vhodnost realizace v kontextu s náročností a rentabilitou zařízení. Pro technické ověření proveditelnosti jsou programy umožňující virtuální zprovoznění nesmírným pomocníkem. Díky jejich nepřebernému množství funkcí je možné spolehlivě odhalit nedostatky ještě před samotným započetím reálné výroby pracoviště. Mimo to přispívají ke zkrácení doby realizace, což je činí stále častěji využívaným nástrojem.

Jako doporučení pro praxi je vhodné uvést snahu o sjednocení dílů zamýšlených pro automatizovaný proces. Na to je nutné myslet už při designování výrobku, kde by měl být konstruktér seznámen i s předpokládaným způsobem montáže. V řešené problematice lze tento fakt vztáhnout na rozměry šroubů. Jestliže se má jednat o šroubovací zařízení pro více velikostí krokových motorů, je vhodné navrhnout stejný šroub pro všechny spoje. To eliminuje nutnost jejich výměny v podavači šroubů nebo eventuální zapojení více podavačů do systému, což by prodražilo zařízení.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

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

[2] COSTS AND BENEFITS OF INDUSTRIAL ROBOT ARM DEPLOYMENT. In: *UNIVERSAL ROBOTS* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://www.universal-robots.com/blog/costs-and-benefits-of-industrial-robot-arm-deployment

[3] World Robotics 2021. In: *The International Federation of Robotics* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://ifr.org/downloads/press2018/2021_10_28_WR_PK_Presentation_long_version.pdf

[4] Robotics Changed Industry 4.0; Now, How Will Industry 4.0 Change Robotics?. In: *Robotics tomorrow* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://www.roboticstomorrow.com/story/2021/07/robotics-changed-industry-40-now-how-will-industry-40-change-robotics/17226

[5] Domino to shape Industry 4.0 for maximum efficiency in coding and marking. In: *Domino Printing* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://www.domino-printing.com/en/news-and-events/2017/domino-to-shape-industry-40-for-maximum-efficiency-in-coding-and-marking

[6] Aplikační software Wizard easy programming. In: *ABB* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://new.abb.com/products/robotics/cs/aplikacni-software/wizard

[7] GoFa™ CRB 15000. In: *ABB* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://new.abb.com/products/robotics/cs/kolaborativni-roboty/crb-15000

[8] What Is the Best Way to Program a Robot?. In: *RoboDK* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://robodk.com/blog/program-robot-tips

[9] IGM OFFLINE PROGRAMMING SYSTEM FOR WELDING ROBOTS. In: *IGM ROBOTERSYSTEME AG* [online]. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: https://www.igm-group.com/en/products/igm-offline-programming-system-for-welding-robots

[10] Robot programming languages. In: *fabryka robotów* [online]. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: https://fabryka-robotow.pl/2015/01/programming-languages-to-control-robot/s

[11] REINHART, Gunther a Georg WÜNSCH. *Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. Prod. Eng. Res. Devel.* 1, 371–379 (2007) [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11740-007-0066-0

[12] WHAT IS VIRTUAL COMMISSIONING? In: *VIRTUAL COMMISSIONING* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://virtualcommissioning.com/what-is-virtual-commissioning/

[13] Virtual Commissioning In: *ABS-Ingenieurdienstleistung GmbH* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://www.abs-id.de/en/services/virtual-commissioning/

[14] HAMPL, Lukáš. Návrh a realizace robotických operací v systému Tecnomatix Process Simulate. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Václav Kaczmarczyk.

[15] HiL vs. SiL aneb testování softwaru In: *HW server s.r.o.* [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://vyvoj.hw.cz/hil-vs-sil-aneb-testovani-softwaru.html

[16] HYBRID DIGITAL TWIN FOR VIRTUAL COMMISSIONING In: *ABS-Ingenieurdienstleistung GmbH* [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://virtualcommissioning.com/hybrid-digital-twin-for-virtual-commissioning/

[17] Chi G. Lee, Sang C. Park, Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems, *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 1, Issue 3, 213–222 (2014) [online]. [cit. 2021-11-19]. https://doi.org/10.7315/JCDE.2014.021

[18] Why should we use Tecnomatix Siemens Process Simulate software? In: *INOPROD* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.inoprod.com/en/software/tecnomatix/tecnomatix-process-simulate/

[19] DIGITÁLNÍ TOVÁRNA TECNOMATIX In: *AXIOM TECH S.R.O.* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.axiomtech.cz/24751-digitalni-tovarna-tecnomatix

[20] DELMIA In: *4D Systems* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://4dsysco.com/delmia

[21] Visual Components 4.4 In: *Visual Components* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.visualcomponents.com/products/

[22] RobotStudio In: *ABB* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A4796&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch

[23] KUKA.Sim In: *KUKA AG* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/software/pl%C3%A1nov%C3%A1n%C3%AD-projektov%C3%A1n%C3%AD-servis-bezpe%C4%8Dnost/kuka,-d-,sim

[24] Inteligentní 3D simulace robotu In: *FANUC* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/roboguide

[25] Krokový motor In: *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/809

[26] Krokové motory In: *M B M Technik s.r.o.* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.mbmtechnik.cz/elektromotory/krokove-motory,

[27] SCREWING AND ASSEMBLING WITH COBOTS In: *FAuDE Tec GmbH* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://faudetec.de/application-examples/assemble-and-screw/?lang=en

[28] SCREWDRIVING AND FASTENING SYSTEMS WITH AUTOMATIC FEEDING In: *OK Technical Group, s.r.o* [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://ok-tg.com/files/katalog_st-ger_spatz_oktg.pdf

[29] Podávací technika In: *WEBER Schraubautomaten GmbH.* [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: https://www.weber-online.com/cs/podavaci-technika/

[30] Technika na přívod dílů In: *DEPRAG CZ a.s.* [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: https://www.deprag.com/cs/sroubovaci-technika/produkty/technika-na-privod-dilu/privodni-technika.html

[31] PODÁVACÍ SYSTÉMY In: *OK Technical Group, s.r.o* [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: https://ok-tg.com/automaticke-sroubovani/podavaci-systemy/

[32] Pásový bunkr BB In: *WEBER Schraubautomaten GmbH* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.weber-online.com/cs/podavaci-technika/bb/

[33] Bevorratungssysteme In: *DEPRAG CZ a.s.* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.deprag.com/cs/automation/produkte/zufuehrtechnik/zufuehrtechniken/bevorratungssysteme.html

[34] WEBER Schraubautomaten - Technika, která spojuje In: *WEBER Schraubautomaten GmbH* [online]. [cit. 2021-12-3]. Dostupné z: https://www.weber-online.com/wp-content/uploads/sites/2/Loesungsbroschuere_CZ_web.pdf

[35] Pick-and-Place postup In: *DEPRAG CZ a.s.* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.deprag.com/cs/sroubovaci-technika/produkty/technika-na-privod-dilu/privodni-technika/pick-and-place-podavani.html

[36] SPATZ - Pick&Place screwdriving robot with automatic tool change and feed unit for fasteners In: *Fluidotronica - Equipamentos Industriais, Lda.* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.fluidotronica.com/en/products/stoger/automatic-screwdrivers/spatz-pick-place-screwdriving-robot-with-automatic-tool-change-and-feed-unit-for-fasteners/

[37] Clean Room pneumatické čištění In: *OK Technical Group, s.r.o* [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://ok-tg.com/automaticke-sroubovani/clean-room/

[38] Technická čistota – CleanFeed In: *DEPRAG CZ a.s.* [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://www.deprag.com/cs/automatizace/technicka-cistota-cleanfeed.html

[39] ACTINAV: PNEUMATIC HOSE MANAGEMENT In: *UNIVERSAL ROBOTS* [online]. [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://www.universal-robots.com/articles/ur/actinav/actinav-pneumatic-hose-management/

[40] TX2-90 industrial robot range In: *Stäubli Holding AG* [online]. [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/industrial-robots/6-axis-robots/tx2-90/

[41] Expertise produces optimal feeding systems In: *PresseBox* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.pressebox.com/pressrelease/deprag-schulz-gmbh-u-co/Expertise-produces-optimal-feeding-systems/boxid/919972

[42] Straight, pistol and angle electric screwdrivers In: *Fiam Utensili Pneumatici S.P.A.* [online]. [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://www.fiamgroup.com/en/products/straight-electric-screwdrivers-with-screw-suction-device-straight-pistol-and-angle-electric-screwdrivers-etensil-electric-tightening-systems-with-automatic-shut-off/

[43] Šroubovací systém pro spolupráci člověka s robotem (HRC) In: *WEBER Schraubautomaten GmbH* [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: https://www.weber-online.com/cs/sroubovaci-system-pro-spolupraci-cloveka-s-robotem-hrc/

[44] Stacionární šroubováky SER / SEB In: *WEBER Schraubautomaten GmbH* [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: https://www.weber-online.com/cs/stacionarni-sroubovaky/ser-seb/

[45] Technical data sheet - SPATZ 04 In: *OK Technical Group, s.r.o* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://ok-tg.com/files/datasheet_spatz_stoeger_oktg.pdf

[46] Řídicí technika In: *DEPRAG CZ a.s.* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.deprag.com/cs/sroubovaci-technika/produkty/ridici-technika.html

[47] Řídicí technika In: *WEBER Schraubautomaten GmbH.* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.weber-online.com/cs/ridici-technika/

[48] ŘADA CVI3: ELEKTRICKÉ UTAHOVAČKY In: *Desoutter Industrial Tools* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://www.desouttertools.cz/naradi/2/elektricke-montazni-systemy/21/rada-cvi3

[49] Co je to kartézský robot? In: *Lambda Geeks* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://cs.lambdageeks.com/cartesian-robot-applications/

[50] Lineární roboty KraussMaffei LRX In: *KUBOUŠEK s.r.o.* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://kubousek.cz/produkty/linearni-roboty-kraussmaffei/

[51] M-710iC/50H In: *FANUC* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru-robot%c5%af/%c5%99ada-m-710/m-710ic-70

[52] SG400 In: *Yaskawa Europe GmbH* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://www.cz.yaskawa.eu.com/products/robots/packaging/productdetail/product/sg400_6637

[53] YuMi - IRB 14000 In: *ABB* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://new.abb.com/products/robotics/cs/kolaborativni-roboty/yumi

[54] SPOLUPRACUJÍCÍ ROBOT LBR IIWA 7 R800 A 14 R820 In: *ALL ROBOTS s.r.o.* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://www.allrobots.cz/produkty/kuka/kuka-lbr-iiwa-7-r800-a-14-r820/

[55] Dopravníkové systémy v průmyslu - 2. díl In: *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/dopravnikove-systemy-v-prumyslu-2-dil.html

[56] Dopravníkové systémy v průmyslu - 3. díl In: *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/dopravnikove-systemy-v-prumyslu-3-dil.html

[57] What are pallet conveyors? (Not to be confused with pallet-moving conveyors) In: *Motion Control Tips* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.motioncontroltips.com/what-are-pallet-conveyors/

[58] Co-act EGP-C In: *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/series/co-act-egp-c/

[59] GIMATIC KIT-TM-V In: *Techman Robot Inc.* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.tm-robot.com/en/product/gimatickit-tm-v/

[60] Radiofrekvenční identifikace - RFID In: *KODYS, s. r. o.* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://www.kodys.cz/technologie/rfid

[61] Co je to strojové vidění a jak může pomoci? In: *Vseoprumyslu.cz* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://www.vseoprumyslu.cz/automatizace/kontrola-procesu/co-je-to-strojove-videni-a-jak-muze-pomoci.html

[62] Automatizace logistiky, skladů i výroby s RFID In: *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/automatizace-logistiky-skladu-i-vyroby-s-rfid.html

[63] PLC-based vs. proprietary robotic controls In: *Controleng.com* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://www.controleng.com/articles/plc-based-vs-proprietary-robotic-controls/

[64] ETHERNET-COMMUNICATION-BETWEEN-THE-PLC-AND-ANY-ROBOT In: *Shell-O-Matic Inc* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://www.shellomatic.com/products/control-architecture/ethernet-communication-between-the-plc-and-any-robot/

[65] PLC or No PLC?: Robot Controller Takes on More In: *Automate.org* [online]. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: https://www.automate.org/industry-insights/plc-or-no-plc-robot-controller-takes-on-more

[66] The new IRC5 robot controller In: *ABB* [online]. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/a9513886d120cd574825749b0029b811/IRC5_C.pdf

[67] ST4209M1704-A In: *M B M Technik s.r.o.* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.mbmtechnik.cz/client/7_mbmtechnik/uploads/data/PRODUKTY/Elektromotory/Krokove%20motory/Hybridni%20krokove%20motory/ST4209%20-%200.9%C2%B0%20-%20NEMA%2017/vykresy/vykres_ST4209M1704-A.pdf

[68] Multikriteriální analýza In: *Spravnym.smerem.cz* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: https://spravnym.smerem.cz/Tema/Multikriteri%c3%a1ln%c3%ad%20anal%c3%bdza

[69] TS 2 plus Transfer System In: *Bosch Rexroth AG* [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://www.boschrexroth.com/cs/cz/produkty/skupiny-produktu/montazni-technika/transfer-systems/ts-2plus-transfer-system

[70] IRB 920T In: *ABB* [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-920t

[71] Product overview In: *STÖGER AUTOMATION GmbH* [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: https://www.stoeger.com/en/list-of-products.html

[72] Payback Period (Payback Method) In: *www.myaccountingcourse.com* [online]. [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: https://www.myaccountingcourse.com/financial-ratios/payback-period

[73] Průměrné mzdy - 4. čtvrtletí 2021 In: *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: czso.cz/csu/czso/cri/prumerne-mzdy-4-ctvrtleti-2021

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam použitých symbolů a zkratek

CAD Computer Aided Design

HiL Hardware in the Loop

HMI Human Machine Interface

PLC Programmable Logic Controller

RFID Radio Frequency Identification

SCARA Selective Compliance Articulated Robot Arm

SiL Software in the Loop

TCP Tool center point

Wobj Workobject

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Průměrná návratnost investic na základě robotických aplikací [2].....19

Obr. 2) Vývoj a prognóza instalovaných robotických pracovišť v tisících kusů [3]...20

Obr. 3) Hlavní pilíře Průmyslu 4.0 [5] 20

Obr. 4) Přímé on-line programování pomocí tlačítek na manipulátoru [7].....21

Obr. 5) Nepřímé on-line programování pomocí ovládacího panelu [8] 22

Obr. 6) Off-line programování [9].....22

Obr. 7) Zprovoznění výrobního systému [11] 23

Obr. 8) Porovnání tradičního a virtuálního zprovoznění [13] 24

Obr. 9) Pravidlo desítek [14] 24

Obr. 10) Porovnání SiL a HiL metody [17].....25

Obr. 11) Virtuální zprovoznění výrobní linky pro bodové svařování karosérie automobilu [18].....26

Obr. 12) Části krokového motoru [25] 29

Obr. 13) Krokové motory NEMA [26].....30

Obr. 14) Rozmontovaný krokový motor 30

Obr. 15) Ukázka robotických šroubovacích aplikací [27].....31

Obr. 16) Robotický šroubovací systém pro přímý i nepřímý přívod šroubů [28].....32

Obr. 17) Princip krokového podavače [29] 33

Obr. 18) a) Vibrační podavač [30], b) Krokový podavač [30], c) Segmentový podavač [31] 33
Obr. 19) Pásový zásobník šroubů [32] 34
Obr. 20) Doprava šroubů přívodní hadicí [34] 35
Obr. 21) Robotické šroubování metodou pick and place [36] 35
Obr. 22) Filtrace nečistot [37] 36
Obr. 23) a) Externí vedení stlačeného vzduchu [39], b) Připojení k interně vedeným energiím a signálům [40] 37
Obr. 24) a) Čelisťové pouzdro [41], b) Kuličkové pouzdro [41], c) Podtlakový mechanismus [42] 38
Obr. 25) a) Kolaborativní šroubovací hlava [43], b) Průmyslová šroubovací hlava [44]. 38
Obr. 26) a) Stanice nástrojů, b) Čtečka kódů [45] 39
Obr. 27) Řídicí jednotky s integrovanou obrazovkou [48] 40
Obr. 28) Kartézský robot [50] 40
Obr. 29) Průmyslový robot [51] 41
Obr. 30) SCARA robot [52] 41
Obr. 31) a) Kolaborativní robot se dvěma pažemi [53], b) Sedmiosý kolaborativní robot [54] 42
Obr. 32) a) Řemenový dopravník s aretací, b) Válečkový dopravník se zakládací paletou [57] 43
Obr. 33) a) Kolaborativní uchopovací mechanismus [58], b) Podtlakové chapadlo [59] 43
Obr. 34) a) RFID čtečka ve výrobní lince [62], b) Kontrola pomocí strojového vidění [61] 44
Obr. 35) PLC řízení [64] 45
Obr. 36) Řízení robotickým kontrolérem [66] 46
Obr. 37) 3D model použitý pro tvorbu návrhu ve srovnání s reálným krokovým motorem 47
Obr. 38) Rozměry výchozího krokového motoru ST4209M1704-A [67] 47
Obr. 39) Nákres pracoviště varianty A 48
Obr. 40) Ganttův diagram varianty A 48
Obr. 41) Nákres pracoviště varianty B 49
Obr. 42) Ganttův diagram varianty B 49
Obr. 43) Nákres pracoviště varianty C 50

Obr. 44) Ganttův diagram varianty C 50
Obr. 45) Řemenový dopravníkový systém Bosch Rexroth TS 2plus 53
Obr. 46) a) Paleta WT 2, b) Poziční jednotka PE 2/X [69] 54
Obr. 47) Přípravek na paletě WT 2 připravený pro šroubování a zakládání 54
Obr. 48) Detail na upínací mechanismus 54
Obr. 49) Posloupnost pohybů upínky 55
Obr. 50) Čtyřosý SCARA robot ABB IRB 920T-6/0,55 [70] 55
Obr. 51) Šroubovací hlava STÖGER AUTOMATION GmbH SRL 21 [71] 56
Obr. 52) Spojení šroubovací hlavy a robotu 56
Obr. 53) Podavač šroubů STÖGER AUTOMATION GmbH STF 8010 ELK [71] 57
Obr. 54) Oplocení pracoviště 58
Obr. 55) Detail pracovního prostoru obsluhy 58
Obr. 56) Výsledný 3D model pracoviště 59
Obr. 57) Ergonomie pracoviště 59
Obr. 58) Schéma komunikace pracoviště 60
Obr. 59) Mechanismus pohybu poziční jednotky – levá v dolní (výchozí) poloze, pravá v horní (aretované) poloze 61
Obr. 60) Detekce polohy pomocí komponenty Plane Sensor 62
Obr. 61) Logika komponent levého dopravníkového systému 62
Obr. 62) Vztahy mezi levým dopravníkovým systémem a kontrolérem 63
Obr. 63) Zjednodušená společná logika komponent levého přípravku 64
Obr. 64) Pohled na otevřené servisní dveře a komponentu Plane Sensor simulující světelné závory 65
Obr. 65) Pracovní objekty pracoviště 67
Obr. 66) Orientace souřadných systémů a pozice TCP 67
Obr. 67) Trajektorie robotu při šroubování 68
Obr. 68) Vývojový diagram výběru přípravků 69
Obr. 69) Vývojový diagram dopravníku 70
Obr. 70) Vývojový diagram šroubovacího procesu 71
Obr. 71) Pohled do pracovního prostoru během simulace 72
Obr. 72) Výsledný čas procesů zobrazený ve zprávách ovládacího panelu 72
Obr. 73) Ganttův diagram výsledného řešení 74

10.3 Seznam tabulek

Tab 1) Programovací jazyky vybraných výrobců průmyslových robotů 23
Tab 2) Aritmetický průměr naměřených časů pro jednotlivé montážní operace 31
Tab 3) Hodnocená kritéria pracoviště 51
Tab 4) Obodování jednotlivých kritérií 51
Tab 5) Výsledné hodnocení porovnávaných variant 52
Tab 6) Signály dopravníkových systémů 63
Tab 7) Signály ovládání reálných přípravků 64
Tab 8) Signály bezpečnostního okruhu 66
Tab 9) Signály ovládání 66
Tab 10) Odhadované náklady realizace 73
Tab 11) Vstupní parametry pro výpočet ušetřených nákladů 73
Tab 12) Výsledné hodnocení návratnosti 74

11 SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy v elektronické podobě:

- Model a program stanice - DP_Jakub_Filip (formát RSPAG)
- Video průběhu simulace - Station_simulation (formát MP4)