



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH AUTOMATIZOVANÉ DOPRAVY
V ROBOTIZOVANÝCH VÝROBNÍCH
SYSTÉMECH KONCEPTU INDUSTRY 4.0**

DESIGN OF AUTOMATED TRANSPORT IN ROBOTIC PRODUCTION SYSTEMS
OF THE INDUSTRY 4.0 CONCEPT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš Venkrbec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Ing. Lukáš Venkrbec**
Studijní program: Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.**
Akademický rok: 2022/23

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:

Návrh automatizované dopravy v robotizovaných výrobních systémech konceptu Industry 4.0

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Koncept Industry 4.0 předpokládá, že v rámci digitalizované výroby bude zajišťována i mezioperační doprava robotizovanými prostředky. K tomu účelu je potřeba zpracovat zásady integrace průmyslových výrobních robotů a robotických dopravních prostředků mezi výrobními robotickými pracovišti a mezi automatizovanými mezioperačními sklady, pro dosažení potřebné celkové efektivity digitalizované výroby.

Cíle diplomové práce:

Analýzujte problematiku systémového návrhu a integrace automatizované dopravy v digitální výrobě konceptu Industry 4.0

Doporučte vhodné mobilní robotické prostředky pro mezioperační dopravu.

Pro vybraný robotický mobilní systém navrhnete a realizujete program zajišťující vzájemnou spolupráci s výrobním systémem.

Seznam doporučené literatury:

NOF, S. Y. Springer Handbook of Automation. Springer, 2009. 1812 s. ISBN 978-3-540-78830-0.

KOLÍBAL, Z.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; KÁRNÍK, L.; KNOFLÍČEK, R.; KUBELA, T.; POCHYLÝ, A.; SINGULE, V. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTIUM, 2016. 788 s. ISBN: 978-80-214-4828-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou problematiky systémového návrhu a integrace automatizované dopravy v digitální výrobě konceptu Industry 4.0. Teoretická část je věnována principům a standardům Průmyslu 4.0. Dále se také věnuje výběru AMR autonomního mobilního robotu pro mezioperační dopravu a softwarů pro demonstraci dosažených výsledků. Včetně důkladného popisu jednotlivých komponent. AMR Robotino, který byl vybrán, byl využit pro účely autonomní mobilní dopravy v rámci kyber-fyzikálního systému. Nejprve byla navržena a sestavena výrobní linka, na které byla provedena výroba dle výrobního plánu. Následně byla tato linka přestavěna pro účely demonstrace dopravy materiálu mezi jednotlivými moduly a jejich příslušnými aplikacemi pomocí AMR.

ABSTRACT

This master thesis deals with the analysis of the system design and integration of automated transport in digital manufacturing of the Industry 4.0 concept. The theoretical part is devoted to the principles and standards of Industry 4.0. It also discusses the selection of an AMR autonomous mobile robot for inter-operational transport and the software to demonstrate the results obtained. Including a thorough description of the individual components. The AMR Robotino that was selected was used for the purpose of autonomous mobile transport within a cyber-physical system. Firstly, a production line was designed and assembled and the production was carried out according to the production plan. Subsequently, this line was rebuilt for the purpose of demonstrating material transport between the modules and their respective applications using AMR.

KLÍČOVÁ SLOVA

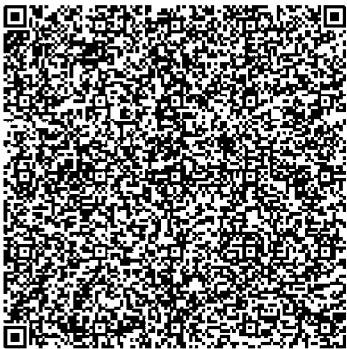
Průmysl 4.0, RAMI 4.0, Mobilní autonomní robot, Robotino, CP-Factory, Kyber-fyzikální systémy

KEYWORDS

Industry 4.0, RAMI 4.0, Mobile Autonomous Robot, Robotino, CP-Factory, cyber-physical systems



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VENKRBEČ, Lukáš. Návrh automatizované dopravy v robotizovaných výrobních systémech konceptu Industry 4.0. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145891>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce: Doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Branislavovi Lacko, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat manželce za podporu, trpělivost, přístup a toleranci.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2023

.....

Lukáš Venkrbec

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD..... | 15 |
| 2 | STANDARDY PRO PRŮMYSL 4.0 | 17 |
| 2.1 | Cesta k Průmyslu 4.0 | 17 |
| 2.2 | Průmysl 4.0 | 18 |
| 2.2.1 | Vize Průmyslu 4.0 | 19 |
| 2.3 | RAMI 4.0..... | 20 |
| 2.4 | Model komponenty Průmyslu 4.0 | 22 |
| 2.5 | ASS – Asset Administration Shell..... | 23 |
| 3 | KYBER-FYZIKÁLNÍ SYSTÉM..... | 25 |
| 3.1 | Kyber-fyzikální továrna..... | 26 |
| 3.1.1 | Základní modul pásového dopravníku | 28 |
| 3.1.2 | Základní modul pásového dopravníku s výhybkou | 28 |
| 3.1.3 | Modul buňky..... | 29 |
| 3.1.4 | Modul Robotické buňky | 29 |
| 3.1.5 | Aplikační moduly | 30 |
| 3.2 | AMR – Autonomní mobilní roboty | 32 |
| 3.2.1 | Autonomní mobilní roboty KUKA..... | 32 |
| 3.2.2 | Autonomní mobilní roboty OMRON | 33 |
| 3.2.3 | Autonomní mobilní robot Stäubli..... | 34 |
| 3.2.4 | Autonomní mobilní roboty MiR..... | 34 |
| 3.2.5 | Autonomní mobilní robot Festo | 35 |
| 4 | ROBOTINO | 37 |
| 4.1 | Hardwarové vybavení..... | 38 |
| 4.1.1 | Řízení..... | 38 |
| 4.1.2 | Pohonný systém..... | 39 |
| 4.1.3 | Senzory | 40 |
| 4.1.4 | Rozhraní..... | 43 |
| 4.2 | Vývojový SW pro návrh 3D modelu | 44 |
| 4.2.1 | RobotStudio | 44 |
| 4.2.2 | CIROS | 44 |
| 4.3 | MES | 45 |
| 4.3.1 | MES4 od firmy FESTO | 46 |
| 4.3.2 | COMES - COMPAS..... | 47 |
| 5 | NÁVRH LINKY V CIROS..... | 49 |
| 5.1 | Návrh linky v prostředí CIROS a sestavení výrobního plánu v MES4 | 49 |
| 5.1.1 | Tvorba virtuální linky v CIROS | 50 |
| 5.1.2 | Tvorba výrobního plánu v MES4 pro virtuální linku | 50 |
| 6 | NÁVRH LINKY S AMR ROBOTINO..... | 57 |
| 6.1 | Mapování pomocí Robotino | 57 |
| 6.2 | Fleet manager | 58 |
| 6.3 | RobotinoView..... | 59 |
| 6.4 | Řízení Robotino pomocí skriptu v Python | 60 |
| 6.5 | Návrh konceptu automatické dopravy v CIROS | 62 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 7 | KOMUNIKACE | 65 |
| 7.1 | Komunikace mezi CP-Factory a MES4 | 66 |
| 7.2 | Komunikace mezi MES4 a Robotino..... | 67 |
| 8 | ZHODNOCENÍ A DISKUZE | 69 |
| 9 | ZÁVĚR..... | 71 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 73 |
| | SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK..... | 77 |

1 ÚVOD

Průmysl 4.0 (Industry 4.0 eng.) je dnes velmi často populární i nepopulární pojem, záleží, z jakého úhlu pohledu se na to podáváme. Někteří se těší, že už nebudou muset pracovat a jiní se děsí, že přijdou o práci a nahradí je stroje a roboty. Je to cesta k továrnám budoucnosti, která se nezadržitelně blíží. Průmysl 4.0 je naší součástí, ať chceme nebo nechceme. Můžeme o tom vést spory, můžeme s tím nesouhlasit, ale to je tak všechno, co se proti tomu dá dělat. (Jára Cimrman)

Málo kdo ale ví, co si pod tímto označením I4.0 má představit. A právě to by tato práce svým čtenářům ráda ukázala. Cesta k Průmyslu 4.0 je dnes velmi populární, mnoho firem se chlubí tím, že jejich továrna je Industry 4.0, ale po prostudování této práce budete vědět, že taková firma ještě neexistuje. A pokud to někdo tvrdí, tak vlastně neporozuměl tomu co Industry 4.0 vlastně je. Dnes je to pouze velmi populární marketingový tah. Existují samozřejmě firmy, které se tomu snaží přiblížit a jsou na velmi dobré cestě, ale ještě ani zdaleka nejsou v cíli. Nemohou za to ani tak ony, ale celkové myšlení předních výrobců strojů a zařízení, kteří se standardů I4.0 nedrží. Tím pádem ani nedává smysl, i pokud bychom technologie konceptu I4.0 měli, je použít.

Základní myšlenka I4.0 je standardizace. Pokud se nevydáme cestou standardizace, nebude tato myšlenka nikdy fungovat a nikdy nenaplní svá očekávání. Jednou z hlavní výhod standardizace je technologie „Plug-and-Produce“. Můžeme si to představit na již zaběhlém standardu v IT a to konektoru USB. Dnes je pro nás takřka nepředstavitelné, že bychom připojili přes USB například klávesnici, myš, flash paměť a ono by se nic nestalo, zařízení by nefungovalo. Nepřipojilo by se tak, jak to známe dnes díky technologii „Plug-and-Play“, kdy operační systém rozpozná zařízení, provede konfiguraci, nainstaluje ovladače, automaticky nastaví IO adresy sdílené paměti atd. Ano, ani toto dříve nebylo standardem. Dříve například u PC od IBM musel být hardware nejdříve ručně nastaven tak, aby nastavení nezasahovalo do jiných již připojených zařízení pomocí jumperu, až poté mohlo být připojeno do sběrnice PC. Následovalo zapsání nastavení do konfigurace softwaru. Pokud se nastavení neshodovala, zařízení nefungovalo. Díky technologii „Plug-and-Play“ jsme se těchto nepříjemností již zbavili, a to díky standardizaci. Pokud toto řešení přeneseme na průmyslové procesy, stroje a zařízení, uděláme obrovský krok kupředu. Bude pro nás zcela nepředstavitelné, že to dříve bylo jinak.

Cesta k „Plug-and-Produce“ není jednoduchá, ale nutná. Je potřeba, aby se firmy začaly řídit standardy I4.0 a dodávali zařízení s takzvanými „Digital Twin“ digitálními dvojčaty, nebo-li komponentami, obálkami Assety přesně jsou tato dvojčata označovaná jako Asset Administration Shell. Pokud toto budou výrobci dodržovat, přijde vám nový stroj, vy jej připojíte k ethernetu, stroj si stáhne „Digitální dvojče“ do vašeho výrobního informačního systému skrytého pod zkratkou MES „Manufacturing Execution System“ a můžete začít vyrábět.

Díky tomuto Asset Administration Shellu, který ponese informace o stroji, jako jsou například jeho aktuální stav, rychlost obrábění, cena výroby na stroji, přesnost stroje, opotřebenění nástrojů, typy nástrojů atd. bude možné, aby si výrobek sám, a to je důležité, vybíral během výroby automaticky cestu zaměřenou například na přesnost výroby, rychlost, ekonomické aspekty atd. Toto je cesta k dalšímu bodu standardů I4.0, a to je decentralizovaná výroba. Kdy není výroba řízena nějakým centrálním bodem Mastrem, ale samotnými výrobky. Můžeme se pro představu opět uvést příklad. Představme si tři 3D tiskárny například od firmy Průša, tyto tiskárny mají každá jiné parametry. Jedna dokáže tisknout rozměrnější výrobky. Druhá vytiskne sice menší výrobky, ale zato vyšší rychlostí. Třetí vytiskne také menší výrobky, pomaleji, ale zato s větší přesností. Každá tato tiskárna má své digitální dvojče AAS tedy Asset Administration Shell, který nese tyto informace. Máme čtyři produkty, které potřebujeme vytisknout. Jeden z nich je objemný, tudíž jej dokáže vytisknout jen jedna tiskárna, druhý je malého rozměru a jednoduchého tvaru tedy bez požadavků na přesnost. Třetí je malého rozměru a poměrně složitý a předpokládá se u něj využití velmi přesné tiskárny. Čtvrtý je malého rozměru a nikterak složitý. Každý tento výrobek nese své digitální dvojče, které nese tyto vypsané informace. Výrobek si sám vybere, na kterou tiskárnu půjde, zároveň bude dostávat informace o aktuálním stavu tiskárny. Výrobek dva a tři je možné vytisknout na všech tiskárnách, takže si ideálně vyberou tiskárnu, která je právě volná, je nejbližší výrobku, výroba bude trvat nejkratší možnou dobu nebo tu tiskárnu, kde bude výroba nejlevnější. Záleží, jaké priority si nastavíme. Samozřejmě tento příklad je velmi zjednodušený, nebereme v potaz spoustu dalších informací, které by v AAS jistě byly. Jako jsou například barva, typ, struktura atd.

Jako způsob, kterým bychom mezi těmito 3D tiskárnami, nebo výrobními linkami jednotlivé polotovary dopravovali, se dnes hojně používají AMR tedy autonomní mobilní roboty. Právě návrhem dopravy pomocí těchto autonomních mobilních robotů se tato práce bude zabývat v rámci konceptu I4.0.

Tato diplomová práce se zabývá analýzou problematiky systémového návrhu a integrace automatizované dopravy v digitální výrobě konceptu Industry 4.0. Teoretická část práce je věnována principům a standardům Průmyslu 4.0. Dále se také věnuje kyber-fyzikálním systémům, popisu jednotlivých modulů pásových dopravníků a robotických buněk, ale také výběru AMR autonomního mobilního robotu pro mezioperační dopravu a softwarů pro demonstraci dosažených výsledků. Včetně důkladného popisu jednotlivých komponent AMR Robotino, který byl vybrán, pro účely autonomní mobilní dopravy v rámci kyber-fyzikálního systému. Samotný výběr byl ovlivněn dostupností kyber-fyzikální továrny v místě bydliště na Vysoké škole polytechnické v Jihlavě. Při prvních testech linky, rozsáhlém prozkoumání a pochopení komplexního systému bylo pojata podezření, že testovaný hardware ani příslušný software nepracuje dle standardů Průmyslu 4.0 a objevila se zde touha to ověřit. Pokud se tato skutečnost potvrdí, tak se ji pokusit předělat či upravit k obrazu Průmyslu 4.0.

2 STANDARDY PRO PRŮMYSL 4.0

Tato kapitola pojednává o cestě průmyslu od první průmyslové revoluce až po současnou vizi Průmyslu 4.0. Věnuje se nejen vizím, ale také standardům Průmyslu 4.0, referenčním modelem RAMI 4.0, který tuto ideu popisuje a modelu komponenty Průmyslu 4.0, který slouží jako pomůcka pro systémové integrátory při vývoji HW a SW pro Průmysl 4.0.

2.1 Cesta k Průmyslu 4.0

Před každou průmyslovou revolucí stála významná událost, která tuto revoluci odstartovala. Všechny tyto události byly velmi důležité na cestě za úrovní společnosti a průmyslu jaký dnes známe.

První průmyslová revoluce vypukla v 18. století (1765 - James Watt a jeho první parní stroj), kdy za jejím vznikem stály první parní stroje. Během 19. století vlivem takzvané industrializace došlo k výraznému přechodu od ruční výroby v manufakturách ke strojní výrobě. To vedlo k velkému využívání nových zdrojů energie, jako byla v tomto období pára, která vznikala převážně spalováním uhlí. Tato skutečnost vedla ke změně způsobu dopravy a přenosu informací. Samozřejmě to mělo také dopady na změny společenské, politické a kulturní.

Počátek druhé průmyslové revoluce se datuje k roku 1870, kdy společnost Cincinnati instalovala ve svém závodě první montážní linku. Zavádění montážních linek ve smyslu dělby práce bylo nevyhnutelné vzhledem k rostoucí výrobě. Spouštěcím mechanismem této revoluce byla elektrická energie, která byla využívána nejen k pohonu strojů, automobilů, tramvají, ale také k osvětlení. Velmi se na tomto podíleli přední světový vynálezci. Předně N. Tesla v roce 1888 patentuje asynchronní motor, T. A. Edison vyvíjí žárovku v roce 1879, G. Daimler (1883-1886) sestrojil benzínový motor, pánové N. Tesla a G. Westinghaus (1891) přichází s vodní elektrárnou. H. Ford (1896) postavil první automobil, v roce 1898 také první automobil v Kopřivnici a 1899 pánové Laurin a Klement představili motocykl.

S příchodem digitalizace, automatizace a robotizace přichází třetí průmyslová revoluce. Jejíž začátek se nejčastěji pojí s příchodem prvního PLC programovatelného logického automatu, který se datuje k roku 1969 (Modicon PLC „084“). Součástí této revoluce jsou kromě masivního nasazování robotů, automatických linek a strojů také, využívání alternativních zdrojů elektřiny, domy a auto se stávají malými inteligentními elektrárnami, internetové služby usnadňují výrobu, dochází ke zvýšení komunikace, sdílení informací a dat a přichází nové výrobní postupy 3D tisku, reverzní inženýrství a další.

Základní myšlenka čtvrté průmyslové revoluce přichází v roce 2011, jejíž podstata byla představena v roce 2013 na veletrhu v Hanoveru. Podstatou jsou Kyberneticko-fyzikální systémy (CPS), tedy systémy spolupracujících výpočetních prvků, které řídí fyzické subjekty, které by měly samy o sobě řídit továrny. Tyto

inteligentní systémy by měli převzít činnosti, jako je vnímání okolního dění s počítačovým spojením strojů a dílů, které vykonávali doposud lidé. To vede k využívání kamer, snímačů, čteček nejrůznějších kódů a dalších zařízení. [1]

2.2 Průmysl 4.0

Termín, který se stal v současné době do určité míry “zaklínadlem“, Průmysl 4.0, jež je v dnešní době spojován s průmyslovými podniky a vznikl v Německu a zahrnuje v sobě moderní a pokrokovou automatizaci. Na počátku v roce 2013 stála sdružení BITKOM, VDMA a ZVEI, která uzavřela smlouvu o spolupráci provozování Platform Industrie 4.0. Ve stejném roce představila spuštění platformy na veletrh v Hanoveru. Platforma Průmyslu 4.0, která je neustále rozšiřována o další aktéry z firem, odborů, spolků a vědy či politiky, se zabývá strategiemi, technickými řešeními a doporučeními k nejdůležitějším tématům Průmyslu 4.0. Hlavními tématy, kterými se platforma zabývá, jsou standardizace a normy, technologie a výzkum, zabezpečení síťových systémů, právní rámec, práce, vzdělávání a školení a digitálními obchodními modely v průmyslu 4.0. Vznik této platformy vedl ke spolupráci více evropských zemí, šíření konceptu a vzniku dalších iniciativ ve Francii (Alliance Industrie du Futur) a Itálii (Piano Industria 4.0). Odborníci z Platform Industrie 4.0 přišli s vizí 2030 pro Průmysl 4.0. Průmysl 4.0 je více než jen obchodní nebo technologické téma. Zajišťuje naši konkurenceschopnost prostřednictvím komplexních digitálních obchodních modelů ve flexibilních a globálně propojených systémech tvorby hodnot. Vize jsou zaměřeny na zvýšení kvality života prostřednictvím digitální transformace. Pro úspěšnou implementaci Industrie 4.0 jsou klíčové tři úzce propojené strategické oblasti činnosti: autonomie, interoperabilita a udržitelnost. Zúčastněné strany na platformě Industrie 4.0 se společně zavazují k těmto oblastem činnosti jako k hlavním principům pro nadcházející desetiletí počínajícího rozšiřování Industrie 4.0 v Německu, Evropě a celosvětově. [1]

V roce 2015 byla představena vlastní iniciativa v oblasti Průmyslu 4.0 i v České republice, která vedla k vytvoření vlastního materiálu MPO.

Vláda ČR na svém zasedání dne 24. srpna 2016 schválila Iniciativu Průmysl 4.0, předloženou Ministerstvem průmyslu a obchodu, jejímž dlouhodobým cílem je udržet a posílit konkurenceschopnost České republiky v době nástupu tzv. čtvrté průmyslové revoluce ve světě. [2]

Iniciativa Průmysl 4.0 reflektuje situaci, kdy průmysl a celá ekonomika procházejí zásadními změnami způsobenými zaváděním informačních technologií, kyberneticko-fyzikálních systémů a systémů umělé inteligence do výroby, služeb a všech odvětví hospodářství.

Tato skutečnost naráží na nutnost zařazení této problematika zejména do českého odborného školství.

2.2.1 Vize Průmyslu 4.0

Základní vizí průmyslu 4.0 je systém, který prostřednictvím snímačů monitoruje prostředí a provádí vysoce kvalifikovaná, ale decentralizovaná rozhodnutí směřující k optimalizaci. Pro tento systém se ujal název chytrá továrna neboli „smart factory“ či „továrna budoucnosti“. V chytrých továrnách je vytvářena virtuální kopie fyzického světa. Jako druhou základní vizí Průmyslu 4.0 můžeme označit online propojení mezi zákazníkem a výrobcem, ale také mezi dodavatelem a výrobcem. Tedy online propojení celého hodnotového řetězce konkrétního výrobce. [3][4]

V chytré továrně by měl sám výrobek rozhodovat o způsobu jeho výroby. Výrobek si nese informaci o tom, jak má být vyroben. Touto informací může být například barva, materiál, cena, rychlost výroby atd. To způsobí decentrální řízení a tedy nezávislost průmyslové výroby na centrálním systému. Z toho plyne zachování masové výroby, větší uspokojení potřebám zákazníka a nízké ceny. Samotná výroba by měla pružně reagovat na změnu situace, ať už na straně trhu tak na straně dodavatelů. Stejně tak by měla reagovat na aktuální stav samotné výroby, vyřízení strojů, odstávky strojů atd. [3][4]

Koncept Průmyslu 4.0 definuje šest základních aspektů [3][5]:

1. Interoperabilita
2. Virtualizace
3. Decentralizace
4. Rozhodování v reálném čase
5. Orientace na služby
6. Modularita

Interoperabilita

Schopnost chytrých továren a lidí vzájemně komunikovat, spolupracovat a dosahovat vzájemné součinnosti. Kyberneticko fyzikální systémy kam patří výrobní linky, produkty a skladiště umožňují vzájemnou komunikaci mezi chytrými továrnami a lidmi. Jako komunikační rozhraní mezi člověkem a strojem tedy HMI „Human machine interface“ lze řadit dostupné systémy jako je Android, Windows, iOS atd. S tím úzce souvisí standardizace sítí a protokolů, pravidel pro kybernetickou bezpečnost a ochranu dat, jazyk včetně znaků, abecedy, gramatiky, sémantiky, syntax atd. [3][4][5]

Virtualizace

Schopnost vytvářet virtuální kopii chytré továrny, která využívá dat získaných ze snímačů umístěných na jednotlivých strojích chytré továrny. Získaná data se uplatňují v reálném čase. [3][4][5]

Decentralizace

Cesta od automatizační pyramidy systému výroby k distribuované decentralizované organizované síti systému výroby. Tato síť vede k dosažení vysoké flexibility a možnosti spolupráce napříč všemi prvky výroby. [3][4][5]

Rozhodování v reálném čase

Schopnost shromažďovat a analyzovat data a získaná data bezprostředně poskytovat. Bezprostředně může znamenat řádově v milisekundách. [3][4]

Orientace na služby

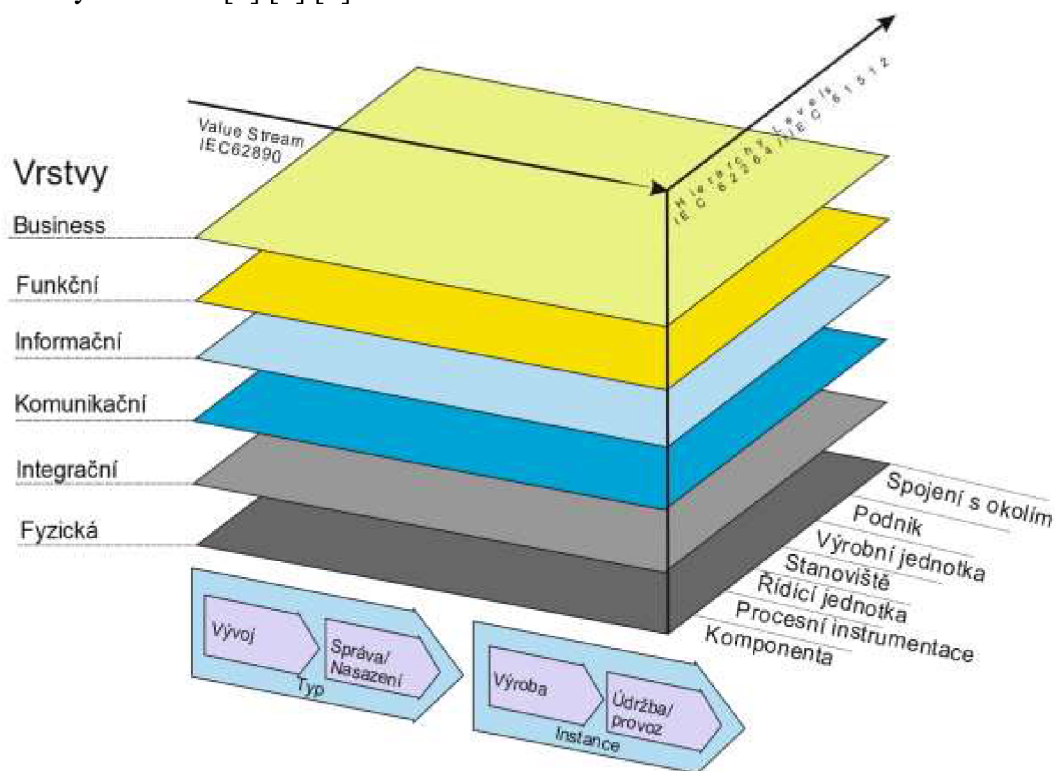
Míněno jak na služby poskytované, tak na služby nakupované. Průmysl 4.0 by měl prostřednictvím internetu služeb umožňovat nové obchodní modely, ve kterých lze služby využívat, vytvářet produkty, které lze v reálném čase spravovat a monitorovat a vytvářet obchodní modely, ve kterých placená služba nahradí vlastnictví produktu. [3][4]

Modularita

Schopnost chytré továrny adaptovat se na změněné požadavky tím, že rozšíří jednotlivé moduly, nebo je zcela nahradí. [3][4]

2.3 RAMI 4.0

Zkratka RAMI 4.0, pod kterou se skrývá Reference Architectural Model Industrie 4.0 tedy Referenční model struktury Průmyslu 4.0 vznikla pod rukami autorů ze společného sdružení německých organizací BITKOM, VDMA a ZVEI. Poprvé byla veřejnosti představena v roce 2015 ve zprávě Status Report:Reference Architecture Model Industrie 4.0. RAMI 4.0 je trojrozměrný vrstvý model, který spojuje základní vlastnosti konceptu Průmyslu 4.0, je vyobrazen na Obr. 1. Model umožňuje rozdělení jednotlivých funkcí Průmyslu 4.0 na menší a jednodušší, které mohou být dále rozvíjeny. Popis jednotlivých vrstev: [4] [5] [6]



Obr. 1: Model RAMI 4.0 [6]

Fyzická vrstva (Asset)

Fyzická podstata komponenty jako například dokumentace, obvodová schémata, stroj, atd. Tato část je spojena s okolím přes integrační vrstvu například pomocí QR kódu. [3][4]

Integrační vrstva

Poskytuje informace o fyzické vrstvě objektů (Assets) ve vhodné formě pro následné zpracování. Řídí technický proces a generuje události na základě elementů, jako jsou snímače, HMI, akční členy, RFID čtečky, atd. Významné události mohou spouštět eventy vedoucí prostřednictvím komunikační vrstvy do informační vrstvy. [4][6]

Komunikační vrstva

Standardizuje komunikaci skrze universální formát dat vzhledem k informační vrstvě. Poskytuje také služby pro řízení integrační vrstvy. [4][6]

Informační vrstva

Zprostředkovává runtime pro předzpracování událostí a uskutečňuje exekutivu pravidel, vztahujících se k událostem, udržení integrity dat, jejich konzistence, získávání nových dat, poskytování strukturovaných dat a získávání událostí pro funkční vrstvu. [3][4]

Funkční vrstva

Vytváří platformu pro horizontální integraci různých funkcí a umožňuje formalizovaný popis funkcí. Obsahuje prostředí pro modelování služeb, běh a podporu obchodních procesů a obsahuje prostředí pro technickou funkčnost a běh aplikací, generuje pravidla a logické rozhodování. Vzhledem k nutnosti udržet integritu dat, je nutné provádět horizontální integraci a vzdálený přístup v této vrstvě. [4][6]

Obchodní vrstva

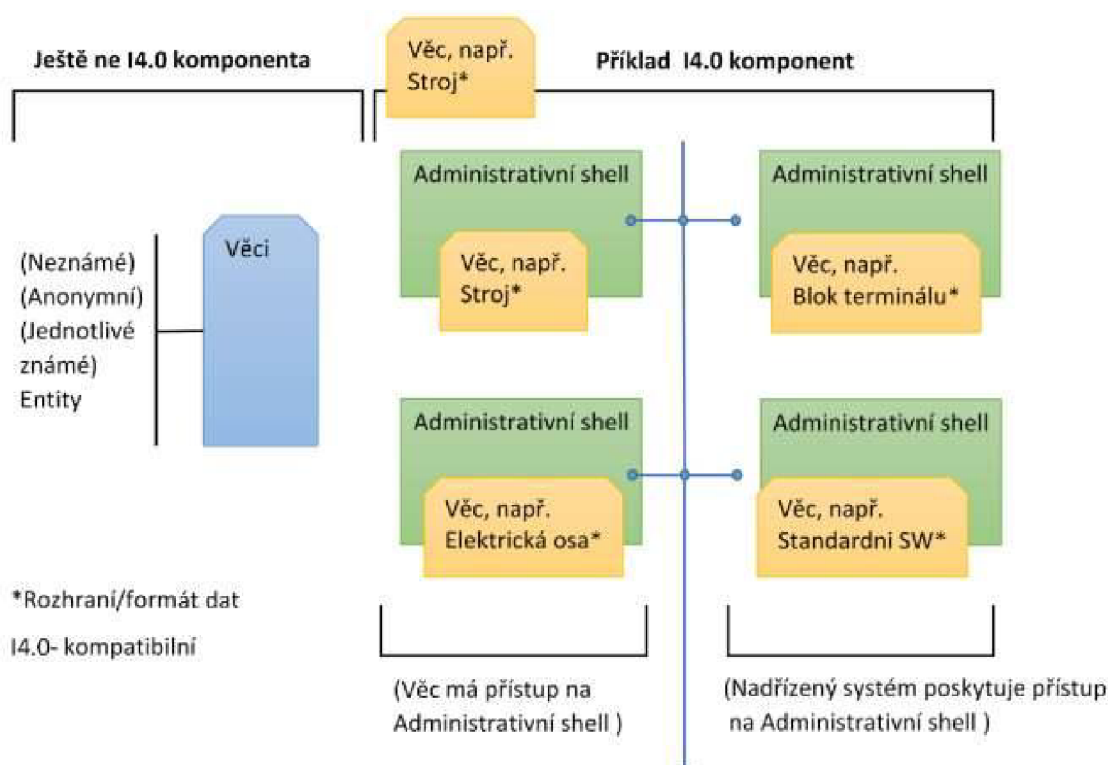
Zajišťuje integritu funkcí v hodnotovém toku, umožňuje mapování obchodních modelů a z toho plynoucí celkový proces. Umožňuje modelování pravidel, které musí systém respektovat a obsahuje zákonné a regulační podmínky prostředí. Tato vrstva také tvoří spojení mezi různými obchodními procesy. [4][6]

Levá horizontální osa

Představuje hodnotový tok a životní cyklus výrobku. Osa je rozdělena na dvě třídy Typ a Instance. Typ reprezentuje počáteční ideu každého produktu HW/SW nebo stroje. Obsahuje dokumentaci výzkumu, přes vývoj a testování až po výrobu prototypu. Poté co jsou vyrobeny funkční vzory, které jsou oživeny, otestovány a projdou validací, započne sériová výroba. Každému výrobku je přiděleno sériové číslo a stává se instancí vyvinutého produktu Typu. Spotřebitel může poskytnout zpětnou vazbu na korekturu produktu. Tyto modifikace jsou promítnuty do dokumentace, jako vylepšení Typu v rámci Správy Typu, a následně jsou dle vylepšení v dokumentaci Typu vyráběny nové Instance. Digitalizace hodnotového toku v úplně digitalizované výrobě v reálném čase umožňuje propojení plánování, nákupu, logistiky údržby, plánování atd. což představuje velký potenciál pro vylepšení Typu. [4][6]

Pravá horizontální osa

Popisuje hierarchickou strukturu, která reprezentuje různé funkce v distribuovaných výrobních systémech, které jsou děleny do několika částí od Komponenty po Spojení s okolím. Spojení s okolím reprezentuje otevřenost směrem k zákazníkům, dodavatelům a spolupracujícím firmám. Vertikála reprezentuje komponentu výroby, protože u Průmyslu 4.0 se počítá se samotnou aktivitou a inteligencí produktu během jeho životního cyklu. Toto lze považovat za nejdůležitější část RAMI 4.0, že výrobek sám nahradí určité funkce MESu a dalších řídicích systémů. Každý výrobek v sobě ponese kompletní informace o sobě. Při každé operaci na něm provedené se tyto informace aktualizují až po ukončení výrobního cyklu. Například pomocí RFID čipu[4][6]



Obr. 2: Model komponenty Průmyslu 4.0 [4]

2.4 Model komponenty Průmyslu 4.0

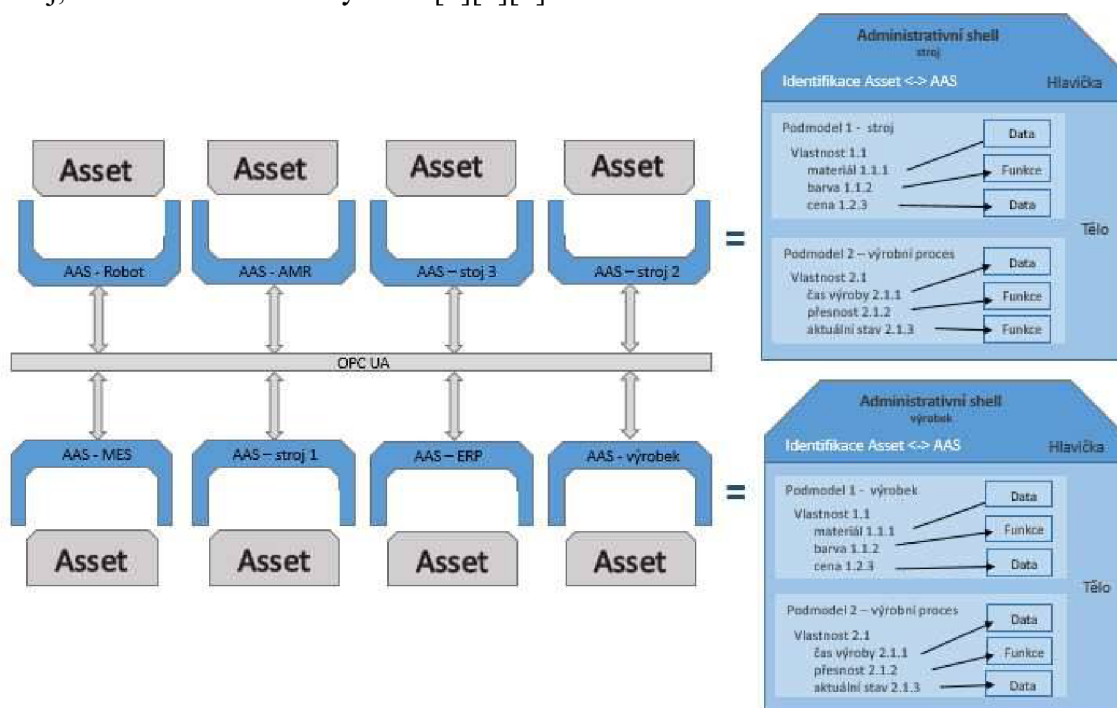
Model komponenty Průmyslu 4.0 vychází z modelu RAMI 4.0 a je určen pro výrobce a systémové integrátory, jako pomoc při vývoji HW nebo SW komponenty pro Průmysl 4.0. Model by měl umožňovat lepší popis vlastností kyber-fyzikálních objektů a procesů. Tou nejdůležitější vlastností je schopnost komunikace mezi reálnými objekty a procesy a virtuálními objekty a procesy. Komponenty Průmyslu 4.0 nesou elektronický kontejner zabezpečených dat, která jsou k dispozici všem entitám výrobně-obchodního řetězce, během celého životního cyklu takzvaný Shell. Model vychází ze standardizované, zabezpečené, real-time komunikace všech komponent produkce. Shell

dat a celý model komponenty Průmyslu 4.0 je vyobrazen na Obr. 2 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [4][6]

2.5 ASS – Asset Administration Shell

Aset Administration Shell (AAS), který lze označit jako digitální dvojče, tedy digitální reprezentaci průmyslové fyzické komponenty, je standardizovaná datová obálka konkrétní komponenty Průmyslu 4.0 a hlavní složkou Průmyslu 4.0. Všechny komponenty v Průmyslu 4.0 musí mít administrativní shell AS, který tvoří rozhraní mezi virtuální a fyzickou částí, ale také mezi HW a SW částí či SW a SW částí produkčního kyber-fyzikálního systému. AAS může být zaměřené výhradně na HW aktiva, ale také na SW aktiva jako je například MES a ERP. Pro datovou komunikaci mezi AAS lze použít OPC UA. Toto komunikační rozhraní disponuje schématem klient-server. AAS najde své využití jako prostředek pro optimalizaci procesu pomocí virtuálních modelů komponent a také jako nepostradatelný prostředek decentralizovaného řízení, s kterým počítá Průmysl 4.0. Je to ideální nástroj pro vizualizaci real-time procesu v podobě 3D modelu kyber-fyzikálního systému. [7][8][9]

Struktura takového administrativního shellu je dělena na tělo a hlavičku. Záhlaví pak obsahuje podrobnosti o AAS pro identifikaci a tělo obsahuje podmodely. Každý z těchto podmodelů obsahuje vlastnosti, data a funkce jednotlivých komponent. Na základě jejichž pak samotný výrobek žádá ostatní komponenty v tomto případě stroje o provedení aplikace dle těchto parametrů. Mezi těmito parametry může být kapacita, funkčnost, typ nasazeného materiálu ve stroji, typ nebo dostupnost obráběcího nástroje nebo schopnosti výrobního stroje, jako jsou čas, přesnost atd. Výrobek si pak sám vybírá stroj, na kterém se nechá vyrobit. [7][8][9]

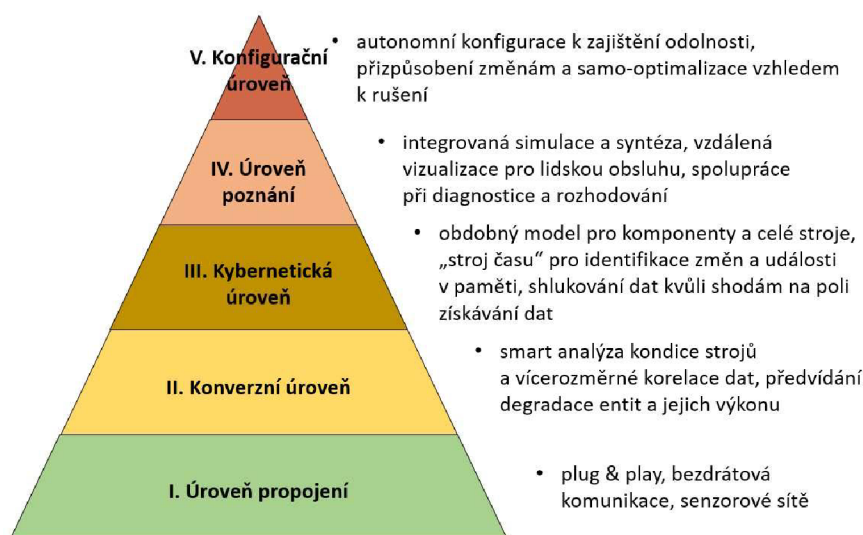


Obr. 3: Komunikace komponent skrze AAS a jejich detail (Hlavička, tělo): [7][8][9]

3 KYBER-FYZIKÁLNÍ SYSTÉM

Kyber-fyzikální systém je integrovaný systém, který kombinuje kybernetické (informační) a fyzikální mechanické (reálné) prvky (senzory, akční členy, roboty atd.), které vzájemně komunikují a spolupracují k dosažení určitého cíle. Jedná se o mechanické systémy, které jsou řízené algoritmy a získanými daty. Architekturu takového systému lze popsat pomocí pěti úrovní, tyto úrovně můžeme vidět na Obr. 4 pod označením 5C architektura, následovně: [10]

- úroveň propojení (Connection eng.) pro získávání přesných a spolehlivých dat ze strojů. Data mohou být získávána přímo měřením (senzorové sítě), nebo získávána z řídicích jednotek či systémů ERP nebo MES.
- konverzní úroveň (Conversion eng.) pro převod dat na informace. Probíhá zde analýza životnosti strojů a prognostika.
- kybernetická úroveň (Cyber eng.) tvoří centrální informační uzel. Dochází zde k porovnávání rozsáhlého množství dat získaných od strojů v rámci celého systému.
- úroveň poznání (Cognition eng.) pro prezentaci získaných znalostí expertním uživatelům (vzdálená vizualizace pro operátora). Vzhledem k získaným datům, zde lze rozhodnout, o prioritě úkolů pro optimalizaci systému.
- konfigurační úroveň (Configuration eng.) představuje zpětnou vazbu kybernetického prostoru do fyzického prostoru. Dochází zde k samokonfiguraci, samočinnému přizpůsobení a samooptimalizaci strojů, které vede k zajištění odolnosti.



Obr. 4: 5C architektura [10]

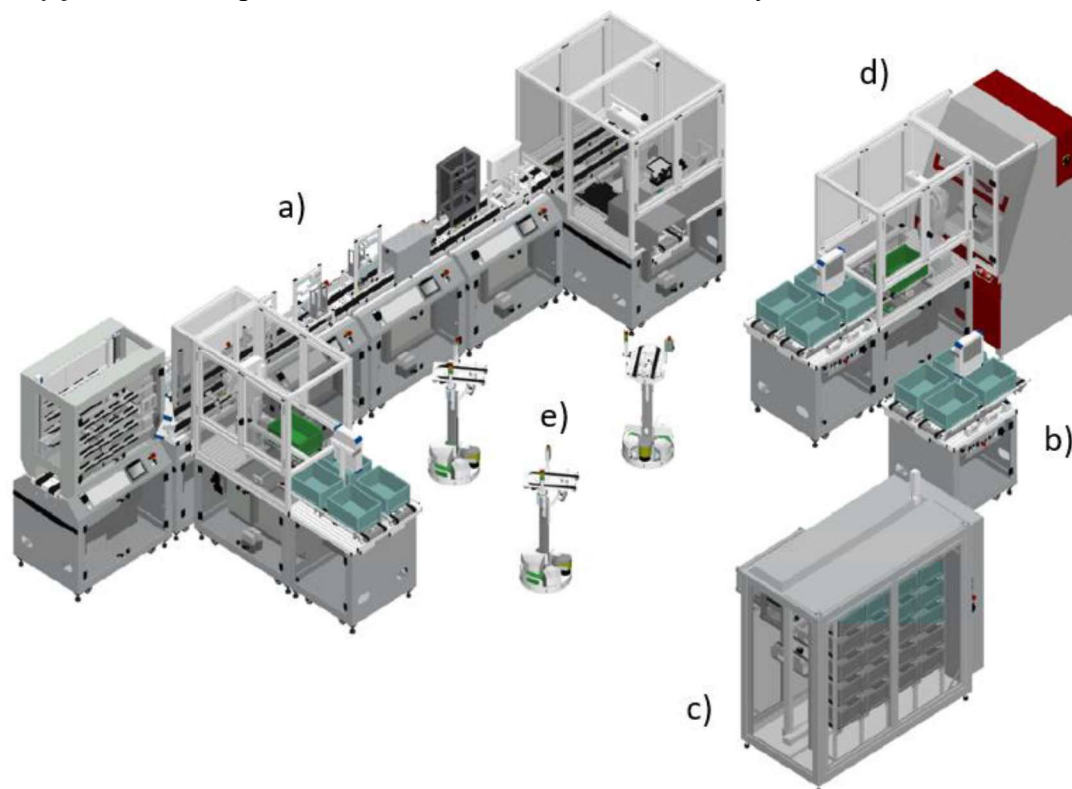
Kyber fyzikální systém pod názvem CP-Factory (Cyber-Physical Factory) je tréninková montážní linka od firmy FESTO, na které lze demonstrovat principy Průmyslu 4.0 a provádět výzkum v této oblasti. Továrna se skládá ze základních modulů (pasového dopravníku a pásového dopravníku s výhybkou), robotických buněk, autonomních

mobilních robotů a aplikačních částí, které jsou umístěna na modulu pásového dopravníku. Aplikační část může provádět například vrtání, lisování, ohřev, doplňování materiálu, měření atd. Tyto dva systémy nejsou na sobě nijak závislé a je tedy možné aplikační část kdykoliv změnit, přesunout nebo odstranit.

Díky výše uvedenému umístění komponent je linka velmi modulární. Jejich spojování a rozpojování je rychlé a jednoduché. Jejich přesouvání umožňují podvozky osazené kolečky. Hlavní výhodou snadného přepojení a přestavení modulů jsou konektory, které umožňují pomocí jediného konektoru spojit či rozpojit sousední moduly pásových dopravníků. Tyto konektory obsahují silové vodiče, pneumatické rozvody, signálové vodiče a ethernet v tomto případě v podobě průmyslové komunikační sběrnice PROFINET. Díky RFID čipům respektive jejich čtečkám a kruhovému objezdu v podobě nekonečného pásu linky nezáleží na umístění jednotlivých modulů. Nezáleží ani na rozmístění aplikačních částí vzhledem k dodržení pracovního postupu a jejich návaznosti. Je ale důležité volit uspořádání jednotlivých modulů tak, aby čas výroby byl co možná nejrychlejší vzhledem k dané výrobní úloze, tak aby trajektorie a prostoje vozíku byla co možná nejkratší. [12][11]

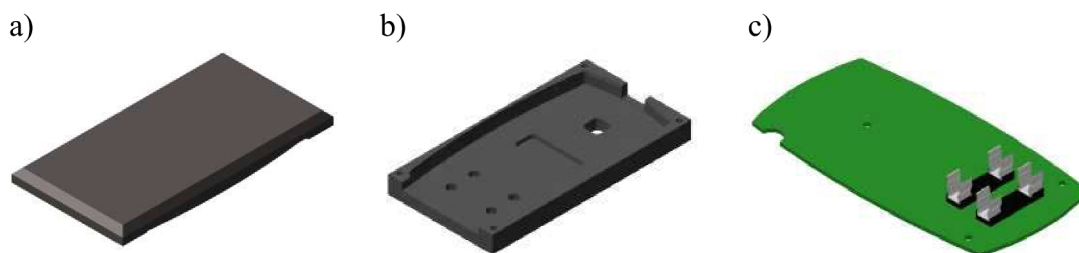
3.1 Kyber-fyzikální továrna

Linka umístěna na VŠPJ v Jihlavě je tvořena čtyřmi ostrovy, které můžeme pojmenovat jako montážní linka, ruční pracoviště, sklad a obráběcí linka. Mezi těmito jednotlivými ostrovy je materiál dopravován autonomními mobilními roboty Robotino, viz Obr. 5.



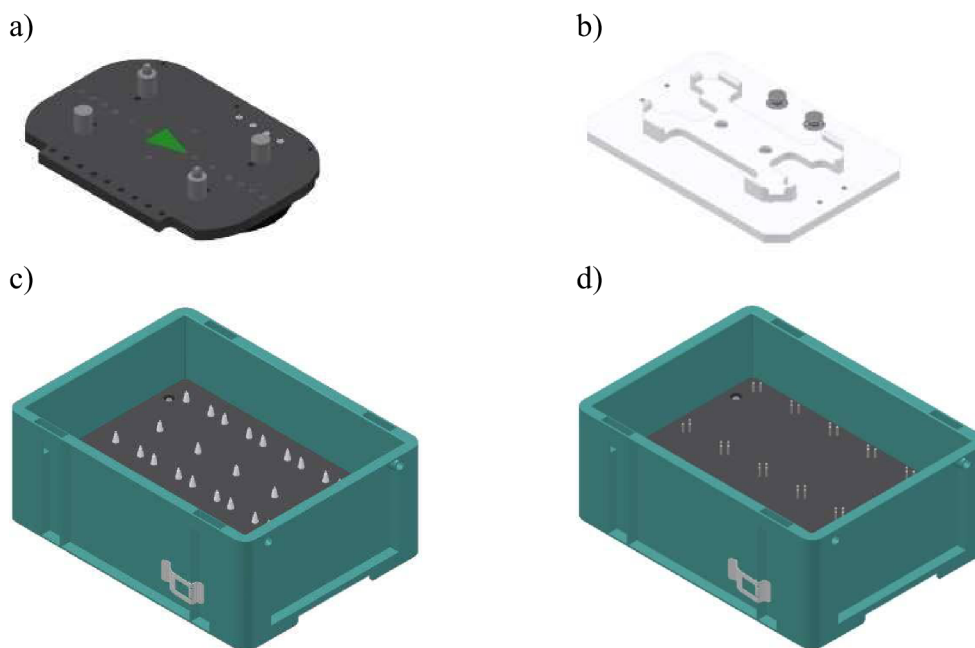
Obr. 5: Linka umístěna na VŠPJ v Jihlavě a její části a) montážní linka, b) ruční pracoviště, c) sklad d) obráběcí linka a e) Robotino [12]

Linka je uzpůsobena pro výrobu velmi zjednodušeného modelu mobilního telefonu tvořeného třemi díly předním a zadním krytem, také deskou plošných spojů (PCB) a dále dvěma válečkovými elektrickými pojistkami, jednotlivé díly kromě pojistek jsou vyobrazeny na Obr. 6. Dle zvolené konfigurace linky a výrobních operací je možné volit i složitost výrobku dle vlastního uvážení či přání zákazníka např., od pouhého obrobění krytu až po kompletní složení, vyvrtání, pájení a osazení desky plošných spojů dvěma součástkami v podobě elektrických pojistek. [12]



Obr. 6: Zjednodušený model mobilního telefonu a) Zadní kryt, b) Přední kryt, c) Deska plošných spojů [13]

Vyráběné kusy a materiály jsou mezi jednotlivými moduly dopravovány pomocí nosičů (carrier) a palet (pallet) na pásových dopravnících nebo pomocí boxů na uzpůsobených pásových dopravnících, které slouží jako vstupy a výstupy modulů, nebo pomocí autonomních mobilních robotů Robotino v případě dopravy mezi jednotlivými ostrovy. Výše uvedené prvky jsou uvedeny na Obr. 7. Každý nosič nebo box obsahuje RFID čip, který nese data pro identifikaci daného prvku a jeho nákladu tedy materiálu který nese. Nosič je schopen převážet jednu paletu, na kterou lze umístit jeden výrobek v podobě předního, nebo zadního krytu po nekonečném pásu linky. Box je uzpůsoben pro převoz až 10 výrobků najednou ať už jsou to desky plošných spojů, horní nebo dolní kryty a to, obrobené či neobrobené, zkompletované či nezkompletované. [12]



Obr. 7: Doprava materiálu na lince a) nosič, b) paleta, c) PCB box a d) box pro horní a spodní kryty [13]

3.1.1 Základní modul pásového dopravníku

Základní modul pásového dopravníku, viz Obr. 8, je tvořen dvěma paralelními protiběžnými pásy, které umožňují obousměrný chod a přesun materiálu na paletách, které jsou umístěny na nosičích. Lze je sestavit tak, aby umožňovaly pohyb nosičů po nekonečném pásu. Nosič je možné detekovat na začátku pásu, na konci pásu a v pracovní pozici.

Na každé straně pásového dopravníku je umístěn 7“ Human Machine Interface (HMI) panel TP 700 comfort od firmy Siemens, který slouží pro kontrolu a řízení aplikace a umožňuje nastavení některých parametrů, manuální ovládání, sledování procesu nebo nastavení automatické výroby bez využití systému MES. V pracovní pozici obě strany disponují čtečkou RFID čipů a tzv. Stopperem, který umožňuje zastavení vozíku osazeným RFID čipem přesně v pracovní pozici na čtečce RFID. Každý tento modul, respektive jeho strana je řízena pomocí PLC Siemens ET200SP s CPU z řady 1512SP F-1PN. Každé PLC řídí jeden dopravní pás, čtení a zápis na RFID pomocí čtečky, stopper a případně nasazenou aplikační část. Mimo jiné je v tomto CPU také webový server a hlavně rozhraní pro komunikaci PLC a MES4. Tato komunikace je založena na protokolu od FESTO který využívá standardní protokol TCP/IP. V jádru tohoto PLC je vše připraveno pro komunikaci pomocí OPC UA. FESTO komunikaci OPC UA nevyužívá. [11][14]

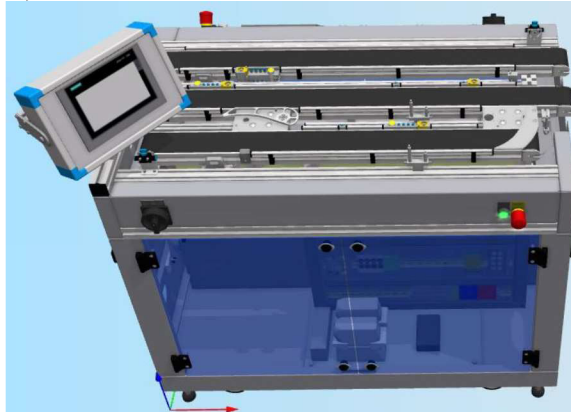
3.1.2 Základní modul pásového dopravníku s výhybkou

Základní modul pásového dopravníku s výhybkou převáží nosiče obdobně jako základní modul pásového dopravníku s tím rozdílem, že navíc disponuje třetím pásem, je uveden na Obr. 8. Třetí dopravníkový pás, je umístěn paralelně z vnější strany a pohybuje se souběžně s původním vedlejším pásem. Na hlavním okruhu se nachází výhybka opatřena RFID čtečkou, která přerozděluje materiál, který sem dorazí na nosiči na základě údajů, které vyčte z RFID nosiče. Tato výhybka umožňuje vybočení nosiče z hlavního okruhu nekonečného pásu k časově náročnější aplikaci, aby nosič neblokoval plynulost pohybu zbylých nosičů. Dodatečný třetí pás má také funkci zásobníků, umožňuje umístění až tří

a)



b)



Obr. 8: moduly CP-FACTORY a) základní modul pásového dopravníku, b) Základní modul pásového dopravníku s výhybkou [13]

nosičů s materiálem pro aplikaci, která je zde také umístěna. Pokud bude zásobník naplněn, nosiče budou pokračovat dále po nekonečném pásu, dokud se prostor na dané aplikaci neuvolní, nebo vyhledají jiné místo na lince, které umožňuje provedení stejné aplikace, pokud existuje. Poté co je aplikace ukončena zastaví se doprava na přidruženém pásu a nosič se navrátí do hlavního okruhu nekonečného pásu.[11][15]

3.1.3 Modul buňky

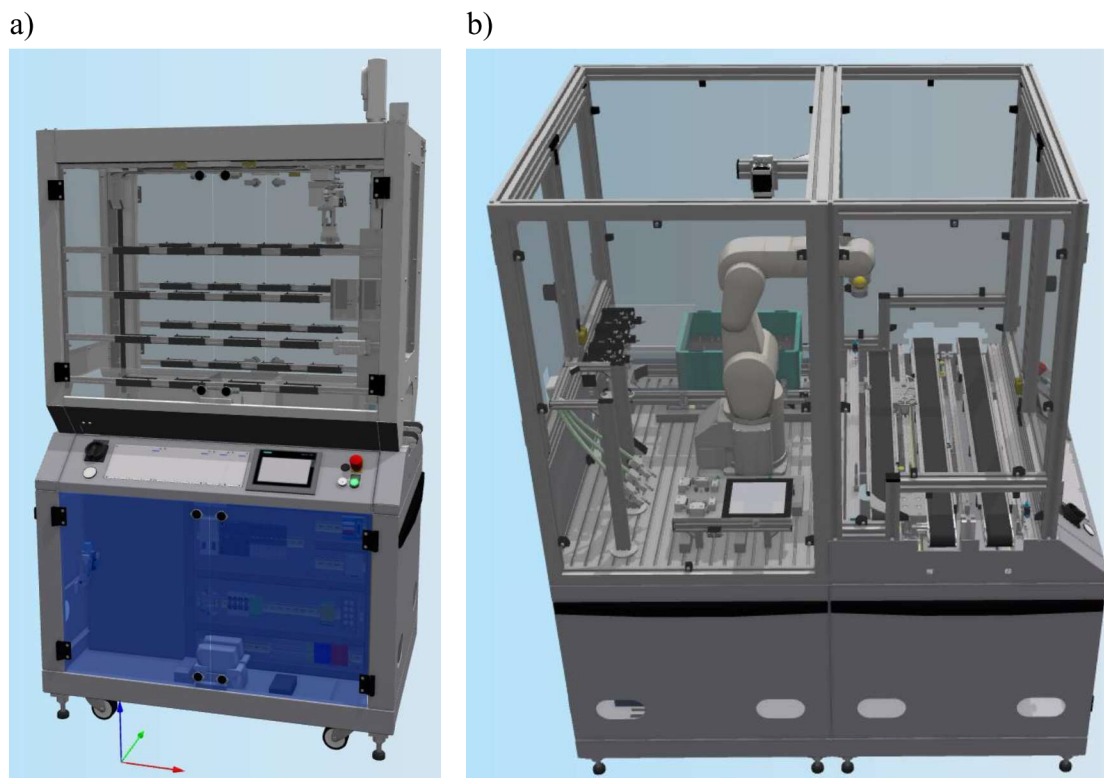
Modul buňky je tvořen ucelenými moduly vykonávajícími specifickou činnost, jsou uzpůsobeny k manipulaci s materiálem bez nosičů ve třech osách, a to buď pomocí kartézského manipulátoru, nebo pomocí šestiosého průmyslového robotu. Mezi moduly s kartézským manipulátorem se řadí například modul více úroňového skladu palet, ve kterém lze uskladnit až 32 palet i s materiálem případně s výrobkem, viz Obr. 9. Spadá sem také velký automatický sklad, který pojme až 20 boxů. Tento sklad disponuje vstupním a výstupním paralelním dopravníkovým pásem, který složí z jedné strany jako dock pro Robotino, které zde přijímá nebo vydává boxy a rozváží je na příslušná místa na lince. Z druhé strany uvnitř buňky je vstupně výstupní jednotka v podobě dopravníkových pásů obsluhována tříosým kartézským manipulátorem, který příslušné boxy vyskladňuje, respektive naskladňuje. Pozice boxů ve skladu jsou očíslovány. Každý box je opatřen RFID čipem, který nese informaci o tom jaký typ materiálu je v boxu umístěn a v jakém počtu a na jakém konkrétním místě. [11][16]

3.1.4 Modul Robotické buňky

Moduly robotické buňky většinou slouží k manipulaci materiálu z boxů a do boxů a jejich začlenění do aplikace, kterou může být modul osazování pomocí šestiosého robotu, viz Obr. 9, nebo modul CNC frézování obsluhovaný robotem a také modul pro manipulaci materiálu z boxu na nosiče nebo naopak.

Modul osazovací robotické buňky na Obr. 9, disponuje šestiosým robotem, který disponuje hned třemi uchopovacími mechanismy pro tři různé materiály. Nejdříve robot pomocí pneumaticky řízené kleštiny odebere vrchní díl krytu z nosiče, který umístí na podsvícenou plochu, kde pomocí kamery vyhodnotí natočení krytu a následně jej umístí na pracovní plochu. Po výměně uchopovacího nástroje na nástroj s dvojitou vakuovou přísavkou robot osadí na kryt desku plošných spojů z boxu, který na toto pracoviště dopravil Robotino. Znovu vymění nástroj na pneumatické kleště, kterými ze zásobníku odebere elektrickou pojistku, kterou umístí na desku plošných spojů. Poté robot opět vybere svůj první nástroj pneumaticky ovládané kleštiny a vrátí již osazený horní kryt zpět na nosič. [11][17]

Modul CNC frézování obsluhovaný robotem je tvořen dvěma celky CNC frézou a robotickou buňkou. K robotu je materiál dopravován v boxech pomocí dopravníku. Na tento dopravník je box dopravován mobilním robotem Robotino. Robot poté neobrobené materiály vkládá do CNC frézky a následně je po jejich obrobení umísťuje zpět do boxu. Robotino jej opět odváží na další pracoviště, kde je žádán daný materiál, nebo do skladu.



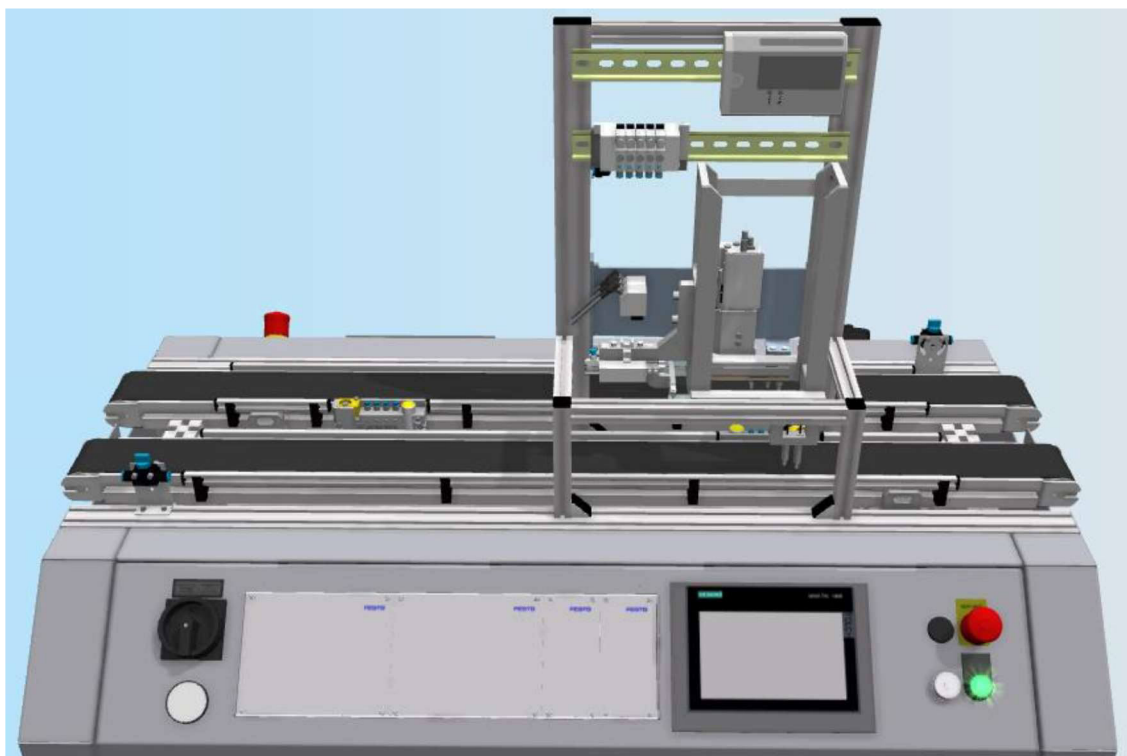
Obr. 9: Moduly buňky a) víceúrovňový sklad, b) robotická osazovací buňka [13]

3.1.5 Aplikační moduly

Aplikačních modulů je několik, vykonávají specifickou aplikaci a jsou umístěvány na základní moduly dopravníkových pásů pro nosiče, jak je uvedeno na Obr. 10.

Aplikační modul zásobníku předních a zadních krytů

Modul, který je také uveden na Obr. 10, je vyhotoven ve dvou variantách a uzpůsoben k umístění předních krytů na paletu nebo zadních krytů na paletu s předním krytem ať už osazeným nebo neosazeným deskou plošných spojů. Kryty jsou v zásobnících umístěny na sobě ve vertikální poloze. Při uvolnění jednoho kusu se vždy posouvá celý sloupec krytů. Gravitační zásobník má dvě zarážky. Pokud dojde k uvolnění spodní zarážky tedy nejnižšího krytu, je zablokován celý sloupec nad ním druhou zarážkou a k jeho zpětnému uvolnění dojde až ve chvíli, kdy se uzavře spodní zarážka. Poté se posune celý sloupec o jednu pozici níže. Zásobník je nutné plnit manuálně. Samotný modul je schopen kontrolovat stav paletky na aplikační pozici a to, zda je paleta prázdná, na paletě je přední kryt nebo zda je na paletě přední i zadní kryt. [11]



Obr. 10: Aplikační modul v podobě gravitačního zásobníku[13]

Aplikační modul ohřevu

Modul je schopen simulovat několik pracovních procesů, dle nastavení teploty a času působení teploty na materiál. Může simulovat zapečení krytů do sebe pro větší pevnost spoje nebo může simulovat pájení SMD součástek v reflow peci. Zde se jedná spíše o simulaci procesu v podobě času pájení ve formě zdržení a blokování prostupnosti linky. Nejde tedy o pájení dle skutečného teplotního profilu vzhledem k možnému rozsahu dosažitelných teplot od 30 °C do 80 °C. V modulu je umístěn senzor teploty a topné těleso. Výkon topného tělesa je regulován na základě dat ze senzoru. Po dosažení požadované hodnoty výrobek setrvává definovaný čas při této teplotě. Modul je chlazen pasivně únikem tepla z otvorů ve vrchní části, které lze uzavřít, a tak zpomalit ochlazování v modulu.

Aplikační modul vrtání

Modul vrtání po ověření, zda je na paletě kus předního krytu, provádí vrtání levých dvou otvorů, dvou pravých otvorů nebo všech čtyř otvorů dle zvoleného programu. Vrtání probíhá pomocí dvou vrtacích vřeten, jejichž pohonné jednotky jsou navzájem spřažené. Tato vřetena jsou na základě pneumatického lineárního pohonu přesouvána z pravé pozice do levé a zpět.

Aplikační modul kamerové inspekce

Modul kamerové inspekce provádí kontrolu kvality. Kontroluje, zda došlo na montážní robotické buňce skutečně k osazení desky plošných spojů pojistkami dle zadání tedy pravou, levou nebo oběma pojistkami. Kontrola probíhá v odstíněné komoře, která

odstiňuje průchod světla. Před vytvořením fotografie pro vyhodnocení se v komoře rozsvítí světlo a proces je poté vyhodnocen na základě odlesku světla od pojistek.

Aplikační modul lisování

Modul využívá pneumatického lisu, kde tuto funkci vykonává pneumatický píst, který vysunutím stlačí zadní a přední kryt do sebe. Ve vysunuté poloze setrvává několik sekund, aby z důvodu pružnosti materiálu nedošlo k jeho opětovnému rozpojení. Pracoviště dokáže vyhodnotit, zda je na předním krytu umístěn zadní kryt, aby nedošlo k poškození například plošného spoje. Také dokáže detekovat, zda byl daný produkt již lisován nebo ještě ne. Tento modul existuje také ve variantě Muscle press, kde proces lisování probíhá pomocí umělých svalů a proporcionálního řízení tlaku, kde vytvořená síla je přesně měřená pomocí siloměru.

Aplikační modul otočení

Modul provádí otočení výrobku podél osy pohybu pásu o 180° pneumatickým efektozem. Efektor sjede do spodní pozice, kde se nachází výrobek na paletě, uchopí jej, vyjede zpět do horní pozice, otočí jej o 180° a sjede opět do spodní pozice a položí výrobek na paletu.

3.2 AMR – Autonomní mobilní roboty

Autonomní mobilní roboty AMR jsou dnes nepostradatelnou součástí automatizovaného provozu, jejich nástup a potřebnost urychluje čtvrtá průmyslová revoluce. Mobilní roboty nacházejí svou roli jako skladníci, logistickí a operátoři. Obzvláště důležitá je jejich role v plně automatizovaném provozu, kde se starají o plynulý provoz linek a strojů. Jejich nespornými výhodami jsou nepřetržitý provoz, opakovatelnost, rychlost, přesné načasování, bezpečnost a bezomylnost. Tyto roboty, dle svého pracovního nasazení a plnění úkolů bývají vybaveny dalšími zařízeními. Jako jsou například robotická ramena, častěji koboty, tažná zařízení a nejrůznější zařízení pro transport materiálu.

O mobilní robotiku se zajímají a také se jí věnují nejrůznější přední světoví výrobci průmyslových robotů. Jako jsou KUKA (KMR iiwa, KMR QUANTEC, KUKA flexFELLOW), Stäubli (HelMo), OMRON (LD60, LD90) atd. Dalším výrobcem, který se zaměřuje na průmyslovou automatizaci a této problematice se také věnuje je například FESTO (Robotino), kterému se bude věnovat následující kapitola. Existují samozřejmě firmy, které se na tuto problematiku specializují jedna z největších na trhu je MiR (Mobile Industriel Robots).

3.2.1 Autonomní mobilní roboty KUKA

Německá společnost KUKA se sídlem v Augsburgu je mezinárodní společností působící v oboru automatizace a robotiky. Jak společnost KUKA uvádí, chytrá továrna vyžaduje mobilitu. Proto se také velmi horlivě věnuje vývoji autonomních mobilních robotů. Mezi nimi najdeme například KMR iiwa a KMR QUANTEC, jimž se budou věnovat následující kapitoly.

KMR iiwa

V případě KMR iiwa se jedná o autonomně navigovanou plošinu se schopností převážet kobota (LBR iiwa) na potřebné místo. Jeho konstrukce je modulární, lze vybírat z vícero plošin a součástí. Autonomnost tohoto robotu je zapříčiněna pomocí laserového skeneru, díky které se umí robot pohybovat v prostoru a dokáže reagovat na vzniklé překážky. Robot dále disponuje koly Mecanum, které umožňují otáčení o 360° a všesměrový pohyb. Díky těmto kolům robot dosahuje přesnosti ± 5 mm. Robot je napájen li-ionovými bateriemi. Více parametrů, viz Tab. 1. [43]

Tab. 1: Základní parametry AMR KUKA KMR iiwa [41]

| Parametr | Hodnota |
|--|------------------------------|
| Výška vozu | 700 mm |
| Délka se skenery a bezpečnostními zónami | 1 080 mm |
| Šířka se skenery a bezpečnostními zónami | 630 mm |
| Hmotnost | 390 kg |
| Max. užitečné zatížení | 170 kg / 200 kg bez LBR iiwa |
| Max. rychlost v podélném směru | 3,6 km/h |
| Max. rychlost v příčném směru | 2 km/h |
| Průměr kola | 250 mm |

KMR QUANTEC

Autonomní robot KMR QUANTEC je určený pro velké a přesné aplikace. Jeho součásti jsou velmi variabilní, takže umožňuje řešení přímo na míru. Skládá se z mobilní plošiny omniMove opatřené opět koly Mecanum, robotu KR QUANTEC a řídicího systému. Díky speciálním kolům se může pohybovat všesměrově. Vyniká přesností na ± 5 mm a zároveň velkou nosností až 7 000 kg. Autonomní řízení je umožněno díky laserovým skenerům. Více parametrů, viz Tab. 2.[44]

Tab. 2: Základní parametry AMR KUKA KMR QUANTEC 3 000 a 45 000 [44]

| Parametr | Hodnota 3 000 | Hodnota 45 000 |
|------------------------|---------------|----------------|
| Výška vozu | 415 mm | 650 mm |
| Délka vozu | 2 4000 mm | 7 200 mm |
| Šířka vozu | 1 700 mm | 1 850 mm |
| Hmotnost | 3 000 kg | 15 000 kg |
| Max. užitečné zatížení | 3000 kg | 45 000 kg |
| Max. rychlost | 3,0 km/h | 3.0 km/h |
| Počet kol | 4 | 20 |

3.2.2 Autonomní mobilní roboty OMRON

Autonomní mobilní roboty OMRON se skládají z mobilního vozíku a nástavby, tato nástavba může být kolaborativní robot, dopravníkový pás nebo plošina. Robot si sám vytváří mapu prostředí pomocí několika skenerů a nastaví si body pro nakládání a vykládání materiálu. Polohování je možné až s přesností ± 8 mm. Omron k tomuto

robotu nabízí správce robotické flotily Fleet Manager, který umožňuje optimalizaci vozového parku až o 100 kusech AMR. Více parametrů, viz Tab. 3. [45]

Tab. 3: Základní parametry AMR OMRON LD-60 a LD-250 [45]

| Parametr | Hodnota LD-60 | Hodnota LD-250 |
|------------------------|---------------|----------------|
| Výška vozu | 380 mm | 380 mm |
| Délka vozu | 699 mm | 969 mm |
| Šířka vozu | 500 mm | 720 mm |
| Hmotnost | 62 kg | 148 kg |
| Max. užitečné zatížení | 60 kg | 250 kg |
| Max. rychlost | 1,8 m/s | 1,2 m/s |

3.2.3 Autonomní mobilní robot Stäubli

Autonomní mobilní robot HelMo se skládá z mobilního vozíku a kolaborativního robotu (TX 290). Robot se pohybuje na základě dat získávaných z laserového skeneru. Robot si sebou vozí vlastní nabíjecí konektor, kterým je schopen se připojit k nabíjecí stanici na jakékoliv pracovní pozici. Více parametrů, viz Tab. 4. [46]

Tab. 4: Základní parametry AMR Stäubli HelMo [46]

| Parametr | Hodnota |
|------------------------------------|----------|
| Výška vozu | 1 120 mm |
| Délka vozu | 1 000 mm |
| Šířka vozu | 890 mm |
| Hmotnost včetně robotického ramene | 710 kg |
| Max. rychlost | 0,6 m/s |

3.2.4 Autonomní mobilní roboty MiR

Mobile Industrial Robots je jeden z předních výrobců autonomních mobilních robotů, který se zaměřuje na vývoj AMR pro logistiku. Tyto roboty dosahují poziční přesnosti až ± 10 mm. AMR může být doplněn o nastavbu v podobě zásobníků, regálů, výtahu, dopravníku nebo kolaborativním robotickým ramenem. Identifikaci okolí MiR provádí pomocí několika ultrazvukových senzorů, 3D kamer a dvou laserových skenerů v přední a v zadní části. Více parametrů, viz Tab. 5. [47][48]

Tab. 5: Základní parametry AMR MiR 100 a 1350 [47][48]

| Parametr | Hodnota MiR100 | Hodnota MiR1350 |
|------------------------|----------------|-----------------|
| Výška vozu | 352 mm | 322 mm |
| Délka vozu | 890 mm | 1 350 mm |
| Šířka vozu | 580 mm | 910 mm |
| Hmotnost | 67 kg | 233 kg |
| Max. užitečné zatížení | 100 kg | 1350 kg |

Max. rychlost

1,5 m/s

1,2 m/s

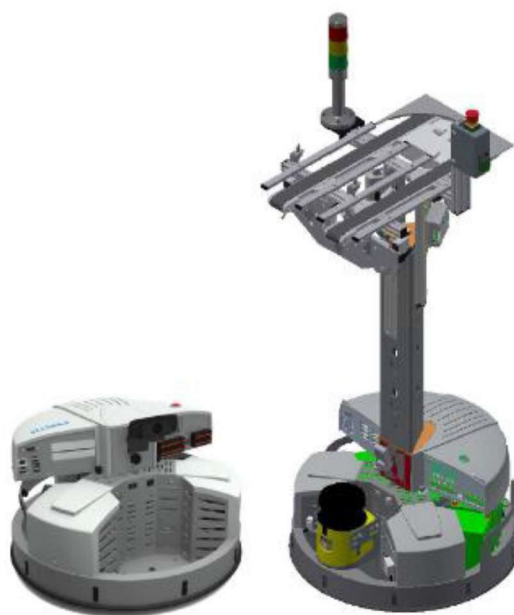
3.2.5 Autonomní mobilní robot Festo

Robotino, od firmy Festo, je autonomní mobilní robot, který je dle nastavby schopen převážet box nebo nosič mezi moduly, viz kapitola 3.1 Kyber-fyzikální továrna, s ním spolupracujícími, vybavené takzvanými doky. Robotino disponuje třemi všesměrovými koly, jejichž DC motory jsou navzájem nezávislé. Díky tomu umožňují Robotino pohybovat se ve dvou osách a otáčet se na místě. Díky sensorům se dokáže pohybovat autonomně a bezpečně. Robotino je vybaveno hned několika senzory. Nárázníkem, který zastaví robota v případě kolize. Senzory vzdálenosti, které by měly této kolize předcházet. Gyroskopem pro přesnější snímání polohy. Kameru Logitech HD Pro Webcam C920, která generuje živý obraz, který lze analyzovat pro navigaci i pro detekci překážek a objektů. Dále je vybaveno dvěma optoelektronickými snímači díky nimž mohou být Robotinem detekovány až dvě barvy povrchů zároveň na základě různých stupňů jejich odrazivosti. Také má Indukční senzor pro řízení dráhy v podobě čáry, který je umístěn pod podlahou Robotina. V neposlední řadě je vybaven laserovým skenerem S30B-2011BA jeho hlavním cílem je zajistit dráhou robotu. To skener zajistí tím, že oskenuje prostor, ve kterém se bude Robotino pohybovat. Na základě tohoto skenu se vytvoří mapa, například v prostředí Robotino Factory, ve které se vyznačí trasy, po kterých se bude Robotino pohybovat a směry, kterými se smí po trasách pohybovat. Skener zároveň během jízdy AMR kontroluje okolí ve směru jízdy. Firma FESTO jejíž AMR Robotino byl vybrán pro tuto práci, vyvíjí tohoto robota zejména pro edukativní účely. Robotino zde bude probráno podrobně a proto mu bude věnována samostatná kapitola, viz kapitola 4 Robotino.

Existuje ještě mnoho dalších autonomních mobilních robotů, respektive jejich výrobců, jako jsou například ABB, Han's Robot atd. Jejich popis není pro další směřování práce relevantní.

4 ROBOTINO

Autonomní mobilní robot Robotino od firmy FESTO, je zařízení určené pro profesionální práci v průmyslu, kde je schopno zastat své úkoly, ať už jako navážecí zboží s vhodnou úpravou dle naváženého materiálu anebo jako operátor v případě jeho doplnění o kolaborativní robotické rameno. Společnost FESTO, která Robotino sestrojila, se také věnuje vzdělávání budoucích špičkových odborníků. Z toho důvodu je Robotino upraveno tak, aby umožňovalo výuku autonomních robotických systému již od velmi útlého věku. FESTO je schopné dodat Robotino téměř v jakékoliv úpravě, dle požadavků zákazníků. Nicméně standardizované varianty, které dodává, jsou základní verze, viz Obr. 11, nebo po úpravě, tak aby byly schopné kooperace se systémy CP-Factory nebo CP-Lab vyvíjených firmou FESTO. Tyto systémy jsou určeny pro výuku Průmyslu 4.0, programování PLC, mechatroniky, průmyslové informatiky, automatizace, robotiky, logistiky, ekonomických a manažerských dovedností. Robotino s nástavbou je uvedeno na Obr. 11.



Obr. 11: AMR Robotino v základním provedení a v provedení s nástavbou [23]

Robotino, jak již bylo zmiňováno, je sestaveno tak, aby jej bylo možné ovládat, řídit a programovat takřka bez nutnosti nějakých speciálních znalostí či požadavků, nebo naopak, aby rozvíjelo komplexní znalosti odborníků a umožňovalo jejich znalosti uplatnit v praxi. Robotino je tedy velice dobrá volba pro oblasti výzkumu a vzdělávání. Samozřejmě záleží na tom, jaké problematice se chceme věnovat a jak hluboce do ní proniknout.

Robotino umožňuje programování hned v několika jazycích a prostředích, jako jsou Java, Python, .NET, C++, Matlab/Simulink, LabVIEW, SmartSoft a ROS. Dále umožňuje práci ve vlastním simulačním prostředí RobotinoSim, kde je možné v plné verzi

vytvářet vlastní prostředí/mapy. Robotino je možné programovat ve vlastním prostředí RobotinoView pomocí grafického jazyka od firmy FESTO.

Pro lepší představu o Robotinu jsou v Tab. 6 uvedeny základní rozměry a parametry Robotina. Robotino, které bude popisováno je, upraveno o nastavbu a také o laserový skener. Tedy o zařízení nutné pro kooperaci s kyber-fyzikálním systémem CP-Factory anebo s něco málo chudší verzí CP-Lab. Jako zdroj napájení zde slouží dvojice 12 V akumulátorů BT 12-9,5 od společnosti EFFEKTA zapojených do série, aby dodávaly potřebných 24 V. Každá baterie disponuje kapacitou 9,5 Ah. [22]

Tab. 6: Základní parametry AMR Robotino [23]

| Parametr | Hodnota |
|---------------------------|---|
| Výška | 450 mm |
| Průměr | 450 mm |
| Hmotnost | 20 kg |
| Baterie | 2 x 700 g |
| Max. užitečné zatížení | 30 kg |
| Ochrana | IP 00 |
| Napětí baterie (kapacita) | 12 V (9,5 Ah) |
| Materiál konstrukce | Nerezová ocel, PA6 |
| Stupně volnosti | 3 (translační ve směru osy x, y a rotační ve směru osy z) |

4.1 Hardwarové vybavení

V této sekci bude uváděno hardwarové vybavení a jeho detailní popis pro Robotino řady 3. Dnes sice existuje řada 4, ale tento model nemáme zatím k dispozici. Proto se tato práce věnuje právě řadě 3. Hardware Robotina bychom mohli rozdělit do čtyř základních sekcí: řízení, pohonné systémy, senzory a rozhraní. Těmto sekcím se bude v dalších kapitolách tato práce věnovat.

4.1.1 Řízení

Jádro Robotino je tvořeno řídicí jednotkou v podobě DPS (deska plošných spojů), která obsahuje integrovaný počítač, mikrořadič a samozřejmě veškerá potřebná a rozšiřující rozhraní.

Integrovaný počítač

Robotino je řízeno integrovaným počítačem SOM-5788 s procesorem Intel Core i5 520E, o výkonu 2,4 GHz a operační paměti RAM o velikosti 8 GB. Počítač disponuje rozhraními jako jsou 6 x USB, sériová linka RS-232, grafický adaptér VGA, 2x standard v podobě sériové systémové sběrnice PCI, USB WLAN adaptér pro připojení k síti WiFi, Ethernet, SSD disk mSATA o velikosti 64 GB a operačním systémem Linux Ubuntu 12.04. [24][25]

Mikrořadič

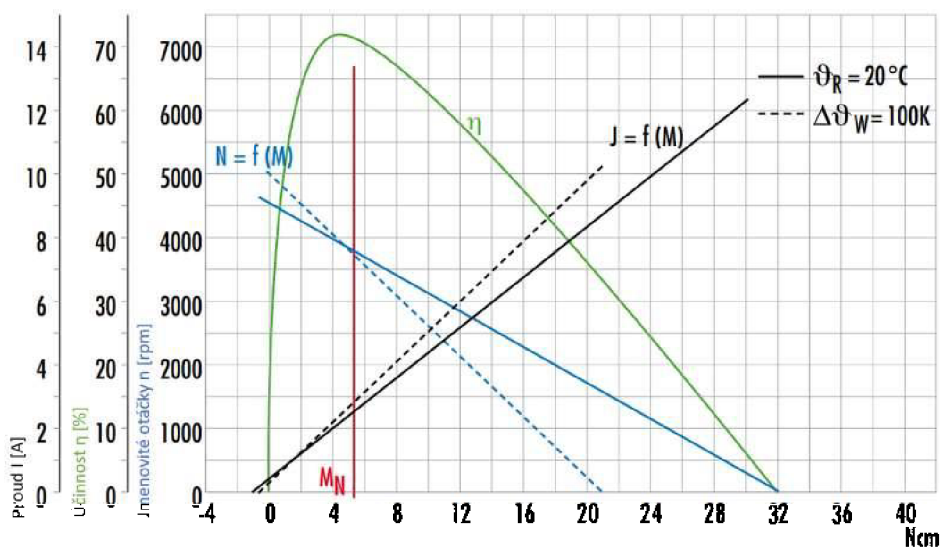
Úkolem 32 bitového mikrořadiče LPC2378 od NXP je řízení motorů a také správa digitálních a analogových vstupů a výstupů. Mimo jiné také sleduje a kontroluje napájecí napětí. Mikrořadič disponuje USB pro připojení k integrovanému PC, konektorem pro ethernet pro ladění v reálném čase, 10 bitovými AD/DA převodníky, 2x sériovým rozhraním RS-232 s tím, že jedno je určeno pro komunikaci s nabíjecí stanicí, sériovou datovou sběrnicí CAN a 4 MHz interním oscilátorem. Paměti, kterými mikrořadič disponuje, jsou SRAM 32 kB, 16 kB pro ethernet a 8 KB pro USB a všeobecné rozhraní. Kromě mikrořadiče se na DPS nachází také programovatelné hradlové pole FPGA čip Xilinx XC3S50A. Který je přes enkodér propojen s motory. Dále disponuje 8 digitálními vstupy a výstupy a dvěma reléovými výstupy. Oba dva systémy disponují JTAG rozhraním. [26][27]

4.1.2 Pohonný systém

Druhou velkou skupinou jsou pohonné systémy. Robotino disponuje všesměrovým pohonem známým pod názvem Omnidrive. Díky tomuto pohonu se může Robotino velice snadno pohybovat všemi směry a otáčet se na místě. Pohon Omnidrive, který je umístěn v podvozku Robotina je tvořen třemi navzájem nezávislými pohonnými jednotkami, které se skládají z motorů, inkrementálního snímače, převodovky a samotných všesměrových kol.

Motory

Robotino má tři všesměrová kola, každé kolo je poháněno jedním ze tří DC motorů GR42x4 od společnosti Dunkermotoren, které jsou na sobě navzájem nezávislé. Na každém motoru je nainstalován inkrementální kodér, který měří jeho úhel natočení. Jak již bylo zmíněno výše, motory jsou řízeny mikrokontrolérem. Napájení těchto motorů je stejnosměrné napětí o velikosti 12 V. S průběžnými otáčkami 3100 ot/min a rozběhovým krouticím momentem 0,33 Nm. Rozběhový proud dosahuje 6 A. Provozní proud se pohybuje okolo 1,2 A. Závislost otáček a krouticího momentu je vidět na Obr. 12. [28]



Obr. 12: Závislost proudu, účinnosti a jmenovitých otáček na krouticím momentu [28]

Inkrementální kodér

Každý motor disponuje jedním inkrementálním kódérem RE 30-2-500 od společnosti Dunkermotoren. Inkrementální kodér dodává řídicí jednotce motoru data, na základě kterých je schopna porovnávat a regulovat skutečné otáčky s těmi požadovanými. Mimo to se tyto hodnoty používají také pro určení polohy Robotina. Inkrementální snímače jsou tvořeny fotodiodami, tudíž nemají žádné mechanické kontakty a nepodléhají opotřebení. Interní logika vytváří na základě výstupu z fotodiod dva obdélníkové průběhy, které jsou navzájem otočené o 90°. Standardní napájecí napětí je pro kodér DC napětí o velikosti 5 V. Snímání je prováděno ve směru a proti směru hodinových ručiček. [29]

Převodovka

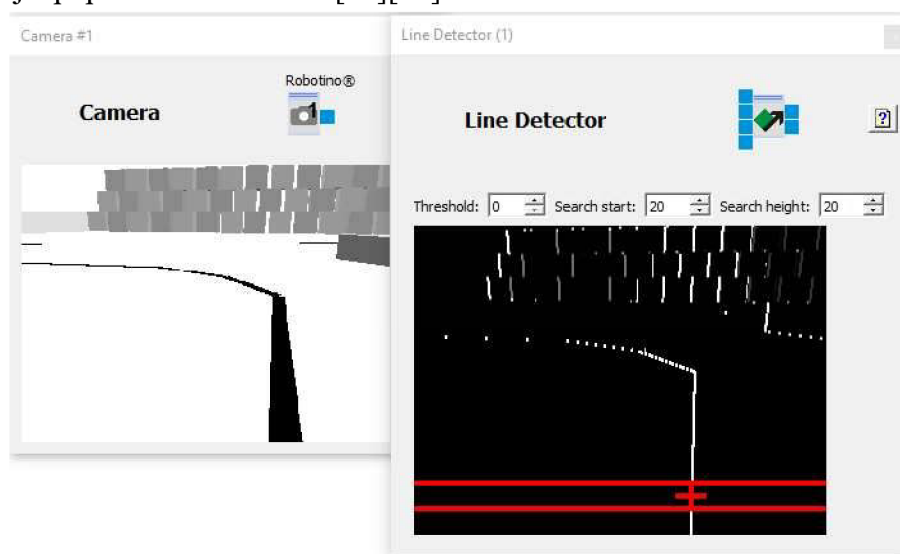
Mezi každým DC motorem a kolem se nachází planetová převodovka PLG 42 S s vysokou účinností 81 % a s převodovým poměrem 32:1. Díky tomu lze Robotino velice přesně ovládat i při velmi malých rychlostech. Průběžný krouticí moment dosahuje až 6 Nm.[30]

Kola

Robotino je osazeno třemi všesměrovými koly omniwheel R3-1258-85 od společnosti Rotacaster Wheel Limited, které mu umožňují pohybovat se ve všech směrech a otáčet se na místě. Každé kolo má své vlastní odpružení a je poháněno vlastním motorem. [31]

4.1.3 Senzory

Robotino je vybaveno hned několika senzory: nárazníkem, který zastaví robota v případě kolize, senzory vzdálenosti, které by měli této kolize předcházet, gyroskopem pro přesnější snímání polohy, kameru Logitech HD Pro Webcam C920, která generuje živý obraz, který lze analyzovat pro navigaci i pro detekci překážek a objektů. Ukázka práce s kamerou a nastavení Robotina pro hledání čáry, je na Obr. 13. Dále dvěma optoelektronickými snímači a indukčními senzory. V následujících kapitolách se nachází podrobnější popis těchto zařízení. [32][33]



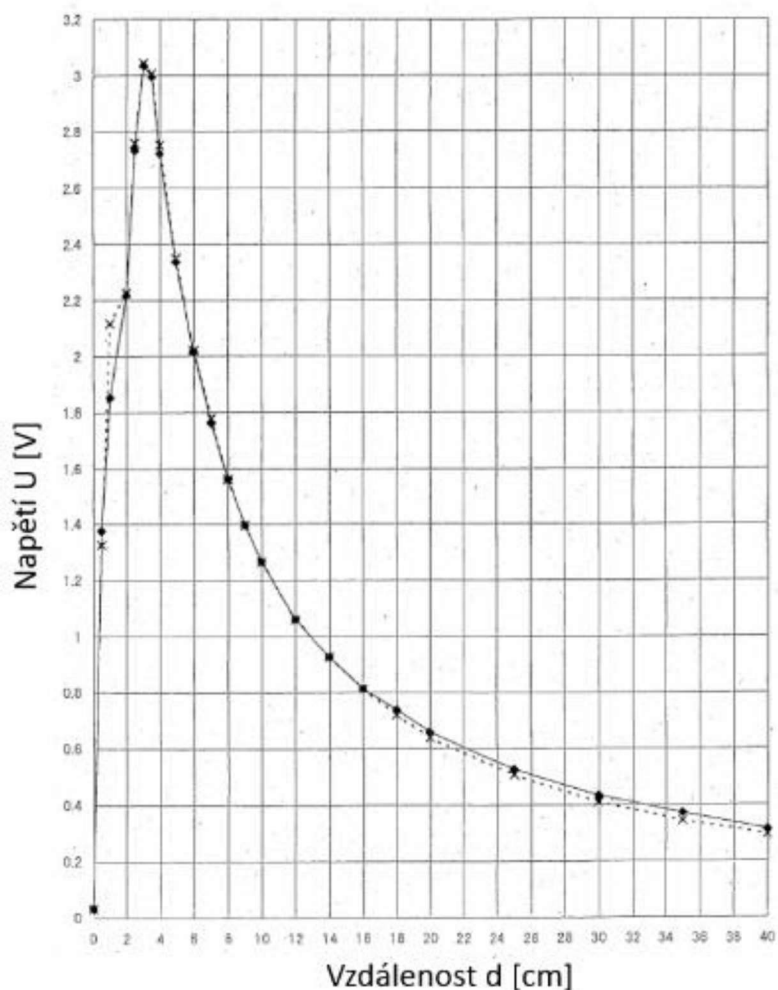
Obr. 13: Ukázka práce s kamerou a nastavení Robotina pro hledání čáry. [ROBOTINO View verze 4.0.4]

Nárazník

Nárazník je bezpečnostní senzor SK EKS011 od společnosti Mayser, který má za úkol zastavit pohyb v případě kolize. Tato funkce je aktivována ve výchozím nastavení. Nárazník je tvořen plastovým profilem s integrovanou spínací komorou. Spínací komora v případě kolize uzavírá elektronický obvod pomocí dvou vodivých ploch, které jsou od sebe odděleny. Tímto spojením je vygenerován signál pro vyhodnocovací jednotku. Protože nárazníkem prochází klidový proud, to je proud, který protéká obvodem i když není aktivní. Tento elektrický obvod se v případě poškození nárazníku přeruší a Robotino to detekuje a zastaví. [34]

Senzory vzdálenosti

Infračervené snímače vzdálenosti GP2Y0A41SK0F umožňují určit vzdálenost v bezprostředním okolí Robotina. Těchto senzorů se na obvodu šasi Robotina nachází celkem 9 v pravidelných intervalech po 40° . Senzory vzdálenosti jsou vždy aktivní. Infračervené snímače jsou schopny reagovat na předměty ve vzdálenosti 4 - 30 cm. Připojují se pomocí tří vodičů, dvou napájecích 5 V DC a jednoho výstupního vodiče se spojitou informací o vzdálenosti v podobě generovaného napětí (4 cm odpovídá 0,4 V a 30 cm odpovídá 2,7 V), na základě vzdálenosti od referenčního bodu. Tato závislost je uvedena na Obr. 14. [35]



Obr. 14: Závislost generovaného elektrického napětí na základě vzdálenosti měřeného objektu. [35]

Gyroskop

Důvod existence gyroskopu MPU-6000 od společnosti InvenSense v repertoáru Robotina je zpřesnění vnímání polohy. Gyroskop bychom našli na základní desce. Není zde nutné jeho uživatelské programování. Komunikace mezi gyroskopem a Robotinem probíhá samovolně, dle předpřipraveného softwaru dokáže Robotino samo přijímat signály z gyroskopu, pokud je připojeno, a zpracovávat data o své poloze. Gyroskop měří úhlovou rychlost na základě zachování momentu hybnosti. Pokud dojde k pokusu otočit rotující objekt kolem jiné osy, než je osa, kolem které se již otáčí, vyvine objekt proti tomuto pohybu opačný moment, čímž zajistí, že celkový moment hybnosti zůstane beze změny. Síly generované tímto točivým momentem se měří v gyroskopu na jeho závěsech. Vzhledem k tomu, že mechanické gyroskopy jsou příliš velké, těžké a zranitelné, byly v posledních letech vyvinuty digitální gyroskopy, které nejsou větší než mince, ale přesto jsou extrémně přesné. [36]

Optoelektronické snímače

Robotino obsahuje dva optoelektronické snímače SOEG-L-Q30-PAK-2L. Díky nim mohou být Robotinem detekovány až dvě barvy povrchů zároveň na základě různých stupňů jejich odrazivosti. Své využití najde zejména ve vyhledávání předmětů určité barvy, pohybu po určité dráze nebo k přesnému zastavení. Optická jednotka senzoru vysílá červené viditelné světlo a snímá stejné světlo po jeho odražení. Na základě přijatého odražené ho signálu vyhodnotí výsledek a odešle jej na řídicí jednotku, prostřednictvím digitálního výstupu. Pomocí tohoto senzoru není možné detekovat postupnou změnu množství odraženého světla. [37][38]

Indukční snímače

Pro řízení dráhy je možné použít také indukční senzor SIEA-M12B-UI-S od společnosti FESTO, který je umístěn pod podlahou Robotina. Indukční snímač přiblížení snímá kovové předměty ve vzdálenosti 0 - 6 mm, na jejichž základě generuje analogový signál podle toho, zda se pohybuje podél středu nebo okraje kovového pásu. Analogovým výstupem v podobě 0 - 10 V nebo 4 - 20 mA. [38][39]

Laserový skener

Laserový skener S30B-2011BA není součástí základní verze, ale je nutnou součástí pro kooperaci s kyber-fyzikálním systémem CP-Factory. Jeho hlavním úkolem je zajistit pojezdovou dráhu robota. To skener zajistí tím, že oskenuje prostor, ve kterém se bude Robotino pohybovat. Na základě tohoto skenu se vytvoří mapa, například v prostředí Robotino Factory, ve které se vyznačí trasy, po kterých se bude Robotino pohybovat a směry, kterými se smí po trasách pohybovat. Skener zároveň během jízdy Robotina kontroluje okolí ve směru jízdy. V případě překážky na trase Robotino může překážku objet. Některé hlavní parametry jsou uvedeny v Tab. 7. [40]

Tab. 7: Parametry laserového skeneru [40]

| Parametr | Hodnota |
|---------------------------|-----------------------------|
| Dosah ochranného pole | 2 m |
| Dosah varovného pole | 15 m (při odrazivosti 15 %) |
| Rozsah měření vzdálenosti | 30 m |
| Úhel skenování | 270° |
| Doba odezvy | 80 ms |

4.1.4 Rozhraní

Robotino je vybaveno nejrůznějším rozhraním pro připojení dalších zařízení pro ovládání, řízení a komunikaci. Mimo jiné se zde nachází další výstup pro čtvrtý motor, schopný dodávat proud až 5 A, zapojený jako H-můstek řízený generovaným PWM signálem. Dále vstup pro příslušný enkodér k případnému čtvrtému motoru, 6 portů USB 2.0 pro připojení WLAN-USB, kamery, joystiku, klávesnice, myši a dalších zařízení. Pokud je potřeba připojit monitor pro vizuální komunikaci mezi Robotinem a uživatelem, je to možné přes výstup VGA. V případě nutnosti je možné navázat přímé spojení s Robotinem prostřednictvím dvou ethernetových portů. Jeden port slouží pro přímé připojení k integrovanému počítači, druhý port slouží k přímému připojení k mikrořadiči. Pro integraci rozšiřujících karet jsou zde dva sloty PCI Express. Další komponenty rozhraní jsou popsány v následujících kapitolách.

WLAN

Robotino je možné ovládat z externího zařízení díky adaptéru WLAN-USB N150 od společnosti NETGEAR. Adaptér je připojen portem USB k řídicí jednotce, která pokud detekuje tento adaptér, spustí webový server, který poskytuje rozhraní pro přístup k řadiči. Díky adaptéru lze prostřednictvím WLAN Robotino zaintegrovat do síťové infrastruktury a umožnit ovládání, konfiguraci a údržbu robotického systému po připojení k mobilnímu telefonu, tabletu nebo notebooku. Stačí se pouze připojit k síti, ve které se nachází Robotino a do Browseru zadat IP adresu Robotina. [41]

Vstupně výstupní rozhraní

Robotino nabízí možnost rozšíření pro další akční členy a senzory, a to prostřednictvím I/O rozhraní. Toto rozhraní se nachází přímo na hlavní DPS. Robotino disponuje jak digitálními vstupy a výstupy, tak analogovými vstupy a reléovým výstupy. V Tab. 8 jsou uvedeny typy pinů a jejich pracovní rozsahy, které se na I/O rozhraní nacházejí. [38]

Tab. 8: Vstupně/výstupní rozhraní [38]

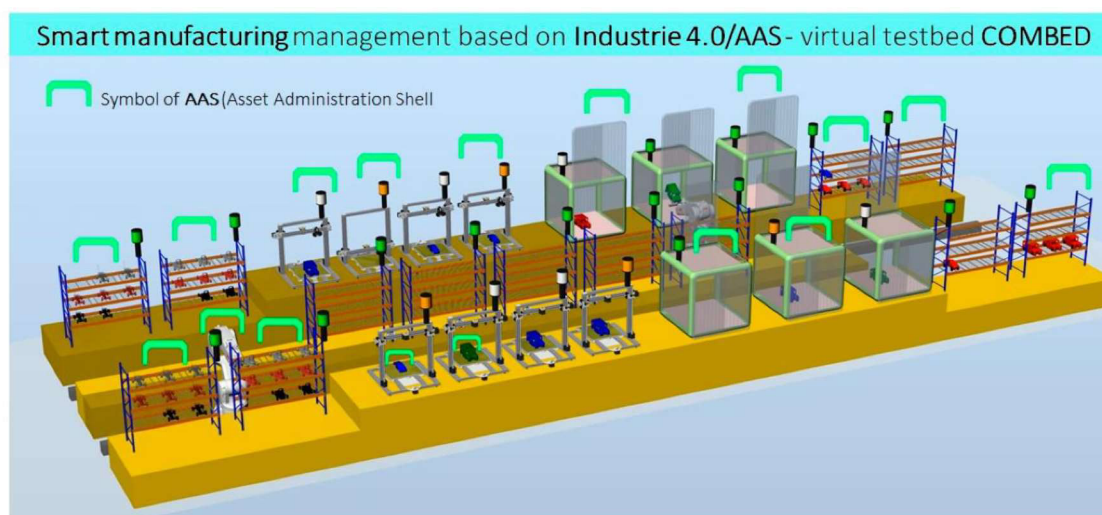
| Parametr | Hodnota |
|-------------|--|
| ID1 ... DI8 | Digitální vstupy, 24 V |
| DQ1 ... DQ8 | Digitální výstupy, 24 V, maximální proudové zatížení 1 A |
| AI1 ... AI8 | Analogové vstupy |
| NO1 ... NC2 | Relé, 24 V |
| +/- | Napájení, 24 V |

4.2 Vývojový SW pro návrh 3D modelu

Součástí Průmyslu 4.0 je také virtualizace, tedy mimo jiné vytváření zanimovaných 3D modelů kyber-fyzikálních systémů. Tyto reálné modely se využívají k testování algoritmů a optimalizaci. V následujících kapitolách bude shrnuto, jaké SW možnosti se dnes nabízejí pro vytváření realistických 3D modelů. Následně bude jeden z nich vybrán pro demonstraci navrhovaného systému s AMR.

4.2.1 RobotStudio

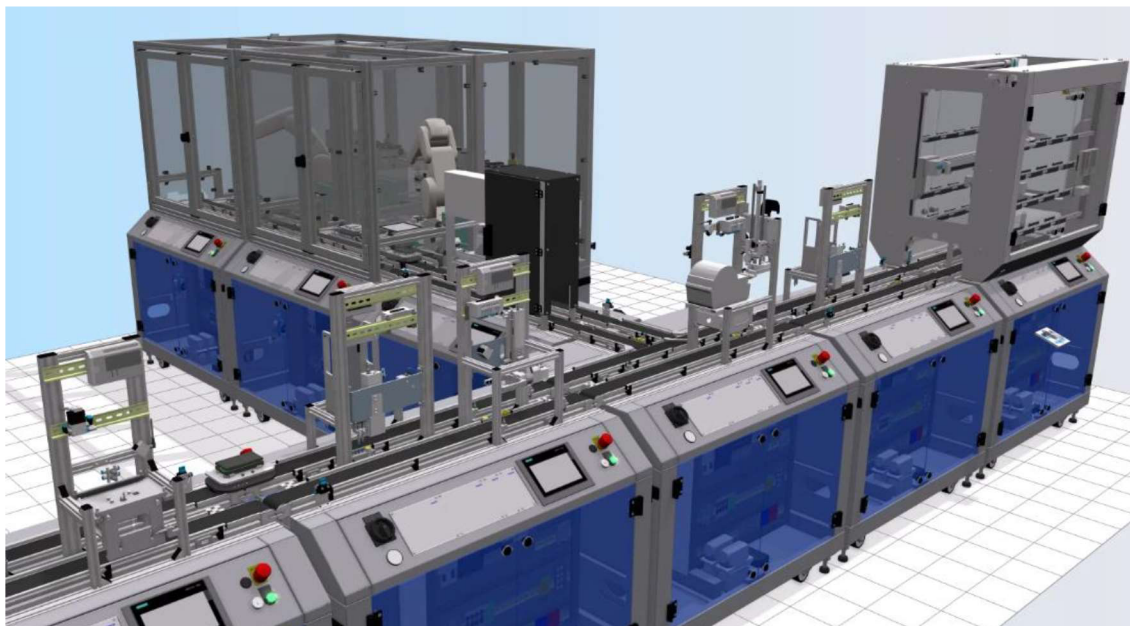
Robot studio vyvinuté společností ABB je SW určený pro modelování, off-line programování a simulaci zejména robotických buněk. Pomocí tohoto SW lze vytvořit přesnou kopii reálného systému a naprogramovat jej s využitím reálných robotických programů pro roboty a AMR a provést simulaci. RobotStudio umožňuje pořádání virtuálních meetingů, vytváření digitálních dvojčat ve formě 3D modelů a podporuje také rozšířenou realitu. Například firma COMPAS v tomto studiu vytvořila svůj vlastní virtuální testbed COMBED, který splňuje požadavky Průmyslu 4.0. Představila jej v rámci mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně v roce 2019, viz Obr. 15. [7]



Obr. 15: Virtuální výrobní testbed COMBED od COMPAS [7]

4.2.2 CIROS

CIROS je SW vyvinutý společností FESTO jehož devízou je modelování, simulace a off-line programování 3D modelů. Disponuje rozsáhlou knihovnou svých vlastních produktů (CP-LAB, CP-FACTORY, MPS, různé robotické buňky atd.), umožňuje kreslení vlastních 3D modelů nebo ožívování předpřipravených modelů ze SW typu CAD. V prostředí CIROS je možné využít již připravené modely a tyto modely programovat, respektive jejich řídicí jednotky přímo z prostředí TIA Portal od Siemens nebo CoDeSys. Na těchto modelech sledovat jejich chování a případně optimalizovat své algoritmy. Dále je možné v případě 3D kyber-fyzikálních modelů v CIROS na těchto modelech spouštět, kontrolovat a optimalizovat výrobu prostřednictvím MES4 od firmy FESTO. SW také umožňuje pohyb AMR Robotino a jeho obsluhu virtuální linky.



Obr. 16: Ukázka výrobní linky v CIROS [CIROS verze 6.4.6]

4.3 MES

Pod zkratkou MES se skrývá Manufacturing Execution Systems tedy Výrobní informační systémy. Jsou to tedy informační a řídicí systémy k provádění výrobních operací. Své uplatnění nachází jako vazba mezi podnikovými informačními systémy, jako je ERP systém a technologickou vrstvou, kde se nachází řídicí systémy PLC a stroje. MES systémy řídí výrobní procesy na základě dat z celého výrobního podniku včetně dat od dodavatelů a to vše v reálném čase. Tento sběr dat napomáhá zaměstnancům odhalovat včas možné problémy a umožňují zaměstnancům správně se rozhodnout v důležitých chvílích. Což má za důsledek zvýšení efektivity výroby. MES systémy mají 11 základních funkcí od správy výrobních postupů a zdrojů, přes řízení, plánování a monitoring výroby, sběr dat až po výkonnostní analýzy. [42]

Základní funkcionality MES systémů byly definovány v modelu MESA-11: [42]

- Sběr dat a archivace
- Správa zdrojů
- Správa lidských zdrojů
- Dispečerské řízení
- Detailní rozvrhování výroby
- Správa dokumentace
- Trasování výroby výrobku
- Výkonnostní analýza v reálném čase
- Správa údržby
- Procesní řízení
- Řízení kvality

4.3.1 MES4 od firmy FESTO

Společnost FESTO vyvinula systém MES pro řízení chytré továrny složené z modulů CP-Lab a CP-Factory, taktéž vyvinuté společností Festo, viz 263.1. Tento MES vystupuje pod názvem MES4. Jak název napovídá, jedná se o MES systém s iniciativou Průmyslu 4.0. MES4 je otevřenou databází, která komunikuje přes TCP/IP prostřednictvím SQL příkazů. Veškerá data o výrobě, materiálu, výrobních plánech a stavu linky jsou ukládány do SQL databáze (MS Access). Velkou výhodou je snadná přenositelnost souboru databáze. Prostřednictvím MES4 během samotné výroby jednotlivé moduly linky s databází velmi často komunikují. Na straně MES4 je vytvořen server pro komunikační protokol linky (MES4 protokol). Na druhé straně komunikace probíhá komunikace s databází pomocí rozhraní ODBC. Komunikace je překládána pomocí hashovací tabulky na SQL dotazy, které odpovídají konkrétnímu commandu MES protokolu. Pomocí těchto příkazů je možné číst a zapisovat do databáze, což provádí například řídicí systém PLC nebo externí programy. Pokud se podíváme na MES4 jako na celek, uvidíme grafické prostředí. Lze jej rozdělit do čtyř hlavních částí: řízení výroby (production control), správa objednávek (Order Management), řízení kvality (Quality Management) a hlavní data (Master Data). [49][50]

Řízení výroby (Production Control)

V této části lze kontrolovat stav výrobní linky. Lze zde najít tři záložky, kdy první Buffers slouží pro přehled stavů jednotlivých zásobníků a skladů, na jednotlivých pracovištích linky. Je možné zde kontrolovat umístění materiálu na přesné pozici na lince a případně tyto stavy editovat. Přidávat, odebírat nebo přesouvat materiál na jednotlivých stanovištích. Druhá sekce Utilities umožňuje kontrolu a editaci materiálu v pohyblivých prvcích, jako jsou boxy, vozíky a palety s materiálem. Třetí sekce slouží pro monitoring stavů Resources, zdrojů. Lze zde sledovat pracovní režim stroje MES/Manual, vytíženost stroje, chyby stroje, IP adresu stroje, ID stroje a aktuální stav připojení. [49][50]

Správa objednávek

V této části se nachází celkem pět bodů, které je možné využívat pro správu objednávek, které se zde zadávají, plánují a kontrolují. První jsou Aktuální objednávky (Current Orders), kde je možné sledovat stav aktuálních objednávek, vše je přehledně barevně odlišeno a ať už se jedná o objednávky čekající, provádějící se nebo dokončené. Nejdeme zde také některé důležité údaje objednávky, PNo číslo dílu (Part Number), OPos pořadí objednávky Order Position, WPNo číslo workplánu, který byl vybrán pro výrobu, plánovaný čas výroby atd. Dále je zde sekce plánovaných objednávek Planned Orders a sekce dokončených objednávek Finished Orders. Jsou zde dvě položky pro zadávání nových objednávek a to New Customer Order nebo New Production Order. [49][50]

Řízení jakosti

V sekci řízení jakosti je možné data, která MES4 shromažďuje a která vykazují kvalitu samotné výroby, vizuálně zobrazovat. Mezi tato data se řadí počty špatně vyrobených kusů, časy začátků operací, časy dokončení operací nebo prostoji mezi nimi. Lze si zde zobrazit také celkovou efektivnost zařízení (OEE). [49][50]

Hlavní data

Tato část umožňuje editaci jednotlivých dílů, Resourcec (zdrojů), jejich operací a následně samotných Workplánů, které je možné z těchto dílčích částí sestavovat. Dále je zde možné přidávat nové zákazníky a provádět jejich editaci. [49][50]

4.3.2 COMES - COMPAS

COMES je MES systém vyvinutý firmou Compas Automatizace ze Žďáru nad Sázavou. Jedná se o výrobní systém, který není nutné instalovat. Lze jej využívat prostřednictvím webového prohlížeče, protože je napsaný ve Visualstudiu .NET. Využívá architektury klient-server, jazyk C#, databáze na SQL serveru. S vyššími vrstvami ERP komunikuje skrze webové služby, XML atd. S nižšími vrstvami, tedy PLC atd. komunikuje pomocí vlastního rozhraní vyvinutého firmou Compas. Jedná se o modulární systém a jednotlivé moduly si může zákazník vybrat sám. Tyto moduly jsou Logon, Historian, Modeller a Batch.[51]

Logon

V tomto modulu je možné provést přihlášení a správu uživatelů. Dále správu vytvořených modelů objektů a výrobní technologie dle mezinárodního standardu. Slouží také pro přístup do ostatních modulů jejich diagnostikování a zálohování dat. [51]

Historian

Modul se stará o sběr a ukládání dat z výrobního procesu. Data lze zobrazovat v přehledných grafech. [51]

Modeller

V modulu Modeller se nachází předpřipravené funkce, které zákazník využije pro přípravu výrobního procesu. Umožňuje modifikaci funkcí COMES a uživatelskou konfiguraci. Lze zde také provádět statistické výpočty či výpočty výrobních ukazatelů. [51]

Batch

Základní stavební kámen COMES. V tomto modulu se vytváří výrobní předpisy, dle kterých se následně vytváří pořadí jednotlivých výrobních procesů. Výrobní předpisy jsou ukládány do knihovny. Od tud je možné vyvolávat a řídit jimi dávkovou výrobu. [51]

COMES obsahuje koncept MES/MOM, což je část určená pro řízení hromadné výroby kusových výrobků programu vyvinutá v Modelleru, Umožňuje ve vlastním editoru namodelovat výrobní linku, nastavit výrobní kroky a určit přechodové podmínky. Výroba se tak řídí přes PLC, které rozhoduje na základě přechodových podmínek o výrobních krocích nebo lze nechat COMES MOM samostatně rozhodovat. V případě automatizovaných pracovišť si výrobek, respektive jeho specifikace, řídí výrobní operace, což splňuje principy a standardy Průmyslu 4.0. [51]

5 NÁVRH LINKY V CIROS

Praktická část je zaměřena na návrh kyber-fyzikálního systému v prostředí CIROS, včetně dopravy materiálu pomocí autonomních mobilních robotů Robotino. Výroba je zadávána prostřednictvím MES4. V následující kapitolách, viz 5.1 Návrh linky v prostředí CIROS a sestavení výrobního plánu v MES4, je popsán návrh virtuální linky v CIROS prozatím bez AMR Robotino.

5.1 Návrh linky v prostředí CIROS a sestavení výrobního plánu v MES4

Na počátku byl stanoven výrobní plán, tedy postup, podle kterého bude daný výrobek vyroben. Tento výrobek musel být také nadefinován. Na Obr. 17 je vidět nadefinovaný výrobek a materiál, který bude na jeho výrobu potřeba. Výrobní plán byl stanoven náhodně s cílem vytvořit kompletní produkt modelu velmi zjednodušeného mobilní telefonu. Požadavkem také bylo, aby výroba započala ve skladu a v tomto skladu také skončila. Nejdříve byla zvolena linka bez autonomní mobilní dopravy. Pro otestování komunikace mezi MES4 a CIROS, samotné funkčnosti programu a práce v něm. Po sestavení výrobního plánu bylo potřeba vytvořit samotný virtuální model linky, viz kapitola 5.1.1 Tvorba virtuální linky v CIROS. Následně byl pro tento model sestaven výrobní plán v prostředí MES4, viz kapitola 5.1.2 Tvorba výrobního plánu v MES4 pro virtuální linku. Celý systém byl otestován simulací.

Výrobní postup byl tedy zvolen takto:

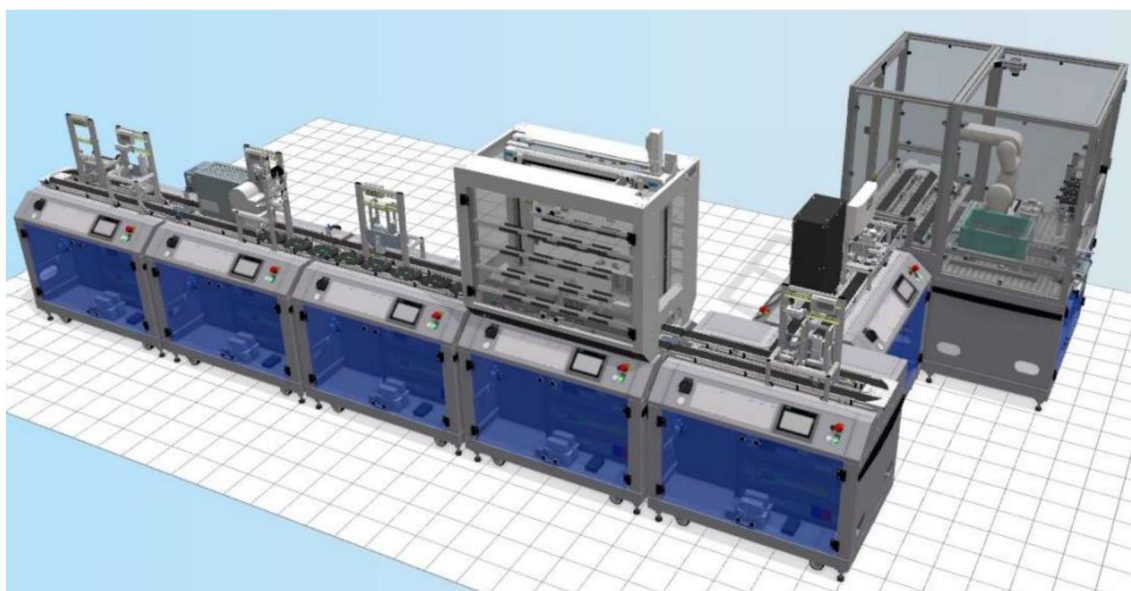
- 1) vyvrtání čtyř otvorů pro šroubky v horním krytu,
- 2) osazení horního krytu plošným spojem a osazení DPS pojistkami,
- 3) následovat by měla kamerová inspekce, zda došlo ke správnému osazení,
- 4) následuje umístění spodního dílu na osazený horní díl,
- 5) zde je důležitý proces zahřátí pro lepší proces slisování,
- 6) poté je potřeba horní a spodní díl zacvaknout do sebe, k tomu je využit lis,
- 7) výrobek je otočený, aby byl správně umístěn ve skladu a označen QR kódem,
- 8) následuje tedy označení výrobku v podobě štítkování na svrchní stranu výrobku.

| Part | Quantity |
|---|----------|
|  25 pallet | 1 |
|  110 front cover black raw | 1 |
|  111 back cover black | 1 |
|  120 PCB | 1 |
|  130 fuse | 2 |

Obr. 17: Nadefinovaný výrobek a uvedený potřebný materiál pro jeho výrobu

5.1.1 Tvorba virtuální linky v CIROS

Pro vytváření virtuální výrobní linky, byly vybrány modely CP-Facotry, viz kapitola 3.1 Kyber-fyzikální továrna, které umožňovaly splnit výrobní plán. Moduly byly do výrobní linky poskládány tak, aby co nejvíce korespondovali s výrobním plánem, viz Obr. 18. Moduly jsou tedy poskládány v pořadí uvedeném v pracovním plánu. Najdeme zde aplikační moduly, jako jsou sklad ASR32, vertikální sklad předních dílů, vrtání, robotickou buňku sestavení, kamerovou inspekci, vertikální sklad zadního dílu, ohřev v podobě protahovací pece, lisování, modul otočení a štítkování. Aplikační moduly jsou vesměs umístěny na moduly pásových dopravníků, z nichž jeden je opatřen odbočovací pásem. Je to jednak z důvodu lepšího přehledu linky na monitoru jednak z důvodu vyzkoušení více typů modulů s dopravníky. U modulu s odbočkou lze nastavit jeho průchodnost. V tomto případě je nastavena na 100 %, tedy vše projde, respektive odbočí doprava. Na lince je umístěno 10 nosičů opatřených RFID čipy. Po sestavení výrobní linky, bylo potřeba vytvořit konkrétní výrobní plán v MES4, viz kapitola 5.1.2 Tvorba výrobního plánu v MES4 pro virtuální linku.

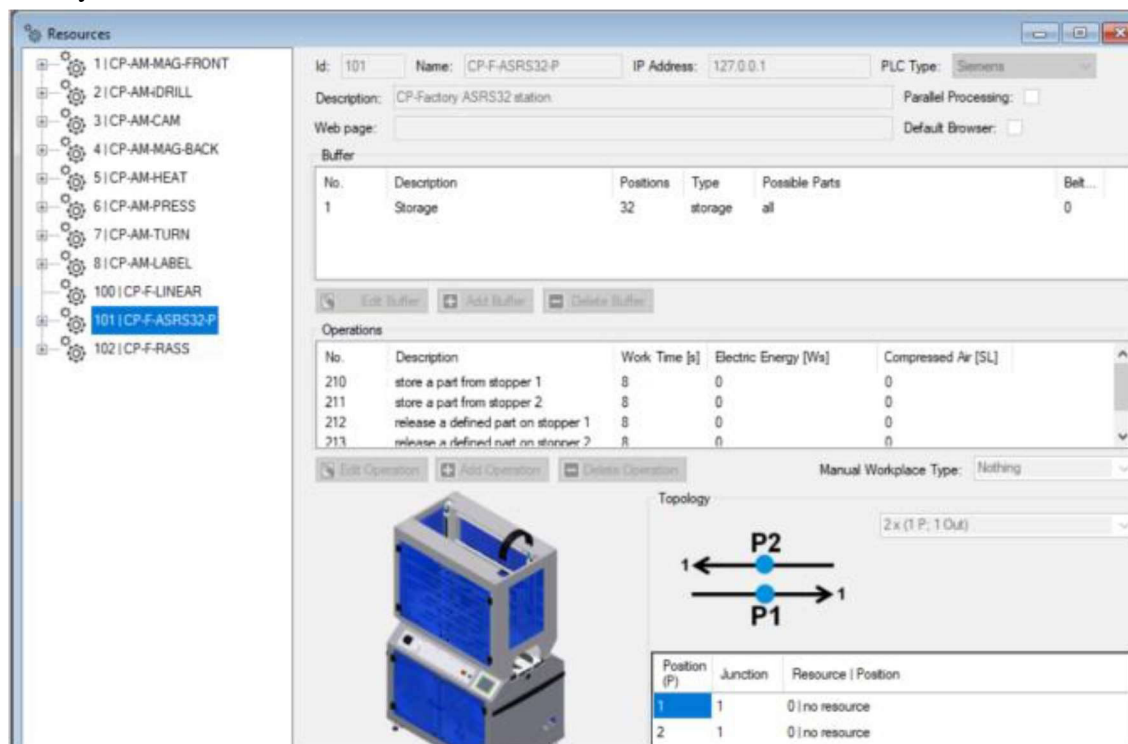


Obr. 18: Model výrobní linky [CIROS Studio]

5.1.2 Tvorba výrobního plánu v MES4 pro virtuální linku

Pomocí SW MES4 byl sestaven výrobní plán. Nejdříve bylo nutné vytvořit si zdroje, v sekci Resources, nadefinovat je a přiřadit jim výrobní operace, které budou zdroje provádět, viz Obr. 1. U každé zdroje bylo nutné nastavit IP adresu a identifikační číslo pro identifikaci v CIROS. IP adresa byla nastavena u všech zdrojů na 127.0.0.1, což je lokální IP adresa CIROS. Tento způsob vytváření výrobního plánu lze označit za nejslabší místo celého výrobního procesu. Přestože lze pomocí MES4 sestavit výrobní plán z dílčích částí jako jsou parametrizovatelné výrobní operace, ať už se jedná o vrtání, ohřev, lisování atd. je vždy nutné nastavit konkrétní aplikační modul, na kterém se daná operace provede dle IP a ID aplikačního modulu. Nelze tedy provést rozhodování ze

strany výrobku o jakou operaci má zájem, a hlavně na jakém aplikačním modulu. Výrobek musí striktně dodržovat výrobní plán. Z tohoto tvrzení vyplývá, že MES4 není schopen dynamického přidělování aplikačního modulu. Což je v rozporu s filozofií Průmyslu 4.0.



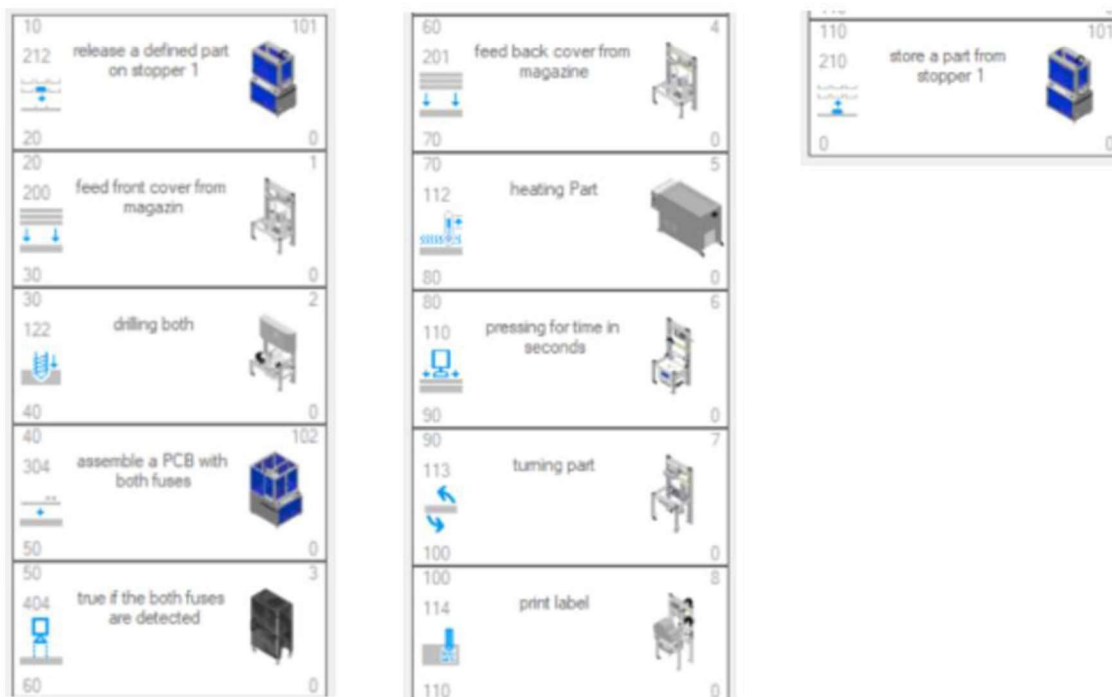
Obr. 19: Vytváření zdrojů v sekci Resources

Výrobní plán byl sestaven následujícím způsobem. Bylo vycházeno z původního návrhu výroby, viz kapitola 5.1 Návrh linky v prostředí CIROS a sestavení výrobního plánu v MES449:

- 1) sklad - vyskladnění palety na nosič,
- 2) vertikální sklad horního dílu - umístění horního dílu na paletu na nosiči,
- 3) vrtání - vyvrtání čtyř otvorů pro šroubky v horním krytu,
- 4) robotická buňka - osazení horního krytu plošným spojem a osazení DPS dvěma pojistkami,
- 5) kamerová inspekce - kontrola správného osazení,
- 6) vertikální sklad spodního dílu - umístění spodního dílu na osazený horní díl,
- 7) ohřev – 80 ° po dobu 5 minut,
- 8) lisování – spojení horního a spodního krytu,
- 9) otočení – z důvodu správného umístění ve skladu a označení QR kódem z horní strany výrobku,
- 10) štítkování – nalepení štítku s QR kódem na svrchní stranu výrobku,
- 11) sklad – naskladnění hotového výrobku.

Sestavený výrobní plán je uveden na Obr. 20. Je zde vidět posloupnost operací po krocích označených čísly 10, 20, 30, až 110 tedy sklad – sklad. U každého kroku je nutné

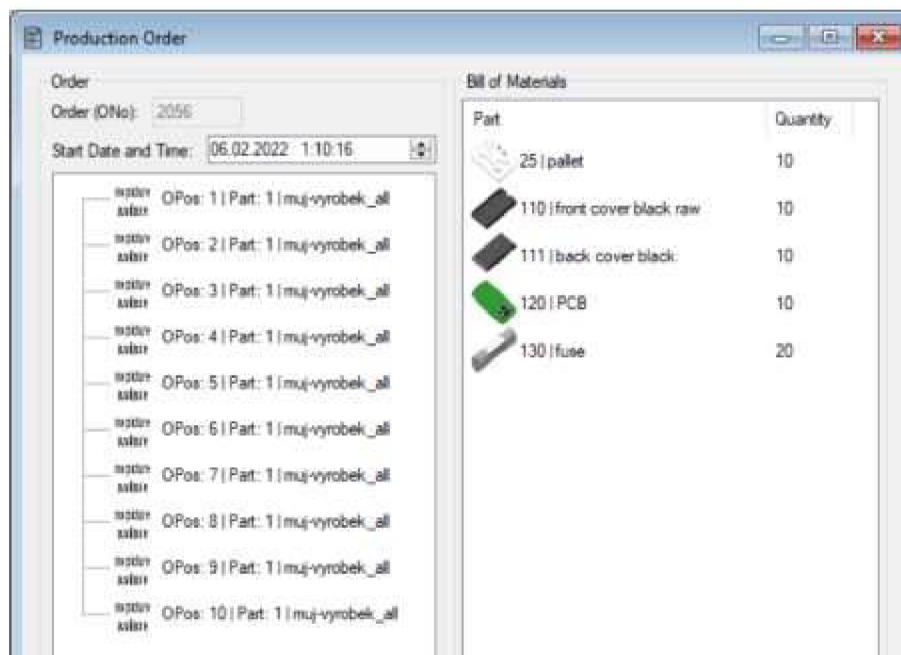
nastavit, jaký zdroj bude operaci vykonávat, jaká operace se bude vykonávat, jaký materiál je k této operaci potřeba a případně další parametry jako teplota, čas atd.



Obr. 20: Sestavený výrobní plán v MES4 pro výrobu v CIROS

Samotné zadávání objednávky probíhá následovně, nejprve je nutné spustit simulaci modelu kyber-fyzikálního systému v CIROS. Před samotným spuštěním výroby je nutné zkontrolovat sklad virtuální linky a případně je doplnit o prázdné palety v tomto konkrétním případě výroby bude potřeba 10 palet, poněvadž bude spuštěna výroba 10 výrobků. Dále je potřeba zkontrolovat modul robotické buňky, která obsahuje box s deskami plošných spojů. Zda skutečně disponuje tímto boxem a jestli je box naplněn potřebným počtem kusů DPS, popřípadě jej doplnit. Aplikační moduly s vertikálními zásobníky se v simulaci doplňují sami.

Samotná objednávka lze provést téměř na jedno kliknutí, viz Obr. 21. Vybere se příslušný výrobek, u něj se navolí počet požadovaných kusů a spustí se výroba. Spuštění lze provést okamžitě, nebo naplánovat na určitou dobu. Lze takto tedy navolit postupné spouštění několika typů výrobků a výrobních plánů na určitý čas.



Obr. 21: Spuštění výroby zvoleného produktu a navolení počtu kusů

Sledovat samotnou výrobu lze několika způsoby. Při spuštění simulaci v CIROS lze v MES4 kontrolovat stav jednotlivých zdrojů jejich konektivitu, vytížení nebo chyby, jak je uvedeno na Obr. 21.

| Picture | ID | Name | MESMode | AutomaticMc | ManualModk | Busy | Reset | ErrorL0 | ErrorL1 | ErrorL2 | IP | Connected |
|---------|-----|--------------|---------|-------------|------------|------|-------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| | 1 | CP-AM-M... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 2 | CP-AM-D... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 3 | CP-AM-CAM | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 4 | CP-AM-M... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 5 | CP-AM-HE... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 6 | CP-AM-PR... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 7 | CP-AM-TU... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 8 | CP-AM-LA... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 100 | CP-F-LINE... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 101 | CP-F-ASR... | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |
| | 102 | CP-F-RASS | | | | | | | | | 127.0.0.1 | |

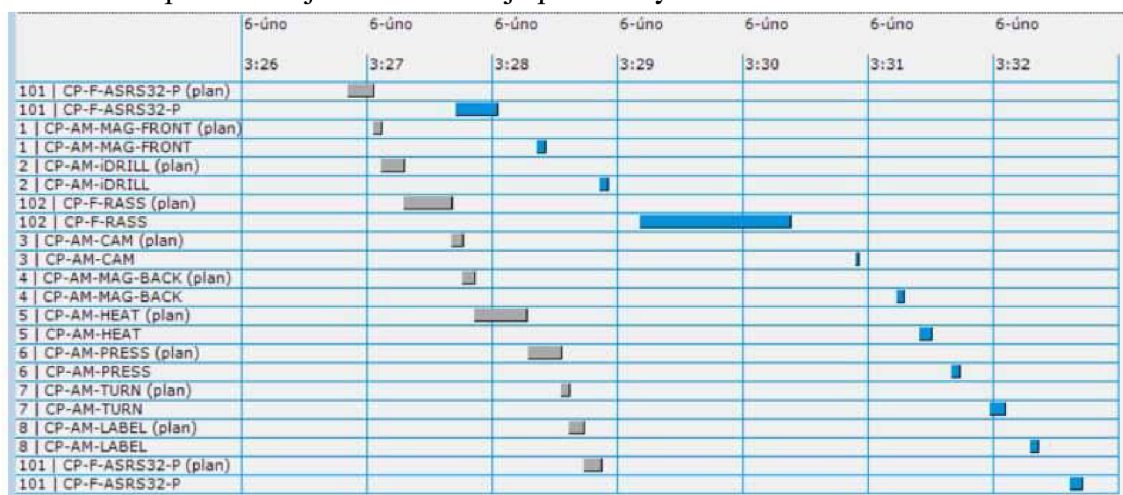
Obr. 22: Monitoring virtuální linky skrze MES4

Další způsob je možnost využít záložku Current Orders – Aktuální objednávky v sekci správa objednávek, viz Obr. 23. Zde je barevně odlišeno, zde daná operace právě probíhá (žlutá), je provedena (modrá), zda vznikla chyba (červená) nebo zda objednávka čeká (bílá). Chybou může být překročený nastavený časový limit nebo zjištěné špatné osazení kamerovou inspekcí.

| Order No. | Customer | Planned Start | Start | State | Next Resc. |
|-----------|------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|-------------|
| 2056 | No Company | 06.02.2022 1:10:16 | 06.02.2022 2:13:25 | RDY | CP-F-LINEAR |
| OPos: 1 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:13:25 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 2 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:13:53 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 3 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:14:17 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 4 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:14:43 | State: BUSY | Next Resc.: CP-AM-HEAT | |
| OPos: 5 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:19:19 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 6 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:19:43 | State: PEND | Next Resc.: CP-F-RASS | |
| OPos: 7 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:20:06 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 8 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:20:31 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 9 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:20:58 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |
| OPos: 10 | Order: muj-vyrobek_all | Start: 06.02.2022 2:21:23 | State: RDY | Next Resc.: CP-F-LINEAR | |

Obr. 23: Sledování stavu aktuální objednávky

U každého výrobku si lze otevřít detailní výrobní cyklus. Na Obr. 24 jsou uvedeny šedou barvou plánované časy výroby a modrou barvou skutečné časy výroby. Například na Obr. 24 je vidět, že v případě vybraného výrobku na pracovišti CP-F-RASS, což je modul robotické buňky sestavení, trvala pracovní operace nejdéle. Několikanásobně déle než ostatní operace a zejména déle než je plánovaný čas osazování.

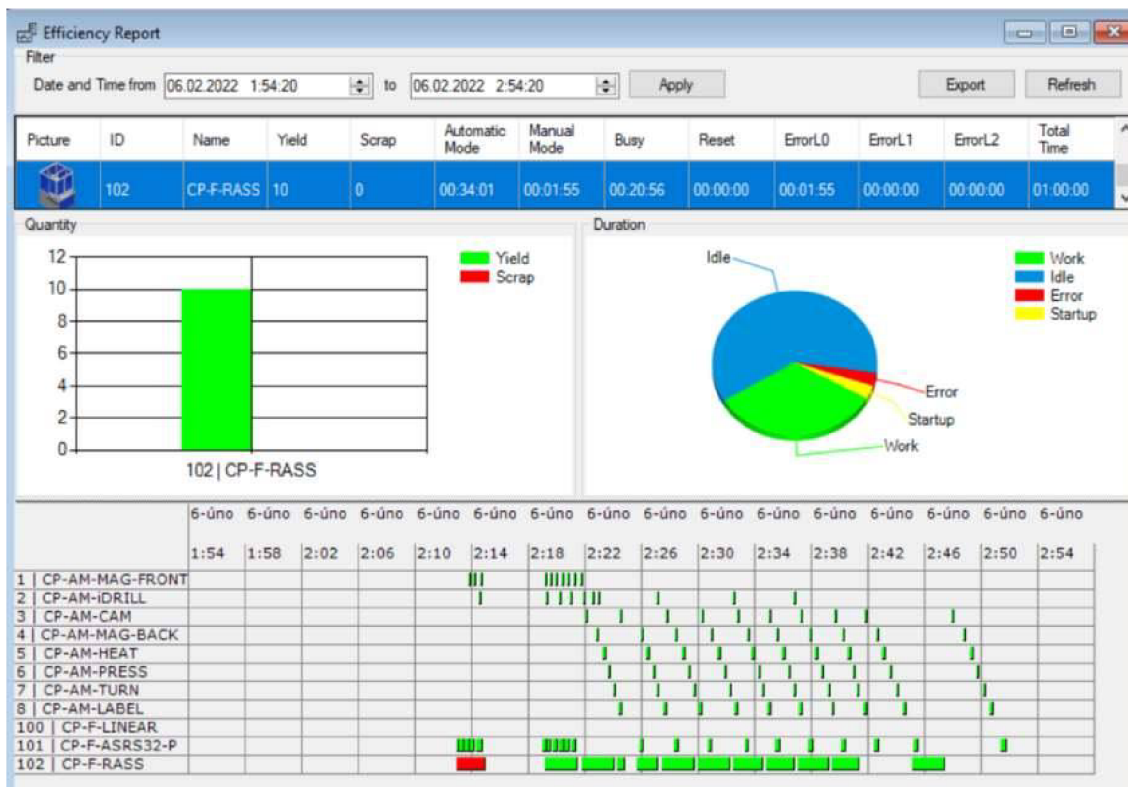


Obr. 24: Výrobní cyklus jednoho vybraného výrobku

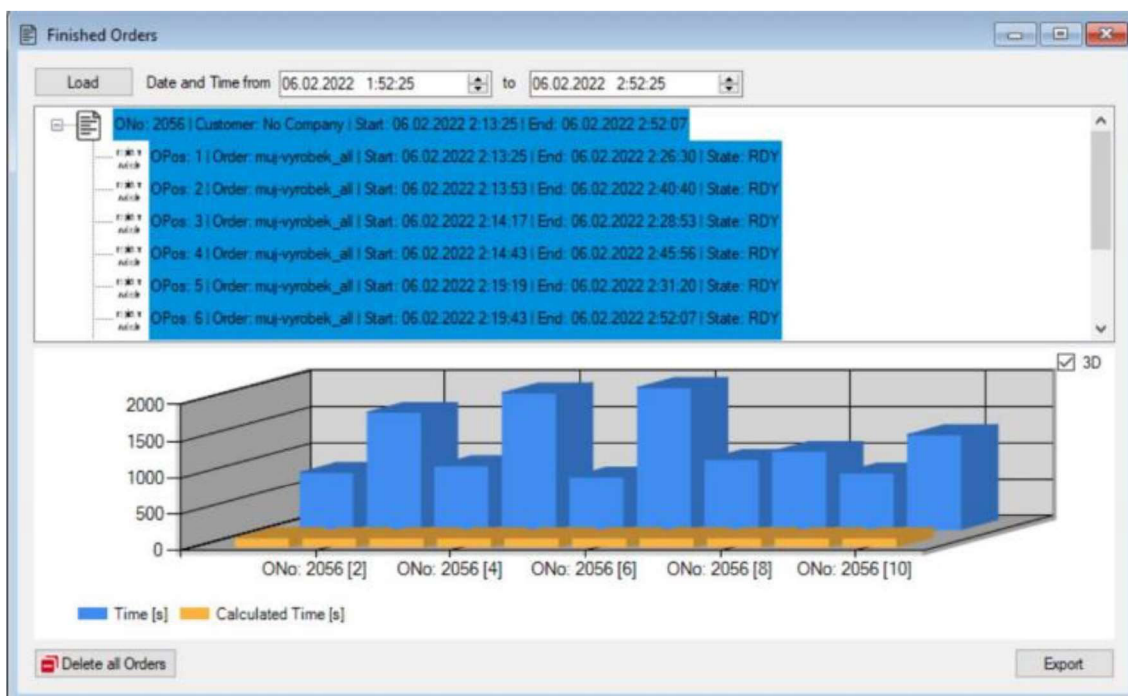
Pro sledování výroby lze využít také záložku řízení jakosti. Zde lze vybrat graf pro sledování efektivity, chybovosti a časového cyklu výroby z pohledu celé zakázky, viz Obr. 25. Na Obr. 25 je vidět že nejdelší časový úsek celého cyklu výroby tráví výrobek na pracovišti robotické buňky osazování, respektive čekáním na tuto operaci.

V případě hotové zakázky si lze zobrazit opět v záložce řízení jakosti v kartě dokončené objednávky data o této zakázce, které lze vyexportovat ve formátu CSV, jak je uvedeno na Obr. 26.

Poslední možností je sledovat výrobu přímo v databázi skladu, viz Obr. 27. Zde může být vidět plnění polí k tomu určených, kdy se na paletách objevuje hotový materiál na příslušném místě ve skladu. Případně lze sledovat celou výrobu přímo na virtuální lince v CIROS, viz Obr. 28.



Obr. 25: Sledování efektivity, chybovosti a časového cyklu celé výroby.

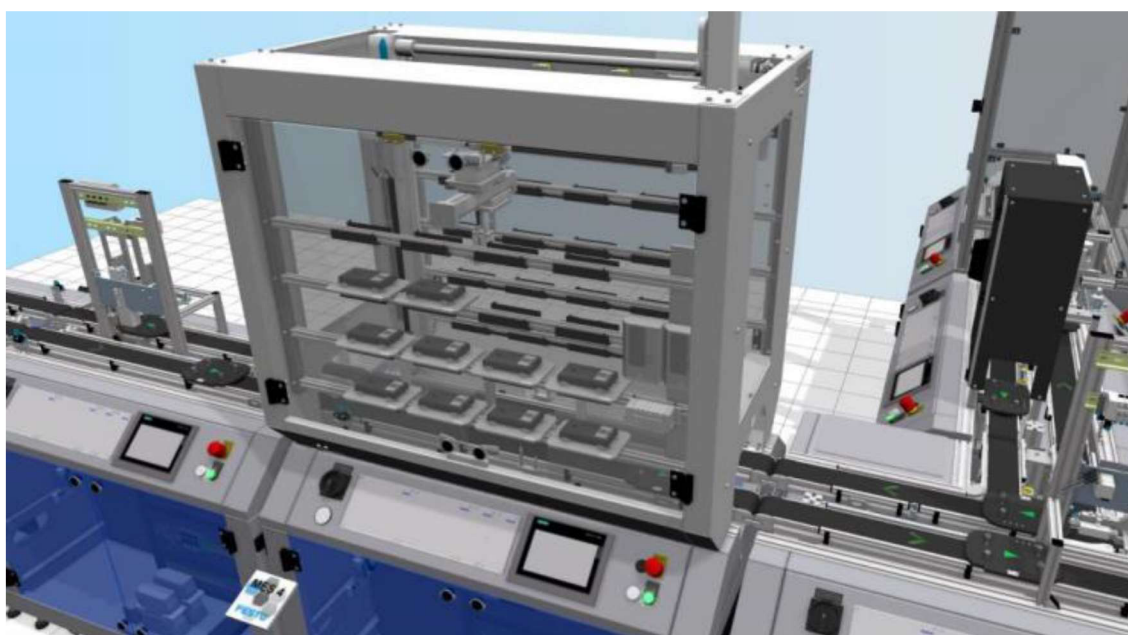


Obr. 26: Sledování dat již dokončených zakázek



| BufPos | PNo | Description | ONo | OPos | Time Stamp | PalletID | BoxID | Image |
|--------|------|------------------|-----|------|--------------------|----------|-------|---|
| 1 | 1214 | black both fuses | 0 | 0 | 06.02.2022 5:09:46 | 0 | 0 |  |
| 2 | 1214 | black both fuses | 0 | 0 | 06.02.2022 5:13:09 | 0 | 0 |  |
| 3 | 1214 | black both fuses | 0 | 0 | 06.02.2022 5:14:05 | 0 | 0 |  |
| 4 | 1214 | black both fuses | 0 | 0 | 06.02.2022 5:15:18 | 0 | 0 |  |
| 5 | 1214 | black both fuses | 0 | 0 | 06.02.2022 5:16:31 | 0 | 0 |  |

Obr. 27: Sledování obsazení skladových míst



Obr. 28: Vyobrazení umístění hotových výrobků ve skladu po dokončení zakázky

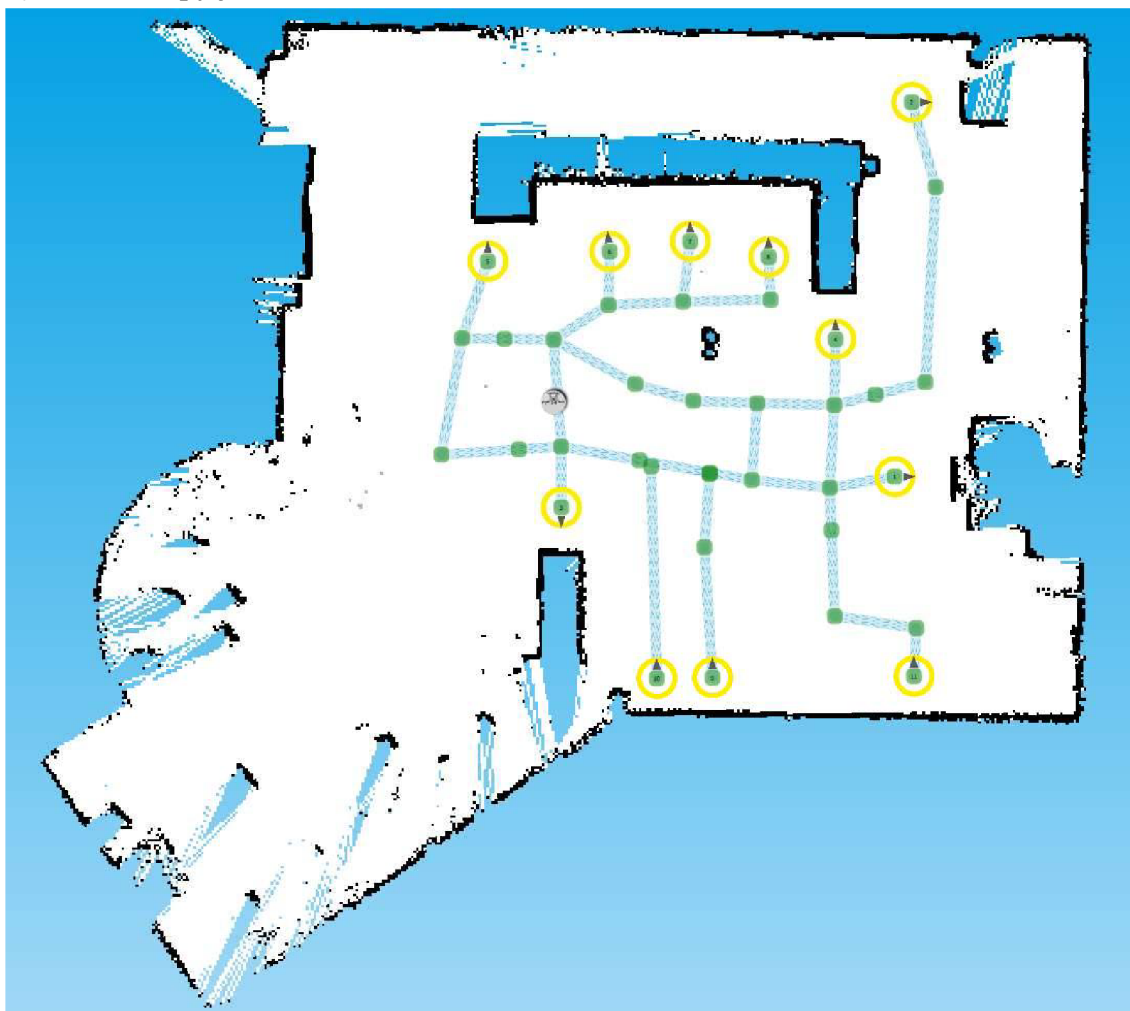
Na základě zjištěných dat, byla linka upravena tak, aby nedocházela k takovému časovému prodlení na modulu robotické buňky a lepší návaznosti jednotlivých aplikačních modulů dle výrobního plánu. V rámci optimalizace byl přesunut sklad, před který byl umístěn vertikální sklad s horními díly. Vedle modulu robotické buňky byla umístěna ještě jedna totožná robotická buňka. Od té bylo slibováno výrazné zkrácení času výroby, protože operace na tomto pracovišti trvala násobně déle než na ostatních operacích cca 4 minuty. Modul robotické buňky disponuje odbočkou a vlastním pásem, na kterém mohou až tři výrobky čekat na osazení. Celkový čas výroby byl před úpravou 34 minut, po optimalizaci linky byla výroba zrychlena o 20 minut. Optimalizovaný výrobní plán byl bez problémů testován na fyzické lince. Získané výsledky nemá smysl detailně porovnávat s výsledky ze simulace, vzhledem k tomu, že umístění jednotlivých modulů a aplikací je rozdílné oproti namodelované verzi v CIROS. Samotná reálná výroba trvala déle i s ohledem na absenci druhého fyzického modulu robotické montážní buňky.

6 NÁVRH LINKY S AMR ROBOTINO

Vprostřed CIROS byla vytvořena linka, které obsahovala kromě kyber-fyzikálního systému také AMR Robotino. Robotino se stará o doplňování potřebného materiálu na linku. V následujících kapitolách je popsáno, jak je nutné postupovat v případě návrhu jak virtuálního modelu kyber-fyzikálního systému v CIROS, tak při fyzické výrobě.

6.1 Mapování pomocí Robotino

V případě návrhu automatické dopravy pro doplňování materiálu je nutné nejdříve vytvořit mapu prostředí, kde se bude Robotino pohybovat. Tuto mapu lze vytvořit přímo pomocí AMR Robotino, který disponuje laserovým skenerem k tomuto účelu určeným, viz 4.1.3 Senzory. Festo pro tyto účely vyvinulo SW nástroj zvaný Robotino Factory. Ukázka vytvořené mapy je na Obr. 29.



Obr. 29: Mapa Robotino vytvořená v aplikaci Robotino Factory

K aplikaci se Robotino připojí pomocí IP adresy, v našem případě se jedná o 172.21.14.90. Pro samotné vytvoření mapy je potřeba nejdříve pomocí skeneru projet všechna zákoutí místa, kde se bude Robotino pohybovat. Robotino lze ovládat pomocí

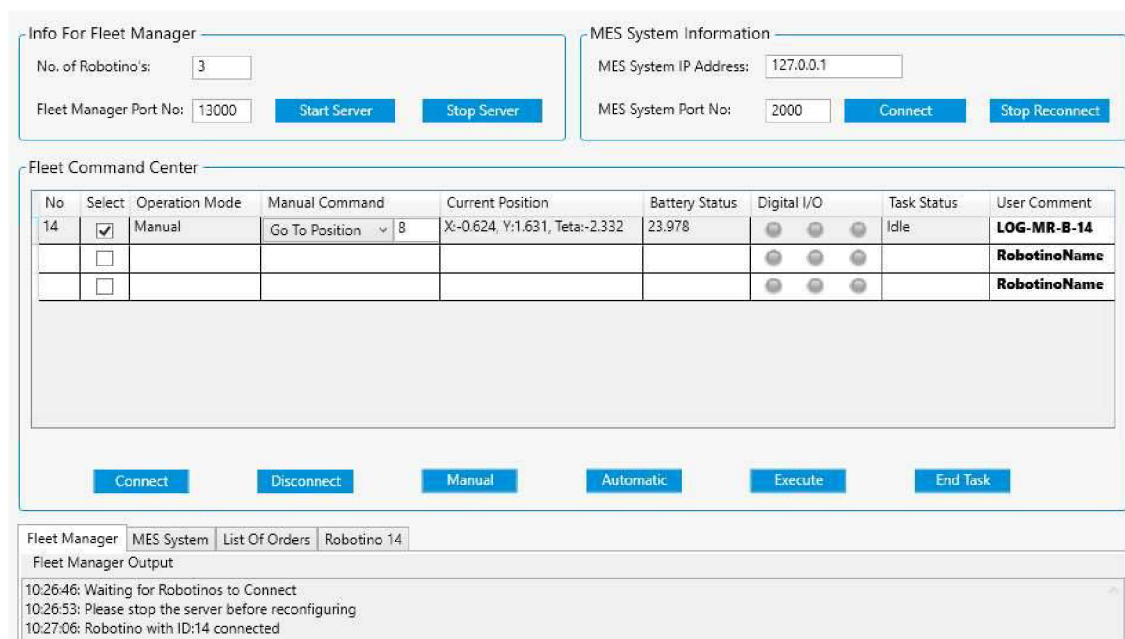
bezdrátového joysticku. Program pro joystick lze vytvořit například v programu RobotinoVIEW, viz kapitola 6.3 RobotinoView. Po naskenování mapy se v mapě vyznačí body. Mezi těmito body se naznačí trasa, po které se bude Robotino pohybovat. U této trasy lze povolit pohyb Robotina jedním směrem nebo oběma směry. Body se vyznačují například před dokovacími stanicemi nebo u dobíjecích stanic, kam Robotino samo odjede, pokud napětí na bateriích klesne pod určitou hodnotu. Na Obr. 29 je uvedena mapa místnosti, ve které je umístěna kyber-fyzikální továrna, tato mapa byla vytvořena za účelem fyzického testu linky s AMR. Vyznačené body je nutné přenést do Fleet Manageru, viz kapitola 6.2 Fleet manager.

6.2 Fleet manager

Fleet Manager je aplikace od Festo, které působí jako prostředník mezi Robotinem a MES4 systémem. Komunikační port Fleet Manageru je nastaven na hodnotu 13 000. MES4 je dostupný na IP adrese 127.0.0.1 a komunikačním portu 2000. Lze nastavit v MES4. Je zde také nastaven počet Robotin, které budou k Fleet manageru připojeny. V aplikaci Fleet Mangeru je možné nastavit jednotlivé pozice vyznačené v Robotino Factory. Každý bod je definován prostřednictvím ID pozice, ID zdroje v MES a jeho označení. Lze zde také rozlišit, zda se jedná o dock pro stanici či nabíjecí stanici, viz Obr. 30. V Command Centru Fleet Manageru v případě připojení Robotina je zobrazeno ID Robotina, operační mód (auto/manuál), aktuální pozice (x, y a úhle theta), aktuální hodnota napětí baterie, digitální I/O, aktuální stav vyvolaného úkolu, jméno Robotina a command pro výběr příkazu pro manuální ovládání, viz Obr. 31.

| Position ID | MES ID | Position Tag | Package flow | Default station | Manual Pose | Parking Pose | Charging Pose | Package Type |
|-------------|--------|----------------|--------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1 | 11 | CP-F-ASRS20-B | In/Out | <input checked="" type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 2 | 12 | CP-F-BUF-B | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 3 | 13 | CP-F-BUFROBM-B | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 4 | 2 | CP-F-BUFROB-B | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 5 | 6 | CP-F-RASS | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 6 | 990 | Parking-1 | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 7 | 991 | Parking-2 | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 8 | 992 | Parking-3 | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box |
| 9 | 993 | Charging-1 | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Box |
| 10 | 994 | Charging-2 | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Box |
| 11 | 995 | Charging-3 | In/Out | <input type="radio"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Box |

Obr. 30: deklarace bodů pro Robotino ve Fleet Manageru



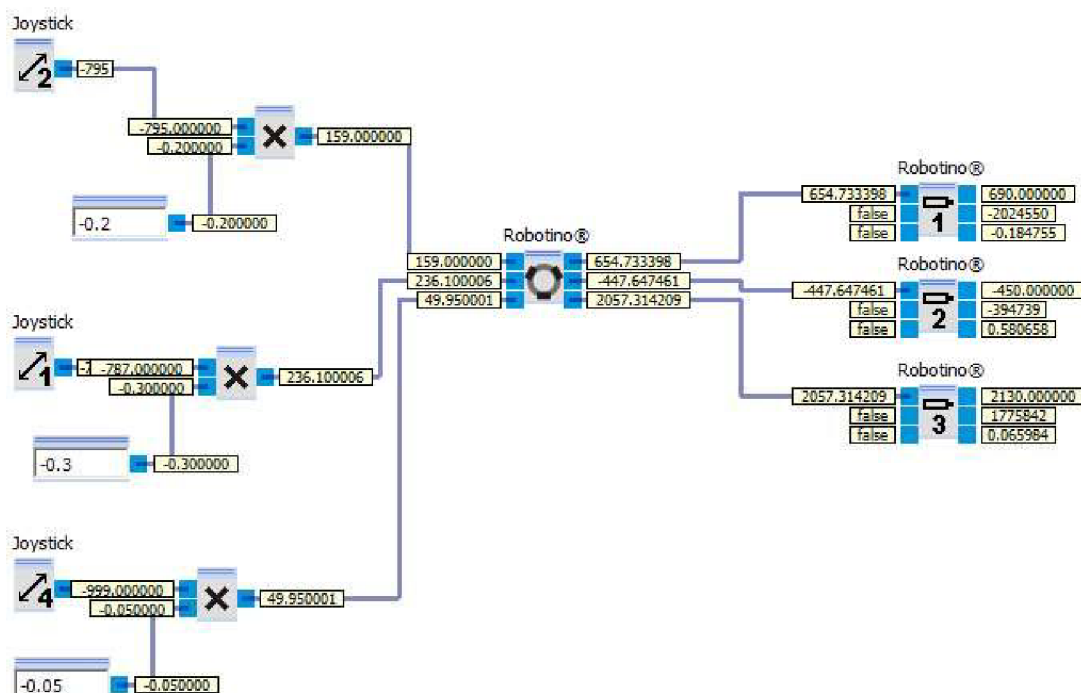
Obr. 31: Command Centrum pro zadávání příkazů pro Robotino

Mezi příkazy, které lze v Command Centru zadávat patří například:

- GoToPosition X – jed' na pozici, Robotino se přesune na pozici X vyznačené v mapě, k samotnému pohybu využívá vytvořenou mapu v robotino Factory,
- DockTo – Pokud Robotino zastaví v bodě, který je uveden u dockovací stanice pomocí tohoto příkazu se zadockuje,
- Undock – tento příkaz Robotino přesune z pozice v docku do pozice u docku, tedy bod vyznačený v mapě,
- LoadBox – pomocí tohoto příkazu Robotino převezme box v docku u stanice,
- UnloadBox – pomocí tohoto příkazu Robotino odevzdá náklad tedy box,
- DockToCharger- Robotino se připojí na nabíjecí stanici,
- Undock Charger – Robotino se odpojí od nabíjecí stanice.

6.3 RobotinoView

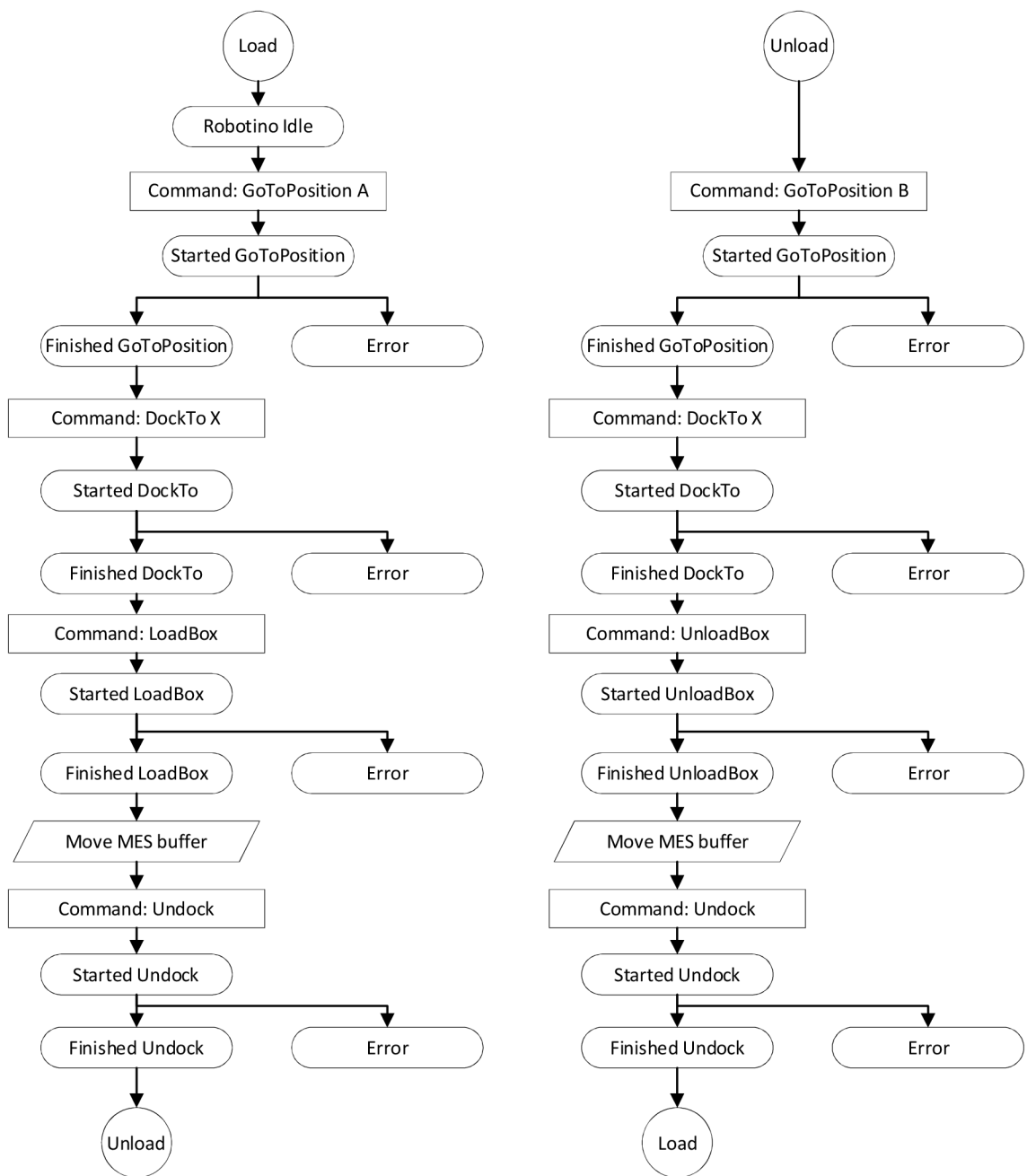
RobotinoVIEW se SW pro grafické programování pohybu Robotina. Na Obr. 32 je uveden příklad programu pro ovládání Robotina pomocí joysticku. Pokud bude vytvořena mapa, příslušné body budou zaznamenány a nastaveny ve Fleet Manageru, lze naprogramovat činnost Robotina pomocí tohoto SW. V případě potřeby simulace lze řídicí programy pro Robotino odsimulovat v RobotinoSIM nebo v CIROS. Několik takovýchto programů bylo vytvořeno jako dílčí podprogramy. Během vývoje byly testovány v RobotinoSIM a posléze přímo na Robotino.



Obr. 32: Ukázka programu v aplikaci RobotinoVIEW, konkrétně jde o řízení Robotina pomocí joysticku.

6.4 Řízení Robotino pomocí skriptu v Python

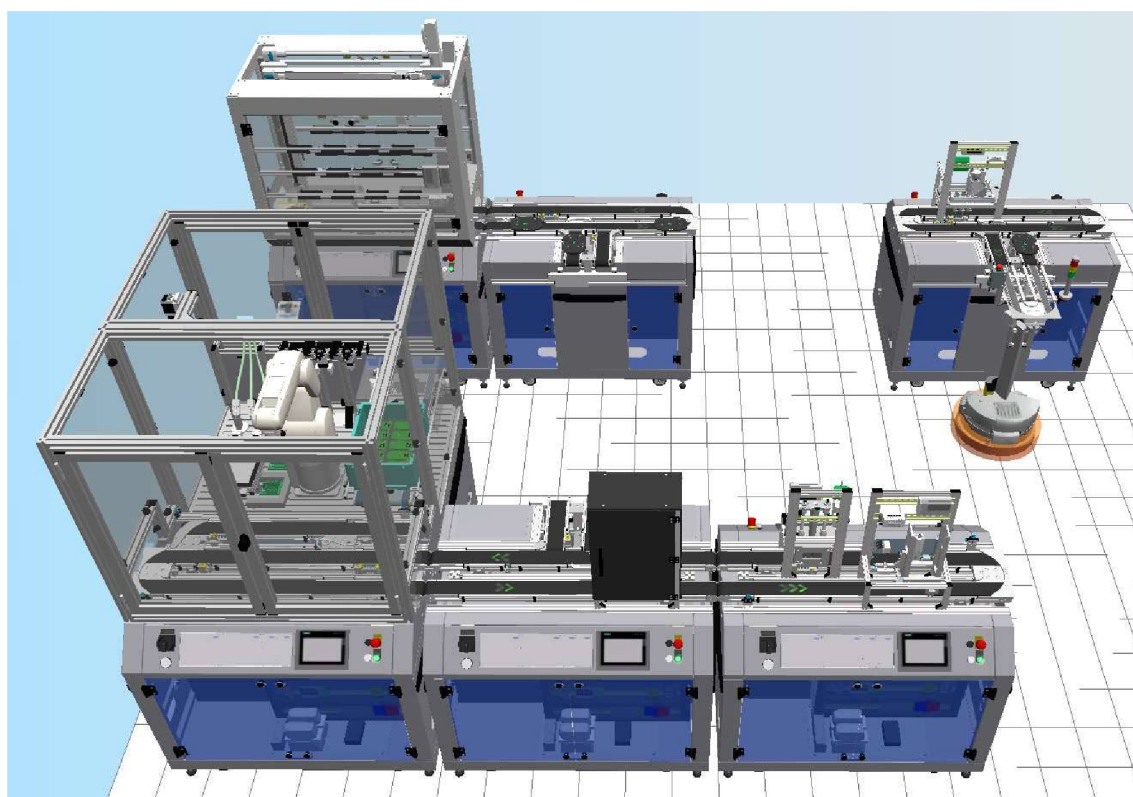
Robotino lze řídit také pomocí skriptů v Pythonu. Python je zde využíván také ke komunikaci mezi MES a CIROS. Pokud se ale zaměříme na Robotino, je možné jej ovládat následujícím způsobem uvedeným ve vývojovém diagramu na Obr. 33. Část vývojového diagramu Load slouží pro pohyb robotu z aktuálního bodu do bodu A a následné dokování, naložení materiálu a oddokování. Část Unload slouží pro pohyb Robotina z bodu A do bodu B a následné dokování, vyložení materiálu a oddokování.



Obr. 33: Vývojový diagram pro ovládání AMR Robotino





















6.5 Návrh konceptu automatické dopravy v CIROS

Obdobně jako v kapitole 5.1 byl na počátku stanoven výrobní plán, tedy postup, podle kterého bude daný výrobek vyroben. Výrobní plán byl stanoven obdobně jako v kapitole 5.1 s cílem vytvořit kompletní produkt modelu velmi zjednodušeného mobilní telefonu. Požadavkem také bylo, aby výroba započala ve skladu a v tomto skladu také skončila. Po sestavení výrobního plánu bylo potřeba vytvořit samotný virtuální model linky. Model virtuální linky můžeme vidět na Obr. 34. Tvorba virtuální linky v CIROS Následně byl pro tento model sestaven výrobní plán v prostředí MES4, jehož dílčí části můžeme vidět na Obr. 38. Je zde vidět, že samotné Robotino se do výrobního plánu nepropíše. Není nutné jej do výrobního plánu uvádět. MES4 si přesuny materiálu AMR koriguje sám prostřednictvím Fleet Manageru, viz kapitola 7.2 respektive pomocí skriptu v Pythonu.

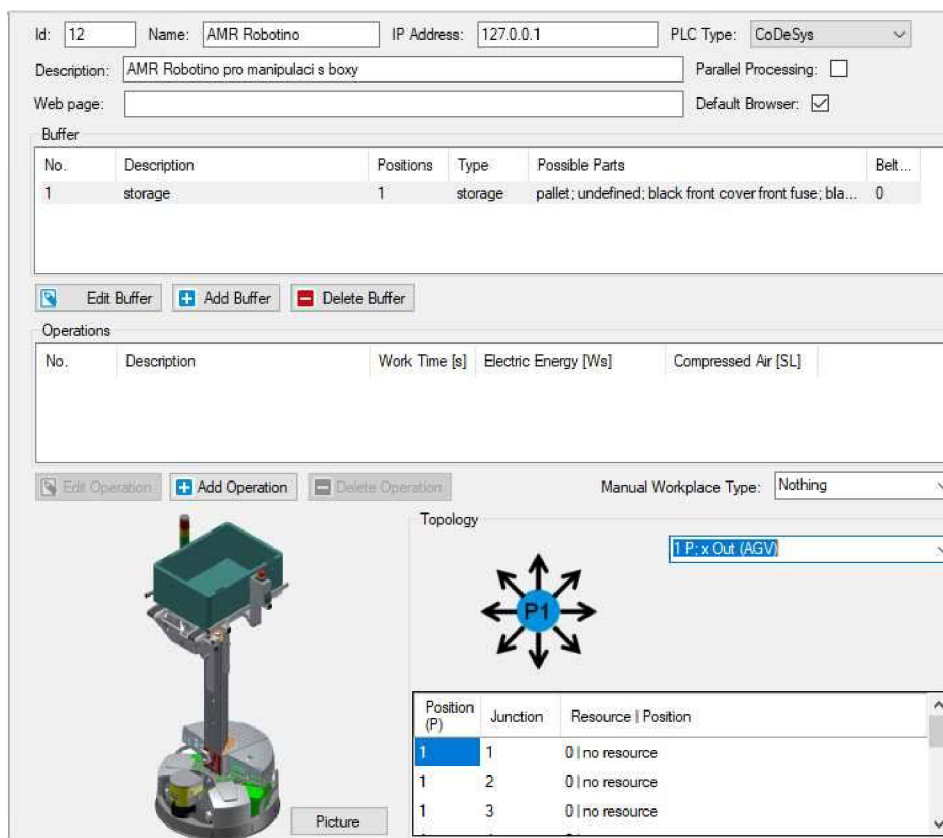


Obr. 34: Model výrobní linky s AMR Robotino [13]

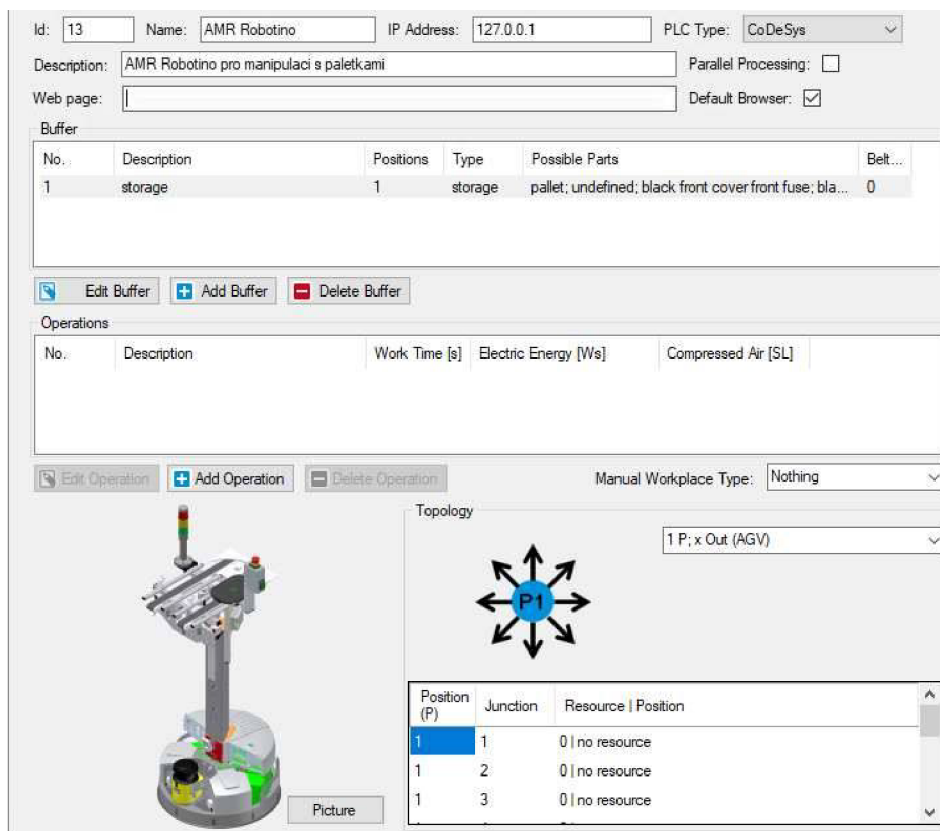
Bylo nutné doplnit do MES nové zdroje v podobě AMR Robotino, viz Obr. 35. Detaily výrobních zdrojů AMR Robotino pro manipulaci s boxy a paletkami jsou uvedeny na Obr. 36 a Obr. 37.

| Resources | | | | | | | | | | | | |
|---|----|--------------|---|---|---|---|---|---|--|---|-----------|---|
| Picture | ID | Name | MESMode | AutomaticMod | ManualMode | Busy | Reset | ErrorL0 | ErrorL1 | ErrorL2 | IP | Connected |
|  | 13 | AMR Robotino |  |  |  |  |  |  |  |  | 127.0.0.1 |  |
|  | 12 | AMR Robotino |  |  |  |  |  |  |  |  | 127.0.0.1 |  |

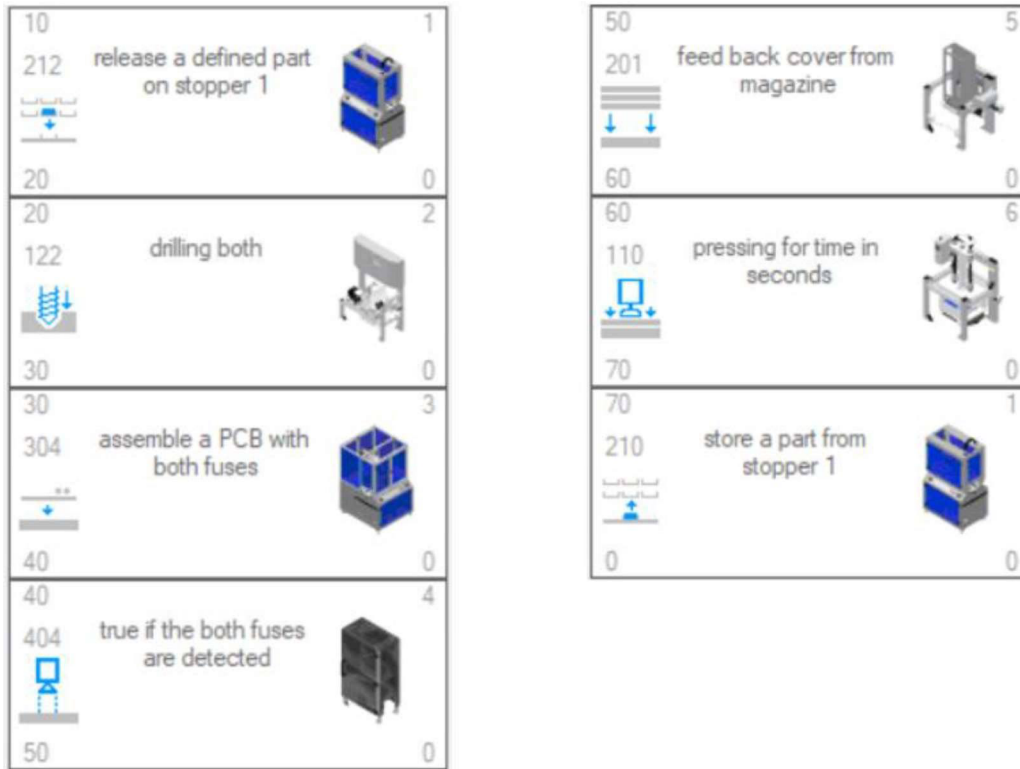
Obr. 35: Doplnění výrobních zdrojů v podobě AMR Robotino



Obr. 36: Detail výrobního zdroje AMR Robotino pro manipulaci s boxy



Obr. 37: Detail výrobního zdroje AMR Robotino pro manipulaci s paletkami



Obr. 38: Sestavený výrobní plán v MES4 pro výrobu v CIROS s AMR Robotino

7 KOMUNIKACE

Popis komunikace kyber-fyzikálního systému od Festo a MES4 respektive její pochopení je nezbytné pro samotné pochopení funkce jednotlivých HW komponent, chování linky a samotného posouzení přiblížení se linky k principům Průmyslu 4.0. Linka rozlišuje dva způsoby komunikace linky a MES4 prostřednictvím materiálů. Respektive údajů uvedených na RFID čípech umístěných na nosičích. Odlišný typ komunikace se vyskytuje u AMR Robotino a bufferů. U bufferů dochází k periodickému dotazování aplikačních modulů do MES4 o aktuálním stavu bufferů. RFID čip nese tyto informace:

- CarrierID – identifikační číslo nosiče,
- OrderNumber (Ono) – číslo objednávky,
- OdredPosition (OPos) – pozice v objednávce,
- PartNumber – číslo výrobku,
- ResourceID – identifikační číslo následujícího modulu,
- OperationNumber – číslo následující operace.

Samotnou komunikaci je možné simulovat přímo v MES4 prostřednictvím PLC simulátoru, který posílá dotazy do databáze MES4 a ta se chová, jako by byl spojen s virtuální či fyzickou linkou, respektive jejími aplikačními moduly. Lze tak simulovat celý výrobní proces, obsazenost skladů, vytíženost aplikačních modulů atd., viz Obr. 39.

Simulate PLC

| MClass | MNo | Short | Description |
|--------|-----|---------------------|--------------------------------------|
| 100 | 1 | GetOpForRsc | get next operation for resource |
| 100 | 2 | GetOpForPallet | get next operation for pallet |
| 100 | 3 | GetOpForCarrier | get next operation for carrier id |
| 100 | 4 | GetFirstOpForRsc | get first operation for resource |
| 100 | 5 | GetOpForOrderIn... | get next order from buffer where |
| 100 | 6 | GetOpForOnoOP... | get next operation for Ono and C |
| 100 | 7 | GetDefOpForRsc | get next defined operation for res |
| 100 | 8 | GetOpPNoForBuf... | get a operation for resource whe |
| 100 | 9 | GetOpForFiFo | get operation for next part in fifo |
| 100 | 10 | GetDefOpPNoFor... | Get next defined operation for a |
| 100 | 11 | GetOpInBox | get next operation from part in Bc |
| 100 | 12 | getFirstOpPosFor... | get next |
| 100 | 13 | GetFirstOpForOP... | get first |
| 100 | 14 | GetFirstOpForRsc... | get next |
| 100 | 15 | GetFirstOpForRsc... | get a fin |
| 100 | 16 | GetOpInBoxForRsc | get next |
| 100 | 17 | GetOpInBufPosF... | Give ba |
| 100 | 18 | GetDefOpInBoxF... | get next |
| 100 | 19 | GetOnoOPosInBuf | Get Ord |
| 100 | 20 | reGetOpForOnoNo... | get start |
| 100 | 25 | GetOpForASRS | get operation that is for this objp |
| 100 | 30 | OrderInfo | get info for Ono (exist the order?) |
| 100 | 31 | GetCustomerInfo | get name and company from cus |
| 100 | 32 | GetTextForManWP | Get text that is shown on the ma |
| 100 | 33 | getStepDescription | get the step description |
| 100 | 41 | GetFinOrder | Get infos for fin order |
| 100 | 43 | GetParSubPosFin | get all parameters for SubPos in |
| 100 | 47 | GetBoxPNoForM... | get a BoxPNo for manual boxing |
| 100 | 100 | GetOldestOrder | is any order available that can be |
| 100 | 101 | PL_GetOrderToD... | special hard coded message for |
| 100 | 110 | GetStringPar | get multiple string parameter |
| 100 | 111 | getFreeString | get the free string for the actual c |
| 101 | 1 | SetPar | set parameters on runtime |
| 101 | 2 | SetNewOrder | write and start a new Order and |

| ID | Parameter | Value |
|----|-------------|-------|
| 7 | #ResourceID | 1 |
| 8 | #Ono | 0 |
| 9 | #OPos | 0 |
| 10 | #WPNo | 0 |
| 11 | #OpNo | 0 |
| 12 | #BufNo | 0 |
| 13 | #BufPos | 0 |
| 14 | #CarrierID | 0 |

Current Orders

Ono: 2010 | Customer: No Company | Planned Start: 20.05.2023 9:26:10 | Start:

- OPos: 1 | Order: ciros komplet | Start: | State: IDLE | Next Rsc.: Small Storage
- OPos: 2 | Order: ciros komplet | Start: | State: IDLE | Next Rsc.: Small Storage
- OPos: 3 | Order: ciros komplet | Start: | State: IDLE | Next Rsc.: Small Storage

| Id | Parameter | Type | Value |
|----|------------|------|-------|
| 3 | MClass | 1 | 100 |
| 4 | MNo | 1 | 4 |
| 5 | ErrorState | 1 | 0 |
| 6 | DataLength | 1 | 12 |
| 7 | ResourceID | 1 | 1 |
| 8 | Ono | 2 | 2010 |
| 9 | OPos | 1 | 1 |
| 10 | WPNo | 1 | 9001 |
| 11 | OpNo | 1 | 212 |
| 12 | BufNo | 1 | 0 |
| 13 | BufPos | 1 | 0 |

Obr. 39: Simulator PLC pro MES4

7.1 Komunikace mezi CP-Factory a MES4

Samotný protokol je postavený na TCP/IP komunikaci. Tato komunikace probíhá na dvou portech. Na portu jedna (v MES4 nastaven port 2001) probíhá komunikace Heartbeat. Jedná se o nepřetržité zasílání datového paketu z důvodu oznámení, že zasílající systém je stále činný, a komunikuje. V tomto konkrétním případě se jedná o informace o připojení, informaci o používaném režimu (Auto/Man), zaneprázdněnost modulu či chybové hlášení. Na druhém portu probíhá datová komunikace, která je podněcována aplikačním modulem. V případě AMR Robotino je podněcovatelem Fleet Manager. Každý datový paket je složen z neměnné hlavičky (128 bitů) pro všechny commandy a dat konkrétního commandu. Command je identifikován pomocí číselného identifikátoru označujícího druh commandu a ID zprávy. Komunikace probíhá formou dotaz-odpověď. Pak tedy odpovědí na tento dotaz jsou stejné číselné identifikátory, které následují konkrétní data (v případě, že výrobek dorazil na aplikační modul, který se má na tomto výrobku provést, dle výrobního plánu) nebo nuly (v případě, že výrobek dorazil na jiný aplikační modul než ten, který se má provést dle výrobního plánu). Konkrétně tato komunikace probíhá takto.

Pokud k aplikačnímu modulu dorazí nosič, je zastaven na stoperu. Stoper umožní čtení informací z RFID čipu umístěného na nosiči. Pokud je nosič prázdný z RFID jsou vyčtena nulová data a odešle se dotaz *GetFirsOperationForResources* s ID daného aplikačního modulu. Dotaz aplikačního modulu do MES4 v překladu znamená, zda se má na tomto aplikačním modulu s tímto ID provést první operace z objednávky. Pokud tomu tak je MES4 odpoví daty z konkrétní objednávky (*OrderNumber*, *OrderPosition*, *PartNumber* a *OperationNumber*). U některých aplikačních modulů jako jsou sklady, je odpověď MES4 rozšířena o konkrétní umístění dílu ve skladu. Pokud k aplikačnímu modulu dorazí nosič s materiálem, jsou z RFID vyčtena konkrétní uložená data. Aplikační modul odešle dotaz do MES4, kterým se ptá, zda se má na tomto výrobním zdroji označeném *ResourceID* provést další operace dle aktuální objednávky ve výrobním plánu. Do MES4 jsou odesílány tedy data v podobě *ResoureID*, *OrderNumber* a *OrderPosition*. Vyčtena z RFID nosiče s materiálem. Dotaz vypadá následovně *GetNextOperationForThisOrderNumberAndOrderPosition*. Odpovědí na tento dotaz z pohledu MES4 jsou platná data v podobě *ResourceID*, *OperationNumber* a *PartNumber*. Dojde k porovnání dat, a pokud nedojde ke shodě, aplikační modul pustí nosič na nekonečném dopravníkovém pásu dále k dalšímu aplikačnímu modulu. Pokud naopak dojde ke shodě při porovnávání dat, aplikační modul provede operaci. V rámci komunikace mezi aplikačními moduly a MES4 jsou posílány další commandy typu *StartOperation*, *EndOperation*. MES4 jako odpověď na poslední jmenovaný odešle informace o ID příští operace a ID aplikačního modulu, kde má být vykonána následující operace a uloží je do RFID čipu na nosiči. Na následujícím aplikačním modulu se proces opakuje.

7.2 Komunikace mezi MES4 a Robotino

AMR Robotino, jak je zmiňováno v kapitole 6.2, komunikuje s MES4 prostřednictvím Fleet Manageru. Robotino tedy není standardním aplikačním modulem. Jeho činnost se nedefinuje ve výrobním plánu. Není tedy potřeba definovat ve výrobním plánu možnosti doplňování materiálu pomocí AMR. Transporty z bodu A do bodu B atd. Transport probíhá automaticky na pozadí pomocí zásobníků aplikačních modulů. Tyto zásobníky mohou být v podobě skladu nebo jako vstupně výstupní část modulu. Komunikace probíhá tak, že Fleet Manager se cyklicky dotazuje MES4, zda je potřeba na nějakém aplikačním modulu provést operaci/transport materiálu. Takový dotaz vypadá následovně *GetBufferWithMaterialToTransport*. Pokud je vyžadována činnost Robotina MES4 pošle odpověď v podobě ID aplikačního modulu *ResourcedID* příslušného vstupně výstupního bufferu. Fleet Manager zareaguje tak, že vybere Robotino (RobotinoID), který převezme materiál. Dále Fleet Manager odešle MES4 příkaz *SetRobotinoToPosition*. Následuje další komunikace mezi Fleet Managerem a samotným Robotinem pro přesun z bodu A do bodu B včetně naložení a vyložení boxu s materiálem v podobě *GoToPosition A, DockTo X, LoadBox, Undock, GoToPosition B, DockTo Y, UnloadBox, Undock*. Současně probíhá komunikace mezi Fleet Managerem (FM) a MES4 v podobě:

- 1) celá komunikace začíná tím, že Robotino se periodicky ptá, zda je potřeba vyzvednout neznámý materiál příkazem *GetUnknowParts*,
- 2) Robotino se periodicky ptá prostřednictvím FM „Na kterém bufferu může AMR najít požadovaný materiál“ příkazem *GetToAVGBuffer*,
- 3) MES4 odpovídá, zda je či není potřeba činnosti Robotina, (0 nebo ID výrobního zdroje, respektive jeho bufferu),
- 4) pokud při dotazu *GetToAVGBuffer* MES4 odpoví číslem ID bufferu v příslušném bufferu je připraven materiál pro vyzvednutí,
- 5) před samotným pohybem Robotina dojde k vymazání jeho bufferu,
- 6) FM příkazem *SetAGVToPos* s ID bufferu nastaví cílový bod Robotina,
- 7) FM pošle příkaz *MoveBuf*, pro přesun materiálu z bufferu výrobního zdroje do bufferu Robotina,
- 8) FM příkazem *SetAGVToPos* s ID bufferu nastaví cílový bod robotina, kam má odvézt naložený materiál,
- 9) FM pošle příkaz *MoveBuf*, pro přesun materiálu z bufferu Robotina do bufferu výrobního zdroje, kam Robotino odvezlo materiál,
- 10) FM pošle příkaz *SetAGVToPos* s indexem 0, který oddokuje Robotino od výrobního zdroje
- 11) celá komunikace končí tím, kde začala. Robotino se periodicky ptá, zda je potřeba vyzvednout neznámý materiál příkazem *GetUnknowParts*. Následuje dotaz *GetToAVGBuffer* a vše se opakuje.

Mezi touto komunikací samozřejmě probíhá i komunikace mezi bufferem výrobního zdroje a MES4. Pomocí příkazů *MoveBuf*, *DelBuf*, *GetOpInBuf* atd.

Z pohledu Průmyslu 4.0 toto řešení také není dle ideji Průmyslu 4.0. Nedochozí zde k poptávání materiálu po příslušné operaci, ale k periodickému poptávání samotného mobilního robotu prostřednictvím Fleet Manageru. Prostřednictvím MES4 se neprovádí optimalizace v podobě rozhodování výběru příslušného Robotu dle ceny, tedy času, spotřeby, ceny atd.

Z důvodu výše popsaných skutečností, nelze o CP-Factory hovořit, jako o kyber-fyzikálním systému řízeném daty. Velký krok k Průmyslu 4.0 by tento koncept udělal v případě, že by se podařilo vyřešit dynamické přidělování operací a výrobních zdrojů. Například, že by si výrobek sám vybíral ze dvou možných aplikačních modulů například vrtání s jiným cenovým ohodnocením, dle požadavků zákazníka, respektive samotného výrobku.

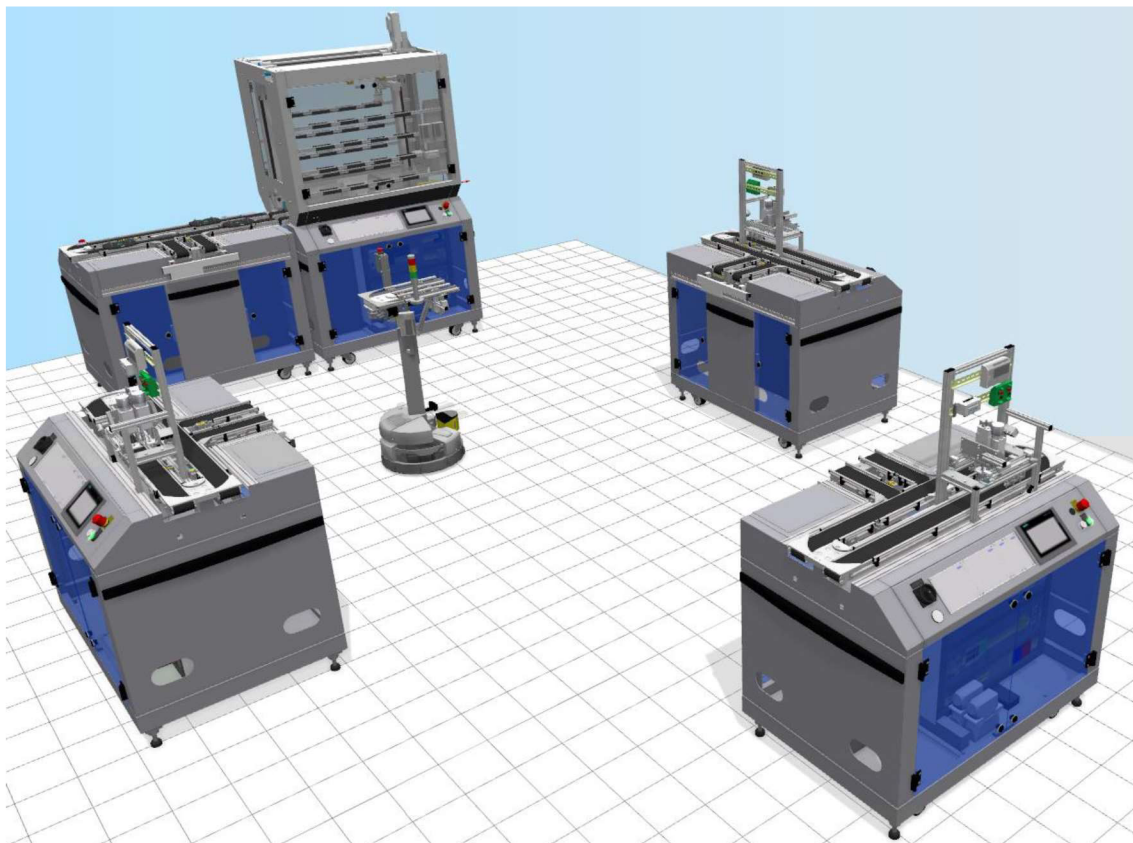
8 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Vzhledem k popisu výše uvedené komunikace a uzavřenosti systému se ukázalo jako nemožné dosáhnout dynamického přidělování „tasků“ s tím, aby byly dodrženy standardy popisující Průmysl 4.0 a aby nedošlo ke kompletnímu předělání celého systému, včetně vytvoření nového MES, řídicích programů pro PLC a Robotino. Nabízela se zde varianta využít otevřenosti software Robotino. Pro představu je zde uvedena výrobní linka se třemi shodnými paralelními větvemi dostupnými pomocí AMR Robotino, viz Obr. 40. Bylo by možné celkem jednoduše vytvořit alternativu FM v podobě skriptu v jazyce Python, který by dokázal pracovat takto:

- 1) Robotino se periodicky ptá, zda je potřeba vyzvednout neznámý materiál (příkaz *GetUnknowParts*),
- 2) Robotino se periodicky ptá prostřednictvím FM „Na kterém bufferu může AMR najít požadovaný materiál“ příkazem *GetToAVGBuffer*,
- 3) MES4 odpovídá, zda je či není potřeba činnosti Robotina, (0 nebo ID výrobního zdroje, respektive jeho bufferu),
- 4) pokud při dotazu *GetToAVGBuffer* MES4 odpoví číslem ID bufferu v příslušném bufferu je připraven materiál pro vyzvednutí,
- 5) před samotným pohybem Robotina dojde k vymazání jeho bufferu,
- 6) skript příkazem *SetAGVToPos* s ID bufferu nastaví cílový bod Robotina,
- 7) skript pošle příkaz *MoveBuf*, pro přesun materiálu z bufferu výrobního zdroje do bufferu Robotina.

Zde by byla změna oproti původní verzi:

- 8) skript příkazem *XY* načte ID bufferu, kam má odvézt naložený materiál, na základě toho bude vědět, že tento cílový je například výrobní zdroj typu „vrtačka“,
- 9) skript následně načte data o všech výrobních zdrojích typu „vrtačka“, vyhodnotí jejich stav a vzdálenost od aktuální pozice
- 10) příkazem *SetAGVToPos* s ID bufferu (vyhodnoceného dle kroku 9) nastaví cílový bod Robotina, kam má odvézt naložený materiál,
- 11) skript pošle příkaz *MoveBuf*, pro přesun materiálu z bufferu Robotina do bufferu výrobního zdroje, kam Robotino odvezlo materiál,
- 12) skript pošle příkaz *SetAGVToPos* s indexem 0, který oddokuje Robotino od výrobního zdroje
- 13) celá komunikace končí tím, kde začala. Robotino se periodicky ptá, zda je potřeba vyzvednout neznámý materiál příkazem *GetUnknowParts*. Následuje dotaz *GetToAVGBuffer* a vše se opakuje.



Obr. 40: Model linky se třemi paralelními větvemi [13]

Tento způsob nevede k dynamickému přidělování „tasků“, ale ke krkolomnému obcházení reality. Po posouzení této možnosti bylo od tohoto řešení, jako jakéhosi pseudopřidělování upuštěno. Bylo rozhodnuto, že na tuto práci, bude dále v budoucnu navázáno vytvořením nového MES s dynamickým přidělováním „tasků“. Který na základě získaných dat od výrobních zdrojů určí cílový bod pro Robotino. Tento způsob, ale značně přesahuje rozsah této práce. Současný systém MES4 není na tuto variantu připraven a vzhledem k jeho uzamčení jej nelze ani upravit.

9 ZÁVĚR

Cílem práce bylo zjistit možnosti AMR Robotino a naučit Robotino dynamickému přidělování „tasků“ v rámci autonomní dopravy kyber-fyzikálního systému, tedy dynamickému přidělování dosahovaných cílů dle nejnižší ceny dané samotným výrobkem. Jde o to, aby si výrobek sám diktoval, řídil cestu své výroby a řídil se vždy adaptivní trajektorií.

Nejprve byla navržena a sestavena výrobní linka ve virtuálním prostředí CIROS bez autonomní dopravy v podobě AMR. Na virtuální lince byla provedena výroba dle sestaveného výrobního plánu, pro který byly vytvořeny zdroje. Výrobní plán byl poté úspěšně testován na fyzické lince. Na virtuální, ale také na fyzické lince byla zkoumána komunikace pro účely samotného pochopení celé linky mezi softwary CIROS, MES4 navzájem nebo softwarem a hardwarem MES4 a PLC v CP-Factory.

Následně byla tato linka přestavěna pro účely demonstrace dopravy materiálu mezi jednotlivými moduly a jejich příslušnými aplikacemi pomocí AMR Robotino. Opět zde byla zkoumána komunikace mezi AMR Robotino a příslušným softwarem Fleet Manager, CIROS a MES4.

Dle získaného popisu komunikace bylo možné sestavit skript v jazyce Python a simulovat řízení AMR Robotino v rámci kyber-fyzikálního systému. Tento skript pomohl nejen k dalšímu pochopení problematiky komunikace, ale také k obejití softwaru Fleet Manager.

Na základě všech výše uvedených poznatků a hledání mnoha cest a slepých uliček k vytouženému cíli bylo nutné konstatovat, že se sice linka blíží k Průmyslu 4.0, ale nedá se říci, že by jí byla. Ještě ji čeká dlouhá cesta. Bohužel původní představa o úpravě systému na podobu dynamického přidělování „tasků“, která by podpořila cestu k Průmyslu 4.0, byla poněkud naivní. Systém nelze bez rozsáhlých úprav stávajícího softwaru od firmy Festo upravit tak, aby toto přidělování umožňoval. Dynamické přidělování dle standardů Průmyslu 4.0 musí vycházet z MES ne od AMR. MES od firmy Festo je ale pro takovéto úpravy uzamčený a přes žádost nebyl pro tyto účely zpřístupněn.

Programování kompletně nového MES pro tyto účely bylo pro rozsah a časovou náročnost nemožné. Vytvářet jakési krkolomné řešení pseudopřidělování v podobě naprogramování přidělování „tasků“ přímo skriptem v Pythonu pro AMR bylo autorem odmítnuto, viz kapitola XY, protože by postrádalo logiky, o kterou se autor opírá v teoretické části. Nic méně, autor se velmi rád bude dále zabývat touto problematikou a pokusí se dosáhnout cíle vytvořením nového MES, tento úkol ale zdaleka přesahuje tento text.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Platform Industrie 4.0. *Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0.* [cit. 2022-04-04]. Dostupné z <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Home/home.html>
- [2] Ministerstvo průmyslu a obchodu. Tisková zpráva. *Vláda ČR schválila Iniciativu Průmysl 4.0.* <https://www.mpo.cz/dokument179671.html>
- [3] HERMANN, Mario, Tobias PENTEK a Boris OTTO. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review* [online]. 01.2015, 16 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review
- [4] ABE, Zeid, Sarvesh SUNDARAM, Mohsen MOGHADDAM, Sagar KAMARTHI a Tucker MARION. The Texas almanac for .. *Machines* [online]. 1856-1868, 17 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/machines7020021](https://doi.org/10.3390/machines7020021)
- [5] ZEZULKA, František, Jan JIRSA, Lukáš VENKRBEC, Petr MARCOŇ, Tomáš BENEŠL, Václav KACZMARCZYK, Jakub ARM a Zdeněk BRADÁČ. The Ideas of Industry 4.0: Seven Years After. In: IFAC-PapersOnLine (ELSEVIER) [online]. ELSEVIER, 2022, s. 145-150 [cit. 2023-05-26]. ISSN 2405-8963. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ifacol.2022.06.024](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.024)
- [6] ZEZULKA, František, Petr MARCOŇ, Ivo VESELÝ a Ondřej SAJDL. Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. *ScienceDirect* [online]. 2016, 8.12.2016, 6 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/311879968_Industry_40_-_An_Introduction_in_the_phenomenon
- [7] Arm, J., et al, Automated Design and Integration of Asset Administration Shells in Components of Industry 4.0. *Sensors*, [online]. 2021, 05.02.21, 6 [cit 22-04-04]. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21062004146>
- [8] Ye, X., et al, An Asset Administration Shell Method for Data Exchange Between Manufacturing Software Applications. *IEEE Access*, 9. [online]. 2021, 22.10.2021, 9 [cit. 2022-04-04]. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3122175
- [9] Platform Industrie 4.0. Details of the Asset Administration Shell. 165 [online] 2018. [cit. 2022-04-04] Dostupné z: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part2_V1.html
- [10] B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, and M. Broy: Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik. In: at - Automatisierungstechnik 61 (2013), No. 10, pp. 669–676.
- [11] MARCOŇ, Petr, Jan JIRSA, Lukáš VENKRBEC, František ZEZULKA, Tomáš BENEŠL, Václav KACZMARCZYK a Jakub ARM. An Experimental Training Production Line to Demonstrate the Basics of Industry 4.0. In: IFAC-PapersOnLine (ELSEVIER) [online]. ELSEVIER, 2022, s. 139-144 [cit. 2023-05-26]. ISSN 2405-8963. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ifacol.2022.06.023](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.023)
- [12] Festo Didactic (2018) CP-Factory manual for VŠPJ.
- [13] Festo Didactic (2020) CIROS Studio, version 6.4.6.
- [14] Festo Didactic (2018) Manual, Basic module linear.
- [15] Festo Didactic (2018) Manual, Bypass Basic Module
- [16] Festo Didactic (2018) Manual, ASRS
- [17] Festo Didactic (2018) Manual, Robot assembly
- [18] Festo Didactic (2018) Manual,
- [19] Festo Didactic (2018) Manual

- [20] Festo Didactic (2018) Bypass Basic Module
- [21] Festo Didactic (2018) Bypass Basic Module
- [22] EFFEKTA Batterie: Technische Beschreibung BFR/BT 12-9,5. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinoakkustechhnischebeschreibung.pdf>.
- [23] SCHOBER, WEISS, RAJENDRA. Robotino: 8058820. [online]. Festo Didactic. Rechbergstraße 3, 73770 Denkendorf, Germany, 2019, 2019 [cit. 2021-5-23].
- [24] SOM-5788: Intel Core i7/i5/i3 Processor. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/RobotinoEmbeddedPremiumDataSheet.pdf>
- [25] User Manual: SOM-5788. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/RobotinoEmbeddedPCPremiumManual.pdf>
- [26] LPC2377/78: Single-chip 16-bit/32-bit microcontrollers. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinomicrocontrollerdatasheet.pdf>
- [27] XILINX: Spartan-3A FPGA Family. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinofpgadatasheet.pdf>
- [28] Dunkermotoren: GR 42x40, 20 W. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinomotorstechnicaldescriptionende.pdf>
- [29] Dunkermotoren: RE 30-2-500 Incremental Encoders for GR/G Motors. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinoencoderstechnicaldescriptionende.pdf>
- [30] Dunkermotoren: Planetary Gearbox PLG 42 S. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinoplanetarygearboxtechnicaldescriptionende.pdf>
- [31] Roatacaste: R3-1258-85. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinowheelsproductspecification.pdf>
- [32] Logitech: Setup Guide Logitech® HD Pro Webcam C920. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinocamerasetupguideendefr.pdf>
- [33] Logitech: LOGITECH HD PRO WEBCAM C920. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinocameraproductinfo.pdf>
- [34] MayserPolymer Electric: Technische Daten SK EKS 011. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinostossleistedenatenblatt.pdf>
- [35] SHARP: Opto-electronic devices division elektronik components group. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinodistancesensorspecification.pdf>
- [36] InvenSense: MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinogyroscopereproductspecification.pdf>
- [37] FESTO: Lichtleitergerät SOEG-L-Q30-P-A-K-2L. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinooptischersensordatenblatt.pdf>

- [38] SCHÄBERLE, PENSKY.. FESTO Manual: 8029476. [online]. Festo Didactic. Rech-bergstraße 3, 73770 Denkendorf, Germany, 2019, 2019 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinomanualende.pdf>
- [39] Näherungssensor: FESTO SIEA-M12B-UI-S. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinoinduktiversensordatenblatt.pdf>
- [40] SICK LaserScanner: S30B-2011BA S300 Standard. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://cdn.sick.com/media/pdf/5/45/845/dataSheetS30B-2011BA1026820en.pdf>
- [41] NETGEAR: N150 Wireless USB Adapter WNA1100. [online]. [cit.2021-05-23]. Dostupné z: <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/document/robotinowlanstickusermanual.pdf>
- [42] B. Saenz de Ugarte , A. Artiba & R. Pellerin (2009) *Manufacturing execution system – a literature review*, Production Planning and Control, 20:6, 525-539, DOI: 10.1080/09537280902938613
- [43] KUKA KATALOG, (2020) *Mobile robotics_KMR iiwa*. [online]. [cit.2022-04-04]Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_kmriiwa_en.pdf?rev=ceaa28e85088452d9ca1e6c01867ab90&hash=AF30C6A91CED17527EE2AAF706222496
- [44] KUKA KATALOG, (2020) *Mobile robotics_KMR QUANTEC*. [online]. [cit.2022-04-04]. Dostupné-z: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kmr-quantec-en.pdf>
- [45] OMRON, (2020) *Autonomous Mobile Robots LD Series*. [online]. [cit.2022-04-04]. Dostupné-z: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v17/i828_ld-series_mobile_robot_datasheet_en.pdf
- [46] Staubli, (2020) *Mobile Robot System HelMo*, [online]. [cit 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/content/dam/robotics/brochures/mobile-robot/Mobile-robot-Helmo-brochure-EN.pdf>
- [47] MiR, (2020) *MiR100 Data Sheet*, [online]. [cit 2022-04-04]. Dostupné z: https://www.amtech-robotics.cz/wp-content/uploads/2020/06/mir100_datasheet.pdf
- [48] MiR, (2020) *MiR100 Data Sheet*, [online]. [cit 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/solutions/robots/mir1350/>
- [49] Festo Didactic (2017) MES 4 / 1.1.0.7 Manual.
- [50] Festo Didactic (2019) MES4, verze 1218.
- [51] COMPAS (2020) COMES [online]. [cit 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.comes.eu/>

SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1: Model RAMI 4.0 [6]..... | 20 |
| Obr. 2: Model komponenty Průmyslu 4.0 [4]..... | 22 |
| Obr. 3: Komunikace komponent skrze AAS a jejich detail (Hlavička, tělo): [7][8][9] . | 23 |
| Obr. 4: 5C architektura [10]..... | 25 |
| Obr. 5: Linka umístěna na VŠPJ v Jihlavě a její části a) montážní linka, b) ruční pracoviště, c) sklad d) obráběcí linka a e) Robotino [12] | 26 |
| Obr. 6: Zjednodušený model mobilního telefonu a) Zadní kryt, b) Přední kryt, c) Deska plošných spojů [6] | 27 |
| Obr. 7: Doprava materiálu na lince a) nosič, b) paleta, c) PCB box a d) box pro horní a spodní kryty [13] | 27 |
| Obr. 8: moduly CP-FACTORY a) základní modul pásového dopravníku, b) Základní modul pásového dopravníku s výhybkou [13] | 28 |
| Obr. 9: Moduly buňky a) víceúrovňový sklad, b) robotická osazovací buňka [13] | 30 |
| Obr. 10: Aplikační modul v podobě gravitačního zásobníku [6] | 31 |
| Obr. 11: AMR Robotino v základním provedení a v provedení s nástavbou [23] | 37 |
| Obr. 12: Závislost proudu, účinnosti a jmenovitých otáček na krouticím momentu [28] | 39 |
| Obr. 13: Ukázka práce s kamerou a nastavení Robotina pro hledání čáry. [ROBOTINO View verze 4.0.4]..... | 40 |
| Obr. 14: Závislost generovaného elektrického napětí na základě vzdálenosti měřeného objektu. [35] | 41 |
| Obr. 15: Virtuální výrobní testbed COMBED od COMPAS [7]..... | 44 |
| Obr. 16: Ukázka výrobní linky v CIROS [CIROS verze 6.4.6] | 45 |
| Obr. 17: Nadefinovaný výrobek a uvedený potřebný materiál pro jeho výrobu | 49 |
| Obr. 18: Model výrobní linky [CIROS Studio] | 50 |
| Obr. 19: Vytváření zdrojů v sekci Resources | 51 |
| Obr. 20: Sestavený výrobní plán v MES4 pro výrobu v CIROS | 52 |
| Obr. 21: Spouštění výroby zvoleného produktu a navolení počtu kusů | 53 |
| Obr. 22: Monitoring virtuální linky skrze MES4 | 53 |
| Obr. 23: Sledování stavu aktuální objednávky | 54 |
| Obr. 24: Výrobní cyklus jednoho vybraného výrobku | 54 |
| Obr. 25: Sledování efektivity, chybovosti a časového cyklu celé výroby. | 55 |
| Obr. 26: Sledování dat již dokončených zakázek | 55 |
| Obr. 27: Sledování obsazení skladových míst | 56 |
| Obr. 28: Vyobrazení umístění hotových výrobků ve skladu po dokončení zakázky | 56 |
| Obr. 29: Mapa Robotina vytvořená v aplikaci Robotino Factory | 57 |
| Obr. 30: deklarace bodů pro Robotino ve Fleet Manageru..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Obr. 31: Command Centrum pro zadávání příkazů pro Robotino | 59 |
| Obr. 32: Ukázka programu v aplikaci RobotinoVIEW, konkrétně jde o řízení Robotina pomocí joysticku. | 60 |
| Obr. 33: Vývojový diagram pro ovládání AMR Robotino | 61 |
| Obr. 34: Model výrobní linky s AMR Robotino [CIROS Studio] | 62 |
| Obr. 35: Doplnění výrobních zdrojů v podobě AMR Robotino | 62 |
| Obr. 36: Detail výrobního zdroje AMR Robotino pro manipulaci s boxy | 63 |
| Obr. 37: Detail výrobního zdroje AMR Robotino pro manipulaci s paletkami | 63 |
| Obr. 38: Sestavený výrobní plán v MES4 pro výrobu v CIROS s AMR Robotino | 64 |
| Obr. 39: Simulator PLC pro MES4 | 65 |
| Obr. 40: Model linky se třemi paralelními větvemi | 70 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Základní parametry AMR KUKA KMR iiwa [41] | 33 |
| Tab. 2: Základní parametry AMR KUKA KMR QUANTEC 3 000 a 45 000 [44] | 33 |
| Tab. 3: Základní parametry AMR OMRON LD-60 a LD-250 [45] | 34 |
| Tab. 4: Základní parametry AMR Stäubli HelMo [46] | 34 |
| Tab. 5: Základní parametry AMR MiR 100 a 1350 [47][48] | 34 |
| Tab. 6: Základní parametry AMR Robotino [23] | 38 |
| Tab. 7: Parametry laserového skeneru [40] | 43 |
| Tab. 8: Vstupně/výstupní rozhraní [38] | 43 |