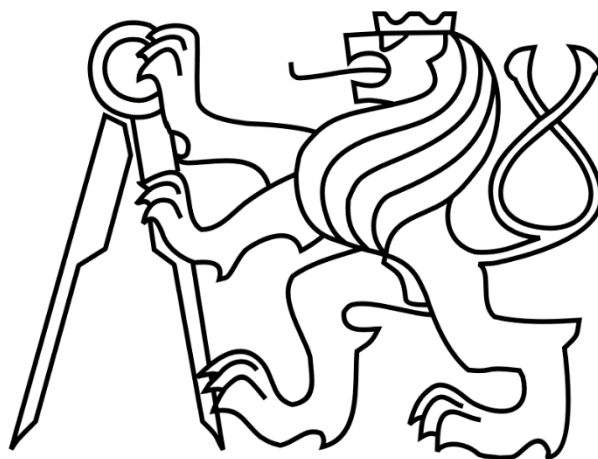


FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Příprava a řízení výroby s vertikální integrací systémů

2019

Bc. Zdeněk Machala

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Machala** Jméno: **Zdeněk** Osobní číslo: **439132**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav:
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Příprava a řízení výroby s vertikální integrací systémů

Název diplomové práce anglicky:

Planning and control of manufacturing process within vertical integrated systems

Pokyny pro vypracování:

Pro demonstrační výrobní buňku proveďte přípravu a návrh řízení demonstrační výroby v prostředí vertikálně integrovaných výrobních procesů: 1. Vytvoření digitálního dvojčete výrobní buňky pro simulaci diskretních výrobních dějů; 2. Návrh propojení výroby v buňce skrze MES pro aplikace řízení a kontroly reálné výroby; 3. Navrhněte demonstrační dílce pro ukázkovou výrobu a proveďte technologickou přípravu pro jednotlivé výrobní stroje; Očekávaný rozsah textové části: 60-80 stran + datové přílohy.

Seznam doporučené literatury:

HOUŠA, J.: Stavba výrobních strojů II. ČVUT, Praha, 1994.; MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. MM publishing, Praha, 2018. ISBN 978-80-906310-8-3.; Mařík Vladimír a kolektiv. Průmysl 4.0: Výzva pro Českou republiku. Management Press, 2016. ISBN 9788072614400.; Schweichhart Karsten. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Platform Industrie 4.0. [online]. www.plattform-i40.de; Firemní dokumentace Siemens a KUKA.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

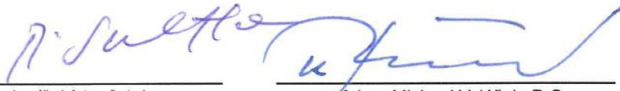
Ing. Petr Vavruška, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **31.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**


doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

31.10.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19. 12. 2019


.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petru Kolářovi, Ph.D. za to, že ve mne od začátku vzniku práce vkládal důvěru, umožnil mi zabývat se tímto tématem a po celou dobu práci odborně vedl. Děkuji také mému konzultantovi Ing. Petru Vavruškovi, Ph.D. za první impulz k vzniku tématu práce a za odborné vedení po celou dobu mého působení v RCMT. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Švédovi, Ph.D. za to, že si na mne vždy udělal čas i když jej neměl, za praktickou pomoc při realizaci práce a maximální nasazení ve všech věcech s ní spjatých. Velké díky patří i všem pracovníkům z RCMT, CIIRC a ze společnosti SIDAT, kteří větší či menší měrou do realizace ukázkového pracoviště zasáhli. V neposlední řadě patří mé díky mé rodině, mým blízkým a přátelům, kteří mne během celého studia i psaní práce podporovali a motivovali.

Anotace

Autor:	Zdeněk Machala
Název DP:	Příprava a řízení výroby s vertikální integrací systémů
Rozsah práce:	72 str., 43 obr., 4 tab.
Akad. rok vyhotovení:	2019/2020
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Zadavatel tématu:	ČVUT FS, Ú12135
Využití:	Zavádění principů vertikální integrace systémů výroby na aplikačním případu modelového pracoviště.
Klíčová slova:	MES, ERP, PLM, automatizace výroby, vertikální integrace, digitální dvojče, Průmysl 4.0
Anotace:	Diplomová práce mapuje možnosti uplatnění principů Průmyslu 4.0 na reálném aplikačním případu vertikální integrace systémů ve výrobní buňce. V rámci práce je navržena modelová přizpůsobitelná výroba představující reálný průmyslový proces. Pro tento model byla vytvořena virtuální simulace výroby pomocí prostředků diskrétní simulace představující digitální dvojče výroby. Výroba byla následně realizovaná za využití řízení z výrobního informačního systému MES.

Abstract

Author:	Zdeněk Machala
Title of master thesis:	Planning and control of manufacturing process within vertical integrated systems
Extent:	72 p., 43 fig., 4 tab.
Academic year:	2019/2020
University:	CTU in Prague, Faculty of mechanical engineering
Department:	U12135 – Department of Productions Machines and Equipment
Supervisor:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Consultant:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Submitter of the theme:	CTU – FME, Department U12135
Application:	Impementation of vertically integrated manufacturing system in a model workcell use case.
Keywords:	MES, ERP, PLM, manufacturing automation, vertical integration, digital twin, Industry 4.0
Abstract:	The thesis maps the options of implementing Industry 4.0 concepts in an industrial appliication with vertically connected manufacturing systems. A model mass customized production is proposed as a case of discrete industrial production. A virtual simulation of the production has been designed using discrete event simulation, creating a digital twin of the system. Manufacturing has then been realized by implementing a manufacturing execution system in the workplace.

Obsah

1	Úvod a cíle práce	10
2	Přehled stavu poznání techniky	12
2.1	Kyberneticky-fyzické systémy výroby	12
2.2	Vymezení pojmu Průmysl 4.0	17
2.3	Automatizační pyramida výroby	21
2.3.1	ERP	23
2.3.2	MES	24
2.3.3	SCADA	27
2.3.4	PLM systémy	28
2.4	Testbed CIIRC	29
2.5	Shrnutí kapitoly a východiska pro vlastní řešení	31
3	Návrh výrobního systému	32
3.1	Volba řešení	34
4	Modelová výroba	36
4.1	Návrh vzorových výrobků	36
5	Digitální dvojče výrobní buňky	39
5.1	Model	39
5.2	Nastavení modelu	40
5.3	Možnosti uplatnění	41
6	Technologická příprava výrobních pracovišť	42
6.1	Pracoviště gravírování	42
6.2	Pracoviště montáže	46
7	Technologická příprava výroby	54
7.1	Frézování	54
7.2	Montáž	57
8	Návrh řízení výroby MES systémem	60
8.1	Propojení strojů se systémem MES	62
8.2	Funkce systému a výsledky testování	63
8.3	Praktické ověření	65
9	Shrnutí a závěr	66
10	Seznamy	68

Seznam použitých zkratk

AGV	Automated Guided Vehicle/Automaticky naváděný vozík
AO	Analog Output
APS	Advanced Planning and Scheduling/Pokročilé plánování výroby
CAD	Computer Aided Design / Počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing / Počítačem podporovaná výroba
CIIRC	Český institut informatiky robotiky a kybernetiky
CIM	Computer Integrated Manufacturing/Počítačem integrovaná výroba
CMMS	Computerized Maintenance Management System/Systém řízení údržby
CNC	Computer Numerical Control / Počítačové číslicové řízení
CPPS	Cyber-physical Production System/Kyberneticko-fyzický systém výroby
CPS	Cyber-physical System/Kyberneticko-fyzický systém
CRM	Customer Relations Management/Řízení vztahu se zákazníky
ČSN	Česká technická norma
DCS	Distributed control system/Distribuovaný řídicí systém
DI	Digital Input
DO	Digital Output
ERP	Enterprise Resource Planning/Plánování podnikových zdrojů
HMI	Human Machine Interface/Uživatelské rozhraní
HRM	Human Relations Management/Řízení lidských zdrojů
I4.0	Industrie 4.0/Průmysl 4.0
ICT	Informační a komunikační technologie
IEC	International Electrotechnical Commission
IO	Input-Output
ISA	International Society of Automation
IT	Informační technologie
KPI	Key Performance Indicator/Klíčové ukazatele výkonnosti
KRL	Kuka Robot Language
MES	Manufacturing Execution System/Výrobní informační systém
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
MOM	Manufacturing Operations Management/Řízení výrobních operací
MU	Movable Unit/Mobilní jednotka
OPC	Open Platform Communication
OPC UA	Open Platform Communication Unified Architecture
PDM	Product Data Management/Řízení dat produktů
PLA	Polylactide
PLC	Programmable Logic Control/Programovatelný logický automat
PLM	Product Lifecycle Management/Řízení životního cyklu
RAMI 4.0	Reference Architectural Model Industrie 4.0
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition/Dispečerské řízení a sběr dat
SCM	Supply Chain Management/Řízení logistiky
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TX	Siemens Tecnomatix
USB	Universal Serial Bus
WMS	Warehouse Management System/Řízení skladu

Seznam použitých veličin a jednotek

Značka	Jednotka	Popis
a	$m \cdot s^{-2}$	Zrychlení
a_p	mm	Hloubka řezu
D	mm	Minimální průměr přísavky
f	$mm \cdot min^{-1}$	Programovaná hodnota posuvové rychlosti
F_G	N	Uzavírací síla
g	$m \cdot s^{-2}$	Gravitační zrychlení
m	kg	Hmotnost (součásti)
μ	-	Koeficient tření
P	kPA	Podtlak vakua
S	$ot \cdot min^{-1}$	Programovaná hodnota otáček nástroje
S_K	-	Součinitel bezpečnosti
t	-	Součinitel bezpečnosti vakuového úchopu
W	N	Zátěž přísavky

1 Úvod a cíle práce

Výroba je komplexní proces přeměny základních vstupů na hodnotné výstupy. Touto přeměnou vzniká na finálním výrobku přidaná hodnota a výrobní firma je schopna generovat zisk. V dnešním globálně propojeném konkurenčním prostředí jsou na výrobu kladeny stále vyšší nároky. Výrobní podniky v rozvinutých zemích čelí konkurenci zemí s nízkými příjmy. V těchto zemích využívají podniky úspory z rozsahu¹ a mají jasnou konkurenční výhodu v masové produkci. Nutí tak výrobní podniky rozvinutých zemích k nacházení rovnováhy mezi úsporami z rozsahu a úsporami ze šíře sortimentu², výroby individualizovaných výrobků. [1] Tyto dvě strategie jsou však v rozporu z důvodu rozdílných nároků na celkovou výrobu. Masová výroba vyžaduje maximalizaci tvorby přidané hodnoty, individuální výroba vyžaduje maximální flexibilitu výrobních prostředků a vyšší nároky na plánování. Celkově jsou kladeny vyšší požadavky na efektivitu výroby, kvalitu procesů a zkracování výrobních časů při současném snižování celkového počtu zaměstnanců.

Řešení těchto požadavků v minulosti výrobní společnosti nacházely v implementaci nejnovějších technologií. Tou poslední jsou informační technologie s veškerými novými možnostmi, které nabízí. Rozvoj v počítačové technice a vývoj PLC³ v minulosti vedl k rozvoji automatizace výroby. Informační systémy byly od devadesátých let nasazovány jako nástroje pro plánování podnikových zdrojů (Enterprise Resource Planning, ERP). Tyto databázové systémy slouží k řízení podniku jako celku, sbírají, spravují a zobrazují data veškerých podnikových aktivit. Na straně výroby se jedná například o skladové hospodářství či informace o poptávkách. Samotné procesní řízení výroby je propojeno s vrstvou ERP výrobními informačními systémy (Manufacturing Executive System, MES). Jednotlivé prostředky automatizace – stroje, PLC či senzory – jsou pak také s těmito systémy propojeny v jednotné síti. Vzniká tak kyberneticko-fyzický systém výroby. Tento a další trendy jsou v současnosti označovány pojmem Průmysl 4.0 a v této práci budou rozebrány na konkrétním aplikačním příkladu automatizované výrobní buňky v laboratořích Testbed CIIRC.

¹ Economies of Scale

² Economies of Scope

³ Programovatelný logický automat, Programmable Logic Control,

Cílem práce je přinést základní přehled aktuálního stavu techniky v oblasti kyberneticko-fyzických systému a představit možnosti jejich aplikace. Práce si klade za cíl na konkrétním fyzickém příkladu demonstrovat možnosti propojené výroby a jejího řízení. Za tímto účelem bude navržena modelová výroba vzorových součástí na pracovišti. Tyto výrobky se budou vyznačovat vysokou variabilitou a možností uživatelského přizpůsobení dle principů přizpůsobitelné hromadné výroby. Pro tuto modelovou výrobu bude vypracována diskrétní simulace sloužící jako digitální dvojče výroby. Ve virtuálním prostředí tak bude možné výrobu simulovat a ověřovat jednotlivé výrobní scénáře. Následně budou fyzické stroje propojeny s virtuálním prostředím v podobě vyšších informačních systémů. Takto propojená výroba bude výrobním systémem řízena a kontrolována. Celkově se dají cíle shrnout do 4 bodů, které souhlasí se strukturou práce:

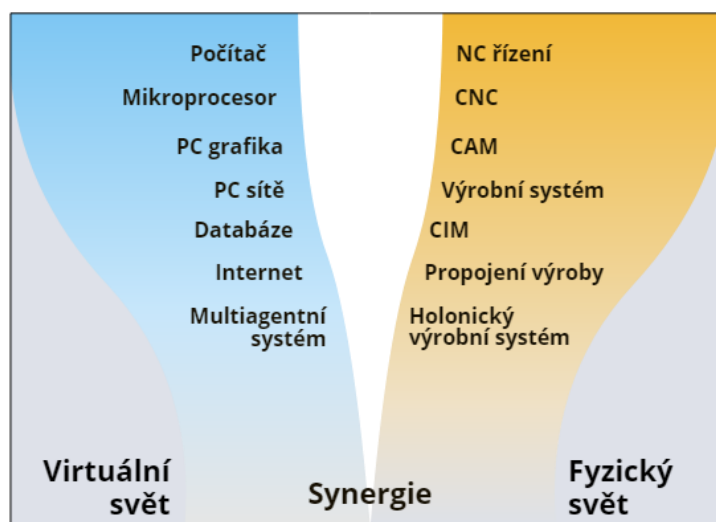
- Návrh demonstračních dílců pro ukázkovou výrobu.
- Vytvoření digitálního dvojčete pro diskrétní simulaci výrobních dějů v uvažované výrobní buňce.
- Technologická příprava jednotlivých výrobních pracovišť.
- Návrh propojení výroby v buňce skrze systém MES pro aplikace řízení a kontroly reálné výroby.

Cílem práce je tak vytvoření jak reálné, tak virtuální možnosti výroby uživatelsky přizpůsobitelných vzorových součástí.

2 Přehled stavu poznání techniky

2.1 Kyberneticko-fyzické systémy výroby

Porovnáváme-li vývoj technologií v ICT s pokroky ve výrobních technologiích, je patrná jejich vzájemná provázanost. Vynález počítače vedl k číslicovému řízení strojů, začleněním mikroprocesorů pak vzniklo CNC⁴ řízení. Počítačová grafika umožnila vznik CAD⁵ a CAM⁶ systémů. Počítačové sítě v kombinaci s databázovými nástroji vedly ke vzniku výrobních systémů a následně k počítačem integrované výrobě (Computer integrated manufacturing, CIM). V dnešní době se nové technologie jako umělá inteligence, strojové učení či multiagentní systémy zasluhují o vznik inteligentních výrobních systémů. [2] Stále více se projevuje vzájemná spjitost mezi virtuálními softwarovými nástroji a jejich fyzickými protějšky, tento trend v historii ukazuje obrázek 1.



Obrázek 1: Propojenost ICT, výroby [2 s. 622]

Výroba je ze své podstaty složitý systém dějů spojující výrobní zdroje, materiál, transportní nástroje, pracovníky, logistiku aj. Ze systémového pohledu se jedná o distribuovaný systém složený z dílčích, samostatně operujících částí (subsystémů). Autonomní jednotku mohou tvořit jakékoliv zmíněné prvky výroby. Tyto autonomní jednotky spolu navzájem interagují a komunikují skrze softwarové nástroje. Dochází tak k propojení dvou světů, reálného světa fyzických objektů (strojů, výrobků, lidí)

⁴ Computer numerical control

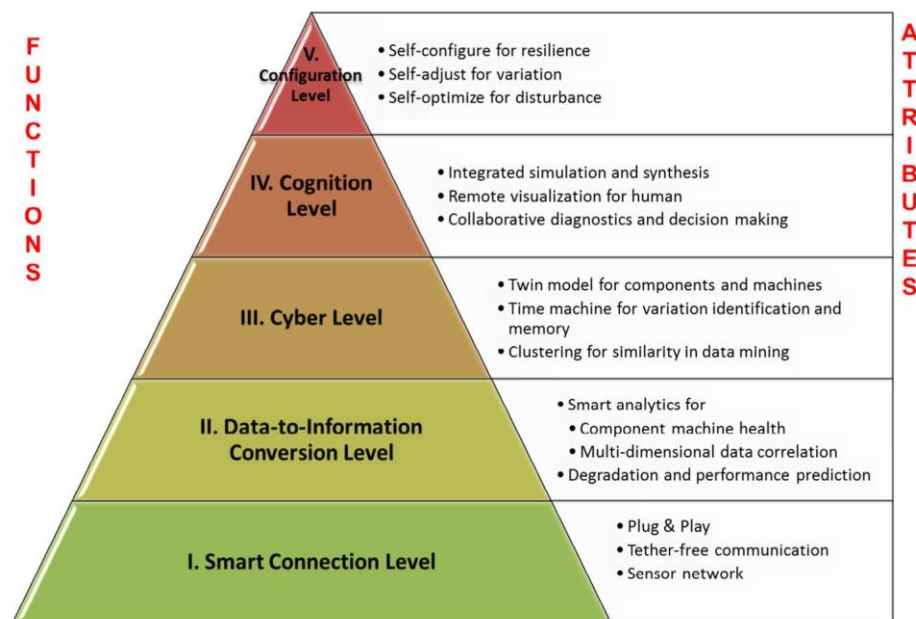
⁵ Computer aided design

⁶ Computer aided manufacturing

a virtuálního, kybernetického světa. [3, 4] Pro tento fenomén je používán pojem kyberneticko-fyzický systém (Cyber-physical system, CPS).

Jako kyberneticko-fyzické systémy jsou označovány systémy spolupracujících výpočetních entit (softwarových řešení), které jsou spojeny s okolním fyzickým světem a v něm probíhajícími ději. Celkově jsou charakterizovány jako fyzické systémy, jejichž operace je monitorována, kontrolována, řízena a integrována výpočetním a komunikačním jádrem. [2] To může být dále propojeno do vyšší nadřazené sítě. Jsou založeny a závisí na vzájemné synergii výpočetních a fyzických komponent a procesů.

Strukturu CPS rozdělenou do úrovní definuje architektura 5C (Connection, Conversion, Cyber, Cognition, Configuration). Je zobrazena na obrázku 2. Jednotlivé úrovně reprezentují hlavní vlastnosti systémů, přičemž předcházející úroveň je předpokladem pro úroveň vyšší. Architektura slouží i pro pochopení funkce a požadavků na CPS. Pokud je tvořen jakýkoliv CPS, musí respektovat tyto vlastnosti.



Obrázek 2: 5C architektura [5 s. 19]

Úroveň chytrého propojení

Získávání přesných a spolehlivých dat z fyzického světa a jeho komponent je prvním krokem při vývoji aplikace CPS. [5] Tuto úroveň si lze představit na úrovni senzorů, přístrojů a softwarových nástrojů, které jsou v systému propojeny a mají spolu komunikovat.

Úroveň převodu data na informace

Druhá úroveň může probíhat například na úrovni strojů. Musí dojít k integraci veškerých dat z první úrovně – senzorů, nadřazených systémů, řídicího systému. Z tohoto souboru dat poté je možné získávat použitelné informace, například informace o stavu zařízení.

Kybernetická úroveň

Na kybernetické úrovni se formují sítě prvků. Slouží jako hlavní centrum výměny informací. Data z jednotlivých strojů (nižší úrovně) mohou být navzájem porovnávána. V kombinaci s historickými daty či daty ze simulací lze předvídat budoucí vývoj. [5]

Kognitivní úroveň

Na této úrovni jsou veškerá data z předchozích úrovní zpracována pro interpretaci uživatelem. Na základě tohoto zobrazení by měl být schopen rozhodovat o konfiguraci systému.

Konfigurační úroveň

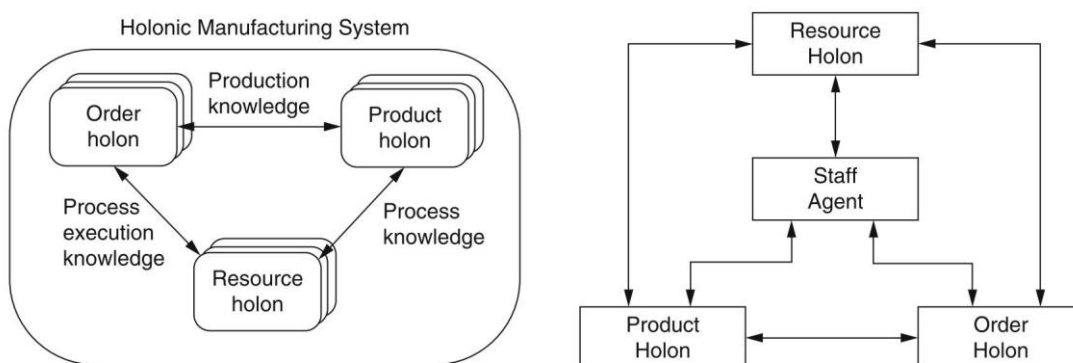
V této úrovni vzniká zpětná vazba z kyberprostoru do fyzického světa a opačně, kdy uživatel dohlíží nad systémem a mění jeho funkci.

V souvislosti s výrobními procesy hovoříme o kyberneticko-fyzických systémech výroby (Cyber-Physical production systems, CPPS). CPPS se skládají z autonomních navzájem spolupracujících systémů propojených v rámci i napříč veškerými úrovněmi výroby, od procesu skrze stroj až po výrobní síť. Mají tři hlavní charakteristiky.

- Jejich jednotlivé elementy jsou schopné získávat informace ze svého okolí a jsou schopny autonomní funkce (inteligence).
- Jsou schopné vytvářet a používat propojení s ostatními prvky systému za účely spolupráce a propojení k nadřazené síti za účely získávání informací a služeb (propojenost).
- Jsou schopny reagovat na vnější i vnitřní změny (responsivnost). [2]

Z těchto důvodů přestávají postačovat tradiční centralizované výrobní systémy, které převažují dnes a skládají se ze sítě řídicích přístrojů (PLC) a jim nadřazených systémů. Prvky systému musí být propojeny navzájem mimo hierarchickou strukturu. Jednou z možných cest k vytvoření takto komplexního decentralizovaného systému představují holonické a multiagentní systémy.

Jedná se o decentralizované výrobní systémy, které sestávají z autonomních, flexibilních, spolupracujících agentů, holonů. [2] Agent je definován jako softwarový systém situovaný v daném prostředí schopný autonomní činnosti za cílem splnění své definované funkce. [6, 7] Jedná se o software, který má definovanou funkci a tu vykonává, ať už samostatně nebo ve spolupráci s ostatními. Skupina agentů, kteří spolu navzájem komunikují, tvoří multiagentní systém. Holon má původně fyzický význam, jako autonomní část celkového systému. [8] Společně pak soubor holonů tvoří například výrobní systém. Součástí holonu však může být i agent, který jej řídí a komunikuje se systémem. Jako holon si lze představit každou součást výrobního procesu, je to polotovar, stroj či objednávka. Lze je rozdělit dle hierarchie PROSA na objednávkové holony (order holon), produktové holony (product holon) a holony výrobního procesu (resource holon), jak ukazuje obrázek 3. [9, 10]



Obrázek 3: Typy holonů [9 s. 659]

Holony výrobního procesu představují fyzický systém – výrobní prostředky jako například továrnu, stroj, pracoviště montáže, sklad, ale i vstupní suroviny, nástroje, pracovníky, či energii. Ostatním holonům může nabízet kapacitu a funkci. Obsahuje výrobní metody pro řízení produkce těchto prostředků.

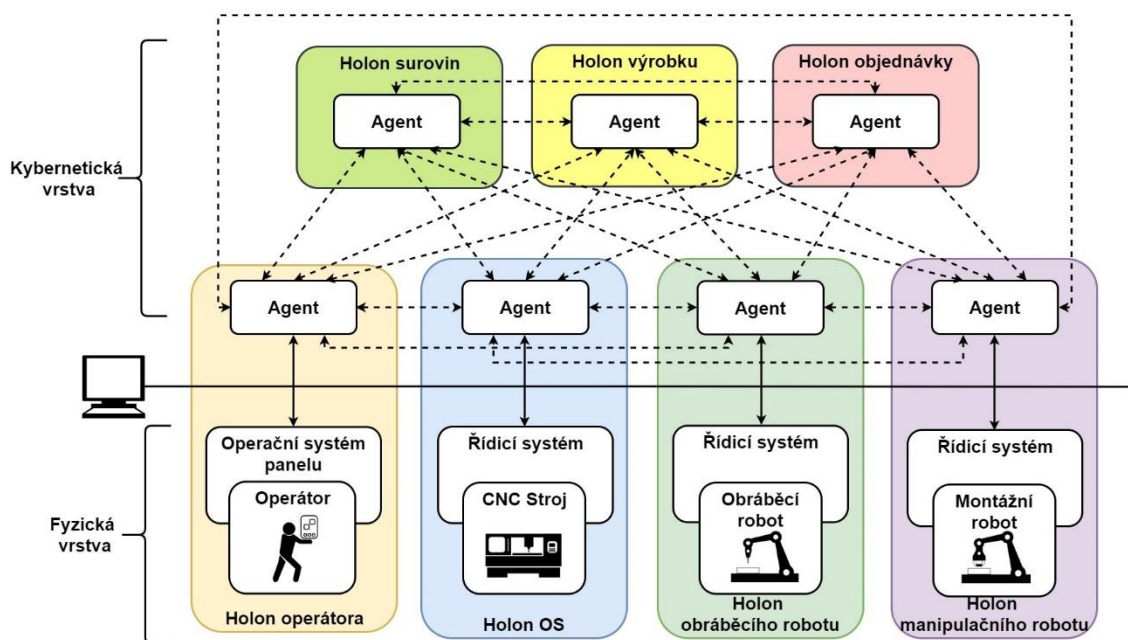
Produktový holon obsahuje veškeré informace o produktu a procesu potřebné k jeho vytvoření. Může se jednat například o plán výroby, kusovník, kontrolu kvality aj.

Objednávkový holon představuje úkol pro výrobní systém. Je zodpovědný za správné provedení přiřazeného úkonu včas. Řídí fyzickou produkci výrobku. Může se jednat o zákaznickou objednávku, objednávku opravy, zadání výroby prototypu, údržbu atd.

Tyto základní kategorie jsou doplněny holony obsluhy (staff holon), které jim mohou poskytovat dodatečné informace. Slouží například k optimalizaci a koordinaci. Může

se jednat o modul dynamického plánování určující pořadí operací či rozhraní vyšších systémů. [9] Tím může být i řešení kompromis mezi decentralizací výrobního systému a hierarchickou strukturou běžné průmyslové infrastruktury.

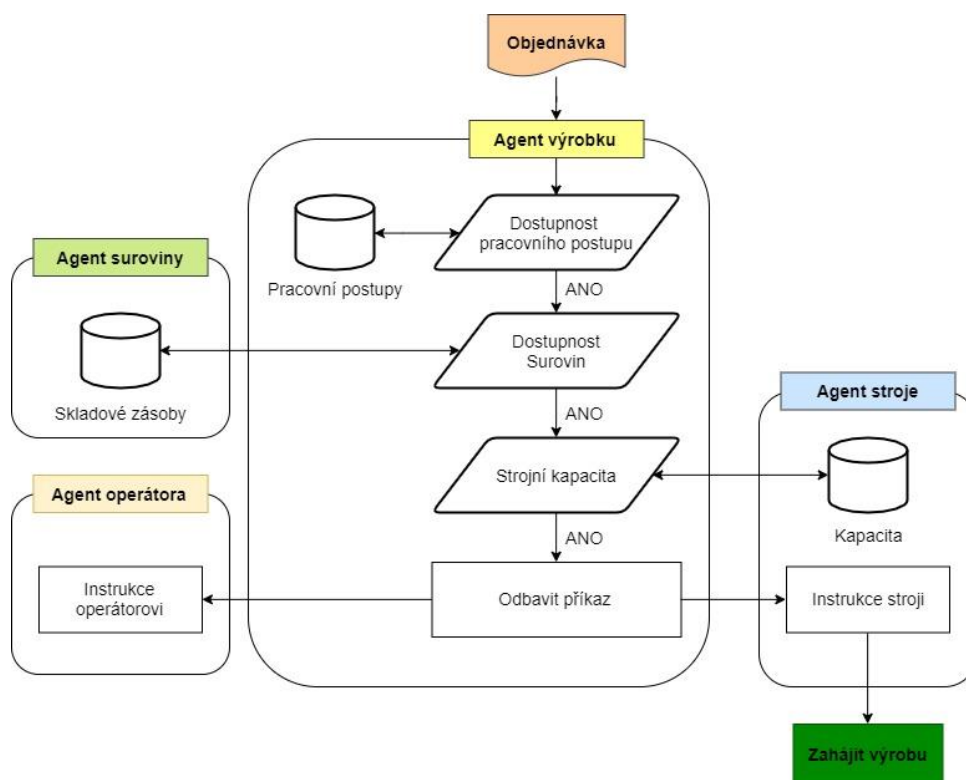
Jako holon si tak lze představit například robotické pracoviště či obráběcí stroj. Sestává ze samotné fyzické sestavy stroje, jeho řídicího systému a případně dalších softwarových agentů, které jej řídí a komunikují s okolím. Představme si výrobní buňku znázorněnou na obrázku 4, která sestává z obráběcího stroje, obráběcího robotu a montážního robotu. Obsluhována je operátorem, který zajišťuje i manipulaci. Systém vyrábí jeden typ produktu. Tento systém by byl tvořen 7 holony. Holonem surovin, holonem výroby, holonem objednávky, holonem operátora, holonem obráběcího robotu, holonem montážního robotu a holonem obráběcího stroje.



Obrázek 4: Multiagentní systém [převzato 6 s. 53]

Tyto holony navzájem komunikují skrze agenty. Při podání objednávky dojde ke zjištění produktu a veškerých jeho výrobních dat. Zároveň dojde ke kontrole zásob vstupního materiálu. Na základě výrobních dat proběhne komunikace s potřebnými stroji a zjištění jejich kapacit. Pokud je objednávka proveditelná, dochází automaticky k zahájení produkce a v tomto případě je operátor instruován k odbavení příkazů. Systém může být libovolně doplněn dalšími holony, které mohou zajišťovat například dynamické plánování. Tímto přístupem vzniká autonomní výrobní systém, který přebírá logiku výroby a řeší ji za použití softwarových prostředků. V tomto případě by tak

za rozhodovací procesy nebyl zodpovědný operátor, ale systém samotný. Možný příklad průběhu procesu znázorňuje obrázek 5.

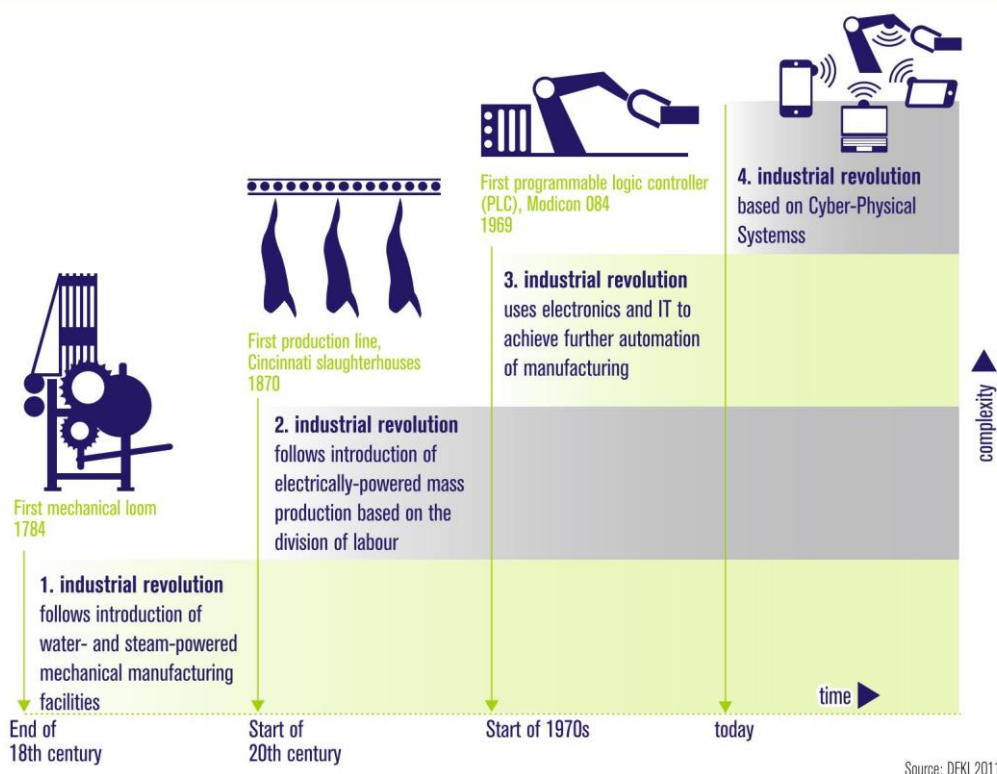


Obrázek 5: Multiagentní systém průchod, převzato z [11 s. 522], upraveno

V rozšíření a využití CPS mnozí spatřují možnost uskutečnění dnes často skloňované čtvrté průmyslové revoluce neboli Průmyslu 4.0.

2.2 Vymezení pojmu Průmysl 4.0

První průmyslová revoluce je přisuzována vynálezu tkalcovského stavu a počátku využívání vodní a parní energie pro mechanickou práci koncem 18. století. Druhou průmyslovou revoluci přinesly elektricky poháněné linky hromadné výroby a dělba práce na přelomu 19. a 20. století. Třetí průmyslová revoluce začala v 70. letech a probíhá dodnes. Využila možností elektrotechniky a IT pro automatizaci výroby. Stroje místo lidí již nekonají jen mechanickou práci, ale zároveň mohou i myslet. V dnešní době vzniká představa, že by právě CPS mohly být dalším zlomovým průlomem přinášejícím čtvrtou průmyslovou revoluci. [2, 4] Vývoj zobrazuje obrázek 6.



Obrázek 6: Průmyslové revoluce v čase [4 s. 15]

Pojem Industrie 4.0, česky Průmysl 4.0, byl poprvé představen na veletrhu v Hannoveru v roce 2011 jako německá politická iniciativa reagující na již probíhající změny v průmyslu, jež jsou považovány za počátek čtvrté průmyslové revoluce. [11] Její hlavní výstupy s dopady na průmyslovou výrobu jsou v krátkosti shrnuty v této kapitole.

Průmysl 4.0 představuje novou cestu organizace a řízení celých hodnotových řetězců. „Transformuje výrobu ze samotných automatizovaných jednotek na plně integrovaná automatizovaná a průběžně optimalizovaná výrobní prostředí. CPS budou základním stavebním prvkem nových „inteligentních továren“, budou schopny autonomní výměny informací, vyvolání potřebných akcí v reakci na momentální podmínky a vzájemné nezávislé kontroly. Senzory, stroje, dílce a IT systémy budou vzájemně propojeny v rámci hodnotového řetězce přesahujícího hranice jednotlivé firmy. Takto propojené CPS na sebe budou pomocí standardních komunikačních protokolů na bázi internetu vzájemně reagovat a analyzovat data, aby mohly předvídat případné chyby či poruchy, konfigurovat samy sebe a v reálném čase se přizpůsobovat změnám podmínek.“ [3]

Jedním z hlavních cílů pak je splnění individuálních požadavků zákazníků se zachováním ceny hromadné výroby, tedy přizpůsobitelné hromadné výroby (one-lot-size production nebo customized mass production). To vyžaduje integraci všech složek životního cyklu

výrobku od správy objednávek, přes výzkum a vývoj, výrobu, užívání až po recyklaci. Všechny zúčastněné prvky tohoto cyklu, tedy pracovníci, výrobky, vstupní materiály a systémy, musí být integrovány jako inteligentní, samostatné jednotky v reálném či takřka reálném čase. [2] Integraci lze rozčlenit na 3 hlavní směry, které jsou předpokladem pro fungování celého systému.

Vertikální integrace musí zajišťovat vzájemné propojení všech úrovní výrobní struktury napříč organizací. Probíhá na úrovni výrobního podniku, továrny. Je třeba zajistit propojení úrovně senzorů a aktuátorů skrze veškeré nadřazené vrstvy až po úroveň podnikových ERP systémů. Dále se také počítá s rozvojem modularizace a možností rekonfigurace těchto propojených systémů. [4]

Horizontální integrace probíhá na úrovni hodnotových řetězců produktů mezi všemi subjekty, které se na nich podílí. I přestože je životní cyklus výrobku rozdělen mezi vícero výrobních zařízení, potažmo společností, data výrobku jsou navzájem provázána. Sdílení informací napříč dodavatelským řetězcem umožňuje například snižovat skladové zásoby a dodávat výrobky „just in time“. [3]

Integrace inženýrských procesů si klade za cíl propojit veškeré inženýrské kroky v etapách životního cyklu výrobku. Digitálně tak má být propojen výzkum a vývoj s plánováním výroby, technologií, samotnou výrobou až po následné poprodejní služby. [4] Již dnes můžeme příklad tohoto spatřovat v různých komerčně dostupných PLM systémech.

Tyto směry integrace popisuje a kodifikuje vzorová architektura RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0). Jedná se o standardizované prostředí, dle kterého by měla být zajištěna komunikace veškerých zúčastněných entit v systému I4.0 napříč životním cyklem výrobku. Je popsána v příloze I. K větší integraci napříč těmito směry vede i rozvoj ve stávajících informačních systémech, kterým je věnována kapitola 2.2

Jakákoliv součást výrobního procesu – stroje a jejich komponenty, materiál, součásti, výrobky i výrobní data jsou v představě I4.0 rovnocenné entity (asset). Každá entita by v důsledku měla být samostatnou I4.0 komponentou. I4.0 komponenta se skládá z assetu a jeho administrativního shellu (asset administration shell), který ji reprezentuje v digitálním světě, propojuje ji s ostatními a řídí přístup k jejím informacím. [12, 13] V souvislosti s předchozím textem lze srovnat administrativní shell s některou

z funkcí agentů a fyzická komponenta I4.0 pak představuje holon. Řeší především přístup k informacím mezi všemi subjekty zapojenými do životního cyklu výrobku. Obsahuje informace a metody, které umožňují jednak získat údaje o souvisejících fyzických komponentách, jednak mohou obsahovat model chování fyzických komponent a propojovat je navzájem do větších celků (obrázek 7). Díky tomu lze modulárním způsobem vytvářet virtuální modely výrobních celků. V praxi může administrativní shell v budoucnu řešit například iniciativa OPC UA Companion Specification. [14]



Obrázek 7: Propojení komponent I4.0 [12]

Lze tak říci, že veškeré kroky v životním cyklu výrobku, výrobní zdroje i výrobek samotný má v představě I4.0 svou digitální obdobu v kyberprostoru. Vznikají digitální dvojčata výrobků, jednotlivých technologických procesů, výrobních zařízení i výroby samotné. Pojem digitální dvojče je používán jak pro virtuální reprezentaci fyzických entit v systému, tak pro popis pokročilých simulací strojů či procesů. V ideálním případě by se tyto dvě využití měly vzájemně doplnit. Pokud bude dále pokračovat rozvoj digitálního dvojčete jako virtuální reprezentace, bude toto označení ekvivalentní s administrativním shellem. [12, 13] Cílem je vytvoření digitální továrny, kde budou v digitální době veškeré fyzické procesy, výrobky a vše související.

Digitální továrna by v ideálním případě měla být dokonalým virtuálním obrazem reálné výroby a její organizace kopírující veškeré výrobní procesy. Skládá se z jednotlivých digitálních dvojčat a simulací. Ve výsledku reprezentuje celkový výrobní proces

nezávisle na samotných fyzických zařízeních. To přináší mnoho výhod. Již při návrhu výrobního systému přináší simulace zpětnou vazbu pro návrháře. Digitální dvojče ve smyslu simulace může sloužit k samotnému programování strojů, kdy usnadňuje práci a snižuje riziko chyb (například kolizí). Procesy a celkový chod systému pak mohou být ověřeny a optimalizovány předtím, než dojde k samotné výrobě. To může například odhalit úzká místa systému. Možnosti simulací jsou dnes již velmi rozšířené a hojně využívané. Sahají od samotných výrobních procesů až po celou továrnu nebo systém továren.

2.3 Automatizační pyramida výroby

V předchozí kapitole byla rozebrána výroba jako kyberneticko-fyzický systém a byly popsány nové představy o možnostech výroby jako CPPS. V této kapitole bude představena současná infrastruktura a její jednotlivé prostředky, které mohou být využity pro tvorbu tohoto systému.

Klíčovým prvkem průmyslu 4.0 je standardizace. Ačkoliv je výroba ze své podstaty velmi různorodá, lze ji standardizovat a jednotně popsat. To začala vyžadovat již dříve integrace výroby do výrobních a podnikových výpočetních systémů a vznik CIM. Nejobsáhlejším souborem používaných norem je systém organizace International Society of Automation (ISA), jmenovitě ISA 88, ISA 95 a její mezinárodní obdoba IEC 62264, která nabízí i českou verzi ČSN. Dle normy ISA 95 lze hierarchicky rozdělit činnost výrobních podniků do 5 vrstev, které společně tvoří pomyslnou pyramidu výroby.

Nultá úroveň představuje samotný výrobní proces. Úroveň 1 definuje výrobní prostředky – výrobní stroje, manipulaci, senzory. Úroveň 2 definuje řízení a monitorování procesu realizované například PLC, DCS⁷ a SCADA⁸ systémy. [15] Úrovně 0, 1 a 2 tak společně zahrnují samotný výrobní proces a jeho přímé řízení. Dle typu procesu pak lze výrobu rozdělit na spojitou, dávkovou a diskrétní. Primárně pro dávkovou výrobu byla vytvořena norma ISA 88, její definice jsou však využívány pro i pro ostatní typy. [16]

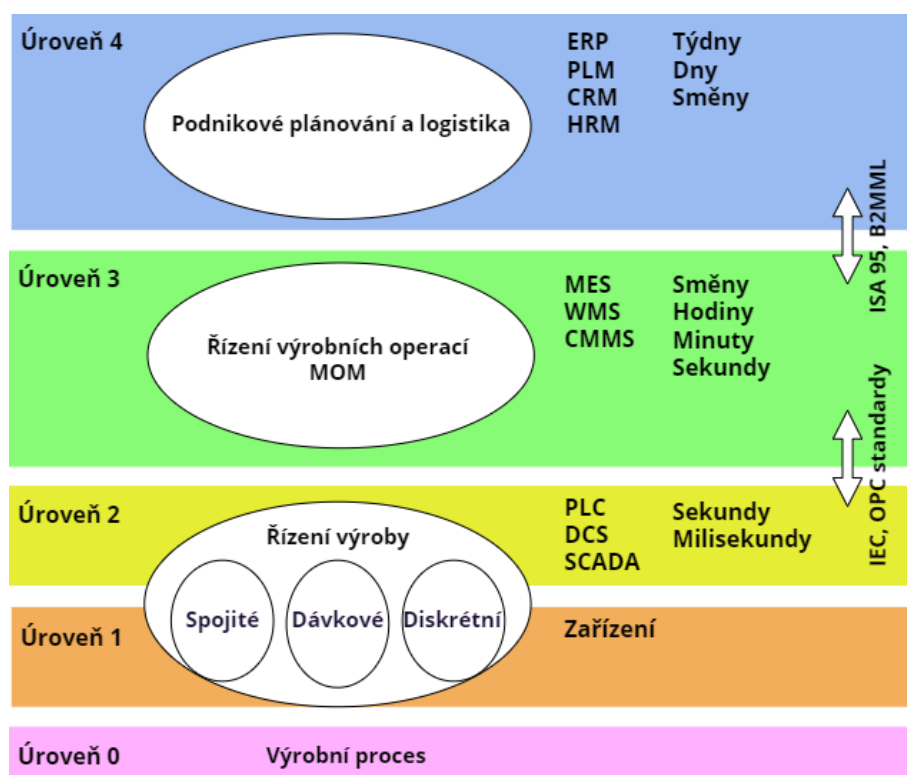
Třetí úroveň představuje řízení výrobních operací (Manufacturing Operations Management, MOM). Zde jsou definovány činnosti potřebné k uskutečnění fyzického procesu. V této úrovni jsou MES systémy předávány výrobní příkazy ke zpracování

⁷ Direct Control System

⁸ Supervisory Control and Data Acquisition

nižším úrovním. Na čtvrté úrovni stojí celopodnikové plánování a logistika realizovaná především systémy ERP. Především funkce třetí úrovně a výměnu informací mezi ERP a MES popisuje norma ISA 95. Podrobněji bude funkce jednotlivých systémů popsána dále. Rozdělení do úrovní je zobrazeno na obrázku 8.

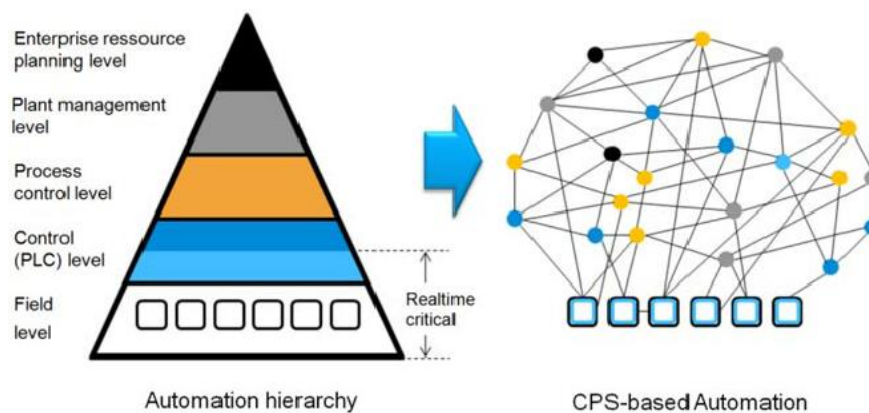
Rozdělení na úrovně lze chápat i v souvislosti s rozsahem, kdy 0., 1. a 2. úroveň obsahují samotné stroje, maximálně výrobní buňky, třetí úroveň obsahuje například výrobní závod či linku a čtvrtá úroveň celý podnik, který může mít výrobních závodů několik. Stejně tak rozdělení přímo souvisí s časovou náročností, kdy procesy v ERP mohou probíhat až v řádu dnů, v MOM v řádu hodin a v nižších vrstvách v řádech sekund až milisekund.



Obrázek 8: Pyramida výroby dle ISA, převzato [17]

Nové pojetí výroby jako CPPS je ze své podstaty decentralizované, částečně tak mění představu o hierarchické, centralizované architektuře výroby představované automatizační pyramidou popisovanou v této kapitole. Dnes se pyramida spíše mění na síť vzájemně propojených prvků (Obrázek 9) Například vyšší podnikové systémy (ERP) mohou být připojeny se stroji a informace získávat přímo z nich. Jednotlivé stavební bloky systému a úrovně však zůstávají platné a hierarchické členění je z hlediska funkce i nadále vhodné. Také je třeba poznamenat, že se stále více stírají rozdíly mezi čtvrtou

a třetí úrovní, kdy původně dedikované systémy ERP a MES mezi sebou přebírají některé funkce a mohou se navzájem doplňovat. ERP systémy nabízí například výrobní moduly.



Obrázek 9: Transformace automatizační pyramidy [2]

2.3.1 ERP

Cílem ERP systémů je integrovat veškeré funkční oblasti podniku do jednotného informačního systému. Klasický ERP systém tak pokrývá oblasti řízení a kontroly výroby, účetnictví, financí, obchodu, logistiky, marketingu, skladového hospodářství a mnoho dalších. ERP systémy pracují s velkými objemy různorodých dat a primárně slouží pro řízení chodu podniku jako celku. Každá funkční oblast podniku zpravidla využívá vlastní modul či aplikaci uzpůsobenou pro jeho potřeby, tyto moduly jsou však provázány navzájem centrální databází a systém tak umožňuje podniková data integrovat a pracovat s nimi jako s celkem. [9]

Do čtvrté úrovně pyramidy spadají také PLM systémy. Tyto systémy slouží ke správě dat napříč životním cyklem výrobku. Integrují tak jejich návrh (CAD systémy), simulace (CAE systémy), výrobu (CAM systémy) a další. Vzhledem k zaměření práce jim bude věnována samostatná kapitola 2.2.4.

Mezi známé společnosti dodávající ERP řešení patří například SAP, Oracle či Microsoft Dynamics. Velkou část celkového trhu však zaujímají menší dodavatelé, například česká společnost ABRA.

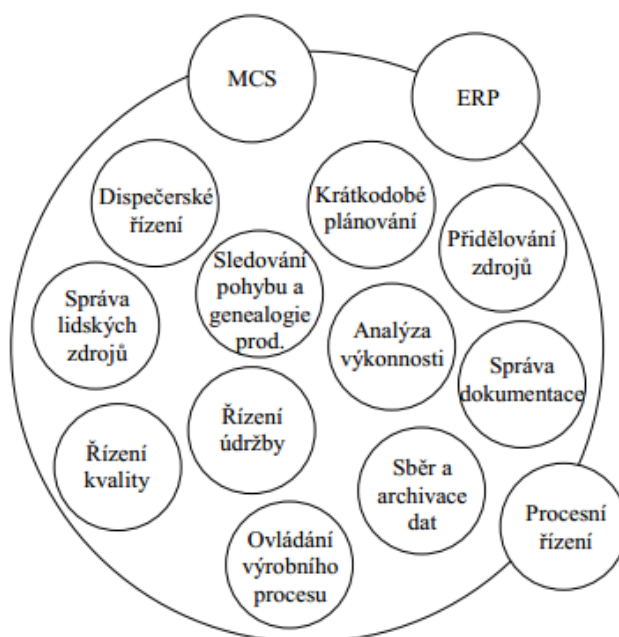
Z hlediska výroby jsou především důležité funkce správy objednávek, skladového hospodářství, plánování výroby, správy výrobních dat (související s PLM), kvality, údržby a další. Hlavní smysl ERP systému – jednotná integrace všech podnikových funkcí – může představovat nevýhodu z hlediska přímého odbavování a řízení výroby na nižších podnikových úrovních. ERP systém může být moc široce zaměřený na to, aby

pokryl specifické požadavky konkrétního výrobního závodu a jeho strojního zařízení. Není primárně určen pro řízení výrobních operací. Nejen z tohoto důvodu jsou zaváděny systémy MES, které propojují podnikovou vrstvu ERP s výrobními procesy. ISA 95 definuje datový standard B2MML určený k přenosu dat mezi ERP a MES a hlavní kategorie přenášovaných informací. [17]

- Informace o kapacitách výroby, zdrojích (Co je dostupné)
 - Kapacity strojů, materiálu, pracovníků, údržba
- Definice produktu (Jak produkt vytvořit)
 - Kusovníky, technologie (pořadí operací, zapojené stroje)
- Informace o výrobě (Co vyrábět kdy a výsledek)
 - Požadavky, plánování, informace o dokončení výroby

2.3.2 MES

Kategorii MOM lze rozdělit na řízení operací výroby, skladování, kvality a údržby. Z toho vše nebo část řeší systémy MES v závislosti na konkrétním softwarovém řešení. Lze také mít systémy pro správu každé této oblasti oddělené. MES systémy řídí, monitorují a synchronizují exekuci fyzických procesů spojených s výrobou v reálném čase. [18, 19] Na rozdíl od ERP a PLM systémů, se kterými jsou provázané, jsou zaměřeny primárně na výrobní oblast podniku. V ní realizují podněty z podnikové vrstvy a přenášejí zpět informace o výrobě. Celkově mohou MES systémy pokrývat až 11 funkčních oblastí dle organizace MESA zobrazených na obrázku 10.



Obrázek 10: Funkce MES dle MESA 11 [20]

Definice MES se však stále vyvíjí a MES systém tak dnes může obsahovat i funkcionalitu z podnikové kategorie, záleží pouze na konkrétním řešení. Aktuální definice dle MESA z roku 2008 je zobrazena v příloze II. Klíčová však stále zůstává základní funkce shromažďování dat ze všech vrstev napříč výrobním procesem, jejich vyhodnocení a exekuce výroby.

Z funkčního pohledu tak musí MES splňovat především následující: [18]

Odbavování výrobních příkazů: Odbavovat výrobní příkazy na základě požadavků z ERP, uzpůsobených tak aby splňovaly dostupnost zdrojů, plánování a kapacit.

Sledování produktu a genealogie: Sledovat pozici každého výrobku ve výrobním procesu v souvislosti se zdroji, vstupním materiálem, součástkami, zapojeném zařízením a osobami, které jsou s jeho výrobou spojeny.

Řízení procesu: Řídit výrobní proces od odeslání objednávky, přes výrobu po hotový výrobek, včetně distribuce výrobních příkazů, návodek.

Alokace prostředků a status: Řídit alokaci a statut prostředků zapojených do výroby, tj. zařízení, nástrojů, materiálu a pracovníků.

Sběr a úschova dat: Sbírat data z výroby a ukládat je v databázi, nebo v přidruženém historian programu.

Řízení kvality: Řídit kvalitu ve výrobním procesu.

Řízení práce: Řídit pracovníky zapojené ve výrobě. Od zaznamenávání pracovních časů, přes informace o pracovnících a jejich kvalifikaci po jejich alokaci ke konkrétním pracovním úkolům.

Analýza výkonnosti: Definovat a sledovat klíčové indikátory výkonnosti (Key Performance Indicator, KPI), analyzovat data a zobrazovat statistiky pro sledování výkonnosti.

Systemy MES mohou také samy obsahovat či spolupracovat s pokročilými systémy plánování výroby (Advanced planning and scheduling, APS). Ty na základě dat o objednávkách z ERP systémů a dat o kapacitách z MES systému tvoří optimální plán výroby pro celou společnost i konkrétní výrobní zařízení.

Takto vybavený MES systém by byl schopen přebrat data o výrobku, skladové zásoby a objednávku ze systému ERP a odbavit výrobu včetně personálních požadavků, požadavků kvality a následného vyhodnocení. Požadavky na systém však nemusí být takto komplexní, a proto se i nabízená řešení liší. V naší aplikaci například nepotřebujeme funkcionalitu kvality ani personálu.

Dále musí být zajištěna dostupnost vstupních dat, tedy propojení jak s výrobním, tak s podnikovým prostředím. [19] Pro funkčnost je klíčové všechny aspekty výroby převést do digitální podoby a se systémem je propojit. Například propojení různorodých výrobních strojů může představovat náročný problém, který se snaží vyřešit standardizace v komunikaci, lze opět jmenovat například standard OPC UA.

Při nasazování systému MES je třeba zvážit především požadavky. Společností nabízející tyto systémy je celá řada, lze je však dle zaměření rozdělit do 4 kategorií: [18]

- **Dodavatelé ERP systémů**

Vzhledem k širokému zaměření ERP se dnes jejich tvůrci specializují i na oblasti pokryté MES systémy. MES je poté spíše rozdělen do různých modulů v rámci komplexního ERP řešení. Výhodou je přirozená integrace systémů. Zástupci jsou shodní s již jmenovanými v předchozí kapitole.

- **Dodavatelé PLM systémů**

PLM systém obsahuje veškerá data o výrobku napříč jeho životním cyklem včetně jeho výroby. Je proto z tohoto pohledu přirozené i řídit jeho výrobu v souvislosti s PLM. Tvůrci PLM systémů nabízí lepší možnosti integrace produktových dat. Příkladem mohou být společnosti Siemens či Dassault Systemes.

- **Dodavatelé automatizačních systémů**

Z pohledu výroby stojí MES nad automatizačními prostředky – PLC či SCADA systémy. Jejich tvůrci pak funkci automatizační techniky umožňují i řídit vlastními MES systémy. Příkladem jsou například Honeywell Connected Plant, Rockwell Automation, ABB MOM nebo český SIDAS (společnost SIDAT).

- **Samostatní tvůrci MES**

Tito dodavatelé se zaměřují čistě na MES systémy bez vazby na jejich navázání. Příkladem jsou například Forcam, NoMuda či Applied Materials.

Různé dodavatele MES systémů srovnává v závislosti na ucelenosti vize a výkonnosti přiložený graf od společnosti Gartner (Obrázek 11).



Obrázek 11: Srovnání MES systémů Gartner [21]

2.3.3 SCADA

SCADA, zkratka z anglického Supervisory Control and Data Acquisition, jsou systémy pro dohled, řízení a sběr dat. SCADA systémy tvoří další propojovací prvek mezi operačním řízením a samotným výrobním procesem. Stojí nad prvky samotného řídicího systému strojů (PLC, HMI⁹). Především řídí průmyslové procesy, monitorují, procesují a sbírají data v reálném čase a přímo komunikují s různými zařízeními zapojenými ve výrobě (to mohou být PLC, senzory, aktuátory, aj.).

Pokud například automaticky řídíme výrobu v celém závodě (typicky procesní průmysl), může být vyžadováno propojení do jednotného systému, který bude zobrazovat klíčová aktuální data, vyhodnocovat je a případně na pokyn pracovníka reagovat změnami požadavků pro připojená zařízení.

⁹ Human Machine Interface, uživatelské rozhraní

Systémy SCADA nachází aplikaci spíše v dávkové a kontinuální výrobě. V případě Testbedu řešeny nebudou, neboť systém zde postrádá význam a nebude aplikován. Tento text slouží pouze pro doplnění problematiky.

2.3.4 PLM systémy

Výraz PLM, z anglického výrazu product lifecycle management, je do češtiny překládán jako řízení životního cyklu výrobku. Skrývá systém správy informací, který dokáže integrovat data, procesy či lidi zapojené napříč životním cyklem výrobku od jeho koncepce, přes design, výrobu až po prodej a následný servis. [22] Stojí na stejné úrovni jako systémy ERP, se kterými se vzájemně doplňují. ERP systémy řeší zpravidla samotnou exekuci procesů a jsou určeny pro uživatele produktových dat. PLM systém řeší výrobky jako takové, jejich vývoj, správu či výrobní proces. Jsou tak určeny spíše pro tvůrce produktových dat. PLM umožňuje správu inženýrských dat napříč procesem a integruje tak veškerá softwarová řešení, která může společnost používat k vývoji produktu. [23]

V jádru PLM stojí tvorba, správa a uchování informací k produktům společnosti za účelem usnadnění práce s těmito daty pro všechny zapojené do životního cyklu. PLM systémy integrují jinak oddělená vývojová prostředí pro návrh produktů (CAD), pro návrh jejich výroby (CAM) či jejich simulace (CAE).

CAD systémy jsou softwarová řešení umožňují návrh za pomoci počítače. Jejich nasazení je dnes prakticky universální napříč technickými odvětvími. Mohou sloužit k návrhu strojních součástí i celků, stavebních prvků či elektrotechnických součástek a kabeláže. CAD systémy jsou základní součástí vývoje jakéhokoliv produktu. Díky těmto programům mají modely výrobků přesně definovanou geometrii přenositelnou do prostředí CAM, které se zabývá již výrobou dané součásti. CAM systémy mají přístup k datům výrobku buď skrze integrovaná CAD/CAM řešení, mohou být propojeny s CAD skrze PLM systémy, nebo mohou být odděleny.

CAM systémy umožňují navrhovat výrobu v počítačovém prostředí. Je jich celá řada dle výroby, kterou podporují. Všechny však mají společné rysy. Cílem CAM systému pro obrábění je vygenerovat NC kód pro konkrétní stroj k odstranění veškerého zbytkového materiálu takovým způsobem, aby po finální operaci výsledný výrobek odpovídal požadované přesnosti a jakosti vyráběného dílce. CAM systém pro 3D tisk naopak

materiál přidává, opět však skrze nastavení operací a následné vygenerování NC kódu pro výrobní stroj. Většina CAM systémů v dnešní době taktéž nabízí různé druhy simulace dráhy nástroje a výpočet strojního času. Nejpokročilejší CAM systémy nabízí simulaci NC kódu přímo s virtuálním strojem. Tyto nástroje dávají uživatelům možnost ladit NC kód již před samotným spuštěním na stroji a odstraňují tak možné kolize a chyby v kódu. Tyto data o simulacích mohou být také využita nadřazenými systémy.

S návrhem výrobku jsou neodmyslitelně spjaté i jejich simulace. Simulace v počítačovém prostředí, označovány pojmem CAE (Computer aided engineering), slouží k ověření návrhů a jejich optimalizaci či všeobecně k řešení inženýrských problémů. [24] Simulovány poté mohou být samotné výrobky, procesy či celé systémy. Pokročilé simulace mohou být označovány jako digitální dvojčata, která byla v textu zmíněna. Simulovat lze i celkovou výrobu například skrze možnosti diskretních simulací.

Diskretní simulace jsou typ simulací, které reprezentují funkci systému jako definovanou sekvenci událostí v čase. Každá z událostí mění stav systému, mezi nimi se naopak stav nemění. Takto lze efektivně modelovat i složité děje, jakým je i výroba. [9] Výsledky diskretní simulace umožňují optimalizovat výrobu mimo jiné nacházením úzkých míst a minimalizací skladových zásob.

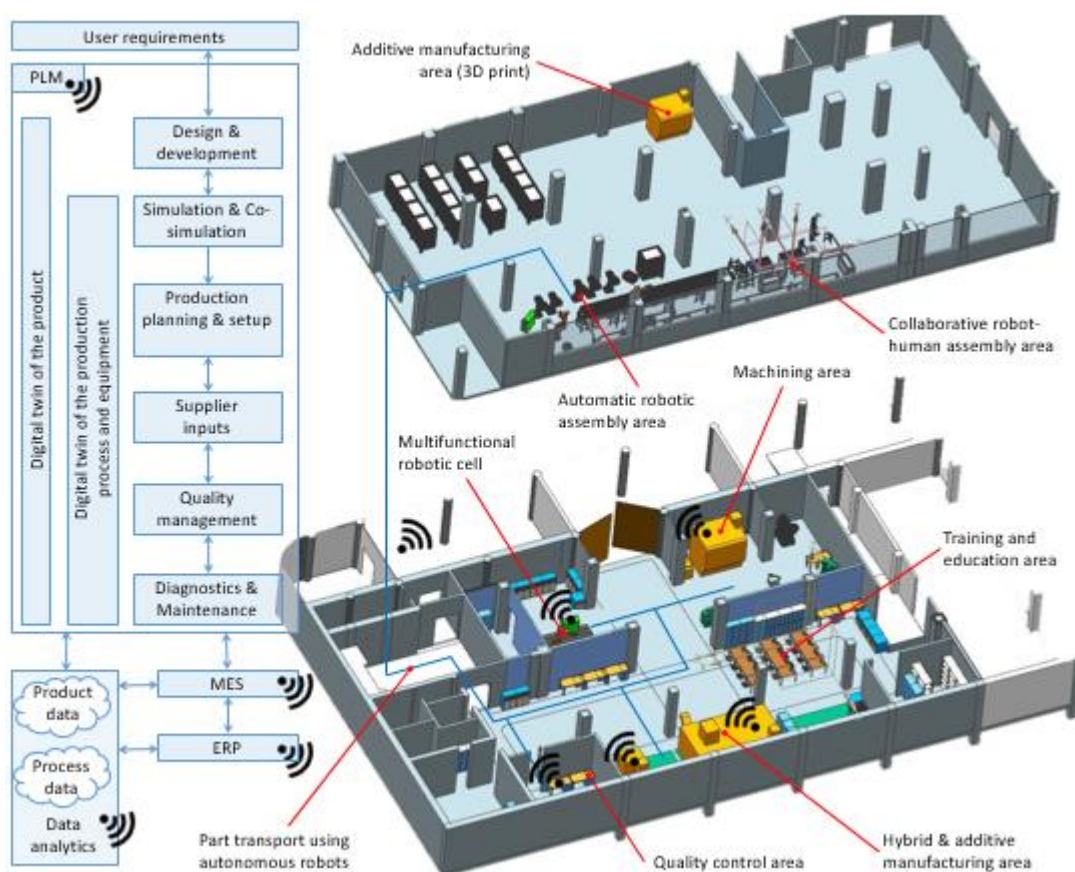
Tyto simulační data a jejich výsledky musí taktéž být zahrnuty ve společném datovém úložišti v rámci PLM. Skrze něj mohou být využívány i pro účely plánování výroby v oblasti MOM.

2.4 Testbed CIIRC

Testbed CIIRC je výzkumné a experimentální prostředí, které umožňuje ověřovat řešení pro chytré továrny, jejich kompatibilitu, funkčnost a účinnost či simulovat a optimalizovat výrobní a související vnitropodnikové procesy. Kombinuje různé technologie jako je aditivní výroba, obrábění, robotická manipulace, inteligentní dopravníkové systémy, spolupráce robota s člověkem a další. [25] Infrastruktura Testbedu má umožnit výzkum v oblasti průmyslu 4.0. Modelová výroba řešená v této diplomové práci je jednou z těchto ukázek využití prostředí Testbedu.

Testbed v CIIRC se skládá ze dvou částí. Z části v suterénu s výrobními stroji a roboty, která se zabývá průmyslovou výrobou a automatizací („Dolní Testbed“) a z části v přízemí, kde se provádějí především operace montážního charakteru. Dlouhodobým

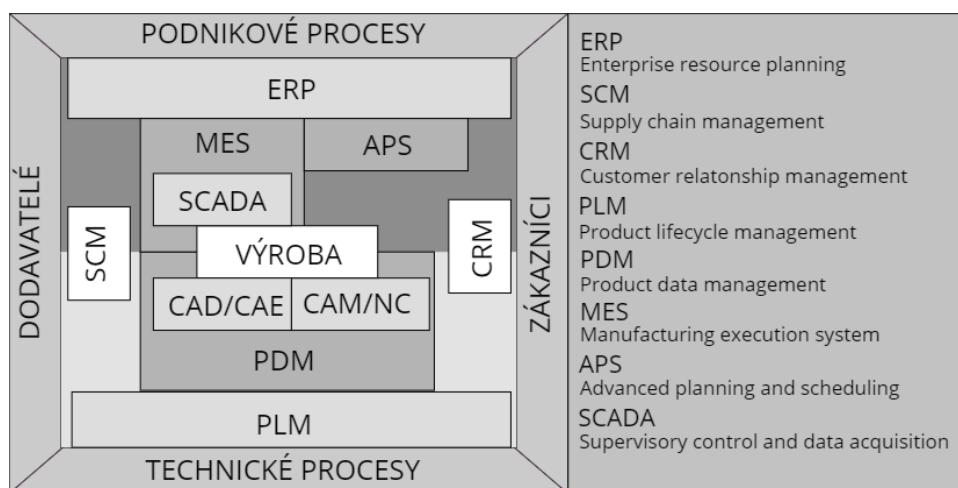
cílem je propojení nejen částí Testbedu, ale i připojování externích pracovišť a postupné budování distribuovaného Testbedu. To vyžaduje modulární architekturu celého systému. Tato práce se zabývá pouze dolní částí Testbedu. Cílem je v této části vytvořit propojenou architekturu, která může být následně integrována s ostatními částmi, může však fungovat i zcela samostatně. Nyní neexistuje v Testbedu žádná společná vrstva v hierarchickém modelu nad automatizační vrstvou. Nejsou plošně implementovány systémy MES ani ERP.



Obrázek 12: Plánovaná podoba Testbed CIIRC s propojením systémů

2.5 Shrnutí kapitoly a východiska pro vlastní řešení

IT technologie jsou již dlouhou dobu k nalezení napříč všemi podnikovými funkcemi. Nyní jejich propojením s fyzickým světem vznikají kyberneticko-fyzické systémy, které jsou základem pro Průmysl 4.0. V této kapitole bylo v krátkosti popsáno mnoho pojmů, které jsou s touto problematikou spojeny a jsou běžně využívány v průmyslovém podniku, jak ukazuje obrázek 12. Cílem je integrace všech systémů do jednotného výrobního prostředí, které představuje východisko pro Průmysl 4.0.



Obrázek 12: IT systémy v rámci podniku. [19]

Cílem práce je uskutečnit modelovou výrobu v Testbedu CIIRC za použití propojených strojů. Cílem v tuto chvíli není zcela autonomní výroba na základě principů Průmyslu 4.0 s využitím pokročilých schopností plánování a inteligence strojních zařízení. Cílem je vyzkoušet v praxi možnosti stávajících systémů a připravit pro jejich využití procesy a pracoviště. Z toho důvodu by měly být do maximální míry využity stávající softwarová řešení při tvorbě hierarchické struktury. V práci tak vznikne soubor dat a systémů, který může být následně využíván v dalších krocích zavádění inteligentní výroby v tomto aplikačním případě.

3 Návrh výrobního systému

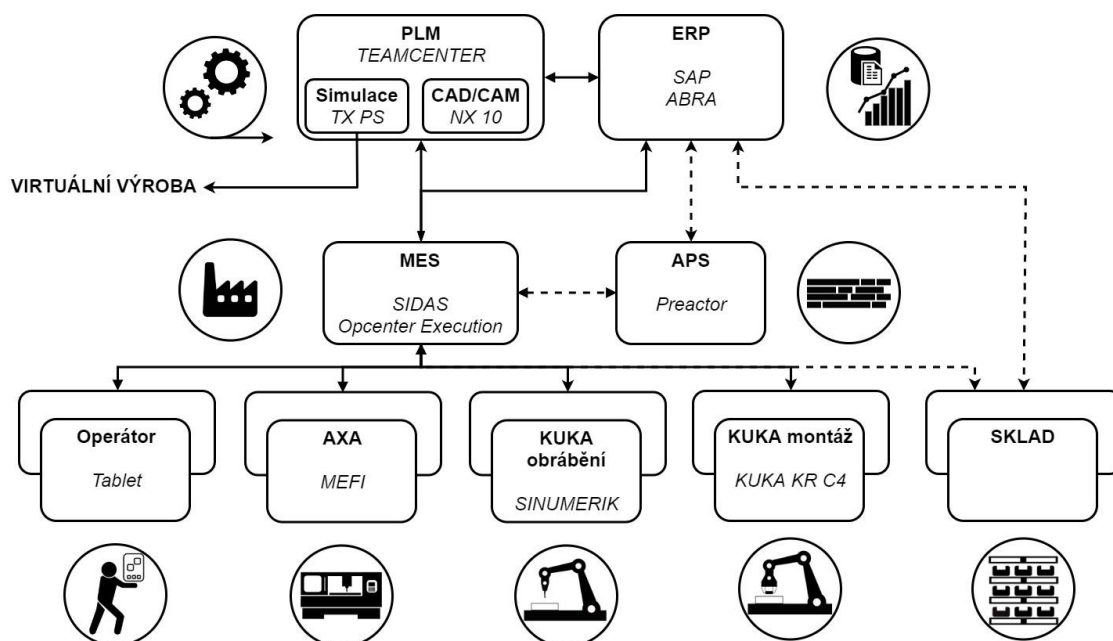
V dolním Testbedu se nachází 2 CNC obráběcí stroje a dva roboty. Pětiosý stroj WeldPrint s řídicím systémem Sinumerik 840D, pětiosý stroj AXA s řídicím systémem MEFI, robot KUKA s řídicím systémem Sinumerik 840D sloužící k obrábění a robot KUKA pro manipulační/montážní operace s řídicím systémem KUKA KR C4. Do uvažovaného systému nemá být zapojen stroj WeldPrint, neboť nebude pro uvažovanou modelovou výrobu využíván. Ostatní stroje tvoří uvažovanou výrobní buňku v dolním Testbedu.

Dále je součástí systému sklad. Jedná se o úložiště, kam je možno odkládat rozpracovanou výrobu, ukládat skladové zásoby dílců, nástrojů, přípravků aj. Sklad je v tomto případě uvažován jako fyzické úložné místo, které nemá aktivní připojení na nadřazený řídicí systém. Nasazení automatizovaného skladu je možné v dalším rozšíření funkcí Testbedu. Informace o skladových zásobách mohou být sledovány nepřímo informačními systémy (MES či ERP) na základě dodávek materiálu a jeho následného využití.

Stroje a sklad jsou obsluhováni operátorem, který zajišťuje manipulaci s materiálem a výrobky. Řeší zavážení polotovárů, nástrojů, přípravků do pracovního prostoru, upínání dílců do upínacího přípravku/svěráku. Operátor je instruován pokyny z výrobního systému například skrze tablet, který mu zobrazuje informace potřebné k obslužení výrobních strojů: co je třeba převézt odkud kam, na jakém stroji je nutno upnout dílec a spustit NC program apod. Tablet je tedy připojen do nadřazeného systému.

Celá výrobní buňka bude řízena výrobním systémem na úrovni MES. Ten by měl samostatně sloužit k řízení a monitorování výroby a zároveň tvořit vrstvu mezi řídicími systémy strojů a vyššími informačními systémy ERP a PLM. PLM obsahuje veškerá zdrojová data životního cyklu výrobku a umožňuje návrh samotného výrobku a návrh jeho výroby (CAM programování strojů, návrh procesů, simulace výrobních dějů). Do výrobního systému je PLM připojeno pro získání produktových dat jako například kusovníků, seznamů nástrojů, návodek, seřizovacích listů nástrojů, NC kódů, CAD modelů aj. Z ERP systému je hlavním vstupem objednávka, termíny dodání, počty kusů, správa zákazníků a další informace potřebné k zadávání výroby. Dále také součástí systému může být systém pro automatické plánování výroby, ať již jako součást systému MES, ERP či jako samostatný modul.

MES musí samostatně nebo na základě požadavku ERP systému dokázat odbavit výrobní příkazy na daný stroj. Při odbavení výrobního příkazu je zodpovědný za přípravu a distribuci veškerých výrobních podkladů. V modelovém příkladu je na stroj distribuovaná veškerá potřebná technologie (programy) a na operátorův tablet veškeré potřebné výrobní podklady (kusovník, seznam polotovarů, návody, list nástrojů). MES systém musí fungovat jak samostatně, tak při propojení s vyššími systémy. Dále monitoruje průběh výroby a vyhodnocuje jej v přehledné formě. Výstup vyhodnocení je zobrazitelný na různých typech zařízení. Komunikace s vyššími systémy probíhá i v opačném směru. Data z výroby tak musí také být sdílena s ERP systémem, a případné požadavky na změnu výrobního procesu s PLM systémem. Tím vzniká uzavřená smyčka PLM, ERP a MES. Schéma uvažovaného systému při použití principů vertikální integrace a rozlišení jednotlivých úrovní dle ISA95 je zobrazeno na schématu na obrázku 13. Schéma uvádí taktéž řídicí systémy strojů (v případě operátora je uveden pouze tablet) a příklady jednotlivých softwarových řešení u nadřazených systémů. Požadavkem pro tyto je maximalizace využití komerčních řešení. U každého systému existuje mnoho možností, dále v textu je popsán výběr konkrétních variant.



Obrázek 13: Návrh vertikální integrace systémů na pracovišti

3.1 Volba řešení

Jako PLM systém byly zvoleny systémy společnosti Siemens. Siemens je jedním z partnerů CIIRC a jeho softwarová řešení pokrývají celý životní cyklus výrobku. Siemens také stojí za iniciativou digitální továrny a nabízí nástroje pro její realizaci. Softwarová sada Siemens NX nabízí integrované prostředí pro CAD, CAM i CAE a umožňuje tak kompletní návrh výrobku. Softwarová sada Tecnomatix (TX) pak pokrývá řadu nástrojů digitální továrny od digitálního návrhu výrobních procesů včetně offline programování, virtuálního zprovoznění či diskrétních simulací celých výrobních celků. Jádrem PLM systému je v ekosystému Siemens systém Teamcenter, který spravuje produktová data. Systém Siemens byl zvolen, neboť nabízí veškeré potřebné nástroje pro realizaci zadání, je používán na pracovišti a je pro něj dostupné licencování. Jako možnou alternativu lze zmínit společnost Dassault Systemes a její platformu 3DEXperience, která nabízí obdobnou šíři různých nástrojů a jejich vzájemnou integraci.

V CAD modulu probíhal samotný návrh vzorových výrobků. Návrh jejich výrobního procesu probíhal v případě obráběcích operací v CAM modulu, v tomto modulu je možné výrobní proces simulovat. Modul CAE slouží k inženýrským simulacím (například pevnostním) a využit v tomto případě nebyl. Produktová data vytvořena v těchto programech jsou pak uložena v systému Teamcenter, který slouží jako centrální databáze a umožňuje správu dat a přístup ostatním uživatelům. Dále lze za součást PLM považovat diskrétní simulaci výrobních dějů v buňce, která byla vytvořena v programu TX Plant Simulation a je jí věnována kapitola 5.

Zvolení kritérií výběru ERP systému a jeho implementace sama o sobě představuje výzvu a je nad rámec této práce. Základní funkční požadavky uvedené výše by měl splňovat každý komerčně dostupný ERP systém. Uvádím proto některé možné příklady běžně využívaných ERP systémů. Z důvodů partnerů CIIRC a projektu Testbed byly zvažovány řešení společností ABRA a SAP. Do realizace této práce však nijak nezasahovaly. Jejich postupné nasazování je plánováno v budoucnu. Nezbytné funkce ERP systému byly zastoupeny objednávkovou aplikací komunikující s MES systémem popsanou v kapitole 8.

Systém MES je klíčovým prvkem celého systému. Již od počátku byl návrh této části modelové výroby řešen ve spolupráci se společností SIDAT. Společnost SIDAT je jedním z partnerů CIIRC zaměřující se na obor průmyslové automatizace. V České republice

působí jako partner společnosti Siemens pro řadu odvětví včetně průmyslového softwaru MES. Původně bylo i z těchto důvodů zamýšleno nasazení softwaru na úrovni MES od společnosti Siemens – Siemens Simatic IT. Ten slibuje snadnou integraci s úrovní PLM i s dalšími úrovněmi automatizace založených na řešeních Siemens (Teamcenter, Sinumerik¹⁰, Simatic¹¹) i možnosti integrace s ERP systémy. Jedná se o modulární MES systém přizpůsobitelný pro účely konkrétní aplikace. V době realizace však byla nejasná struktura jednotlivých modulů tohoto systému, probíhala jeho přeměna a nebyla pro něj dostupná podpora. Během doby tvorby této práce se celé softwarové řešení úrovně MOM transformovalo na nynější Siemens Opcenter, konkrétní řešení MES od Siemens je nyní k nalezení pod názvem Siemens Opcenter Execution. [26] Pro potřeby diskrétní výroby je určen konkrétně modul Execution Discrete. Další moduly, které lze zapojit jsou Preactor APS pro inteligentní plánování výroby, QMS Professional pro řízení kvality či Opcenter Intelligence pro zpracování informací z výroby. [27] Řešení nebylo použito, přednost byla dána modulárnímu MES systému společnosti SIDAT – SIDAS. SIDAS je taktéž modulární systém na úrovni MOM. Jako takový byl společností SIDAT přizpůsoben na konkrétní požadavky modelové výroby tak, aby umožňoval propojení objednávkové aplikace a strojů a řízení systému. Této realizaci je věnována kapitola 8.

¹⁰ Siemens Sinumerik je řídicí systém CNC strojů od společnosti Siemens

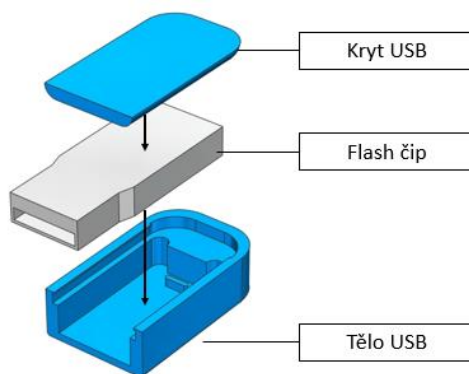
¹¹ Siemens Simatic je označení pro portfolio řídicích systémů PLC společnost Siemens

4 Modelová výroba

Pro ukázkou možností propojených výrobních systémů si práce klade za cíl navrhnout vhodnou modelovou výrobu. Ta musí využívat možností jednotlivých strojů a demonstrovat schopnosti systému jako celku. Je zamýšlena jako ukázkou přizpůsobitelné hromadné výroby, primárním požadavkem je tak variabilita vzorového výrobku, kdy konfiguraci vyráběného kusu určuje uživatel. Zároveň také musí být výrobek levný, rychle vyrobitelný a využitelný jako reklamní předmět, aby si jej uživatel mohl nakonfigurovat, nechat vyrobit a následně i odnést. Takto může modelová výroba představovat jakoukoliv diskretní, flexibilní výrobu.

4.1 Návrh vzorových výrobků

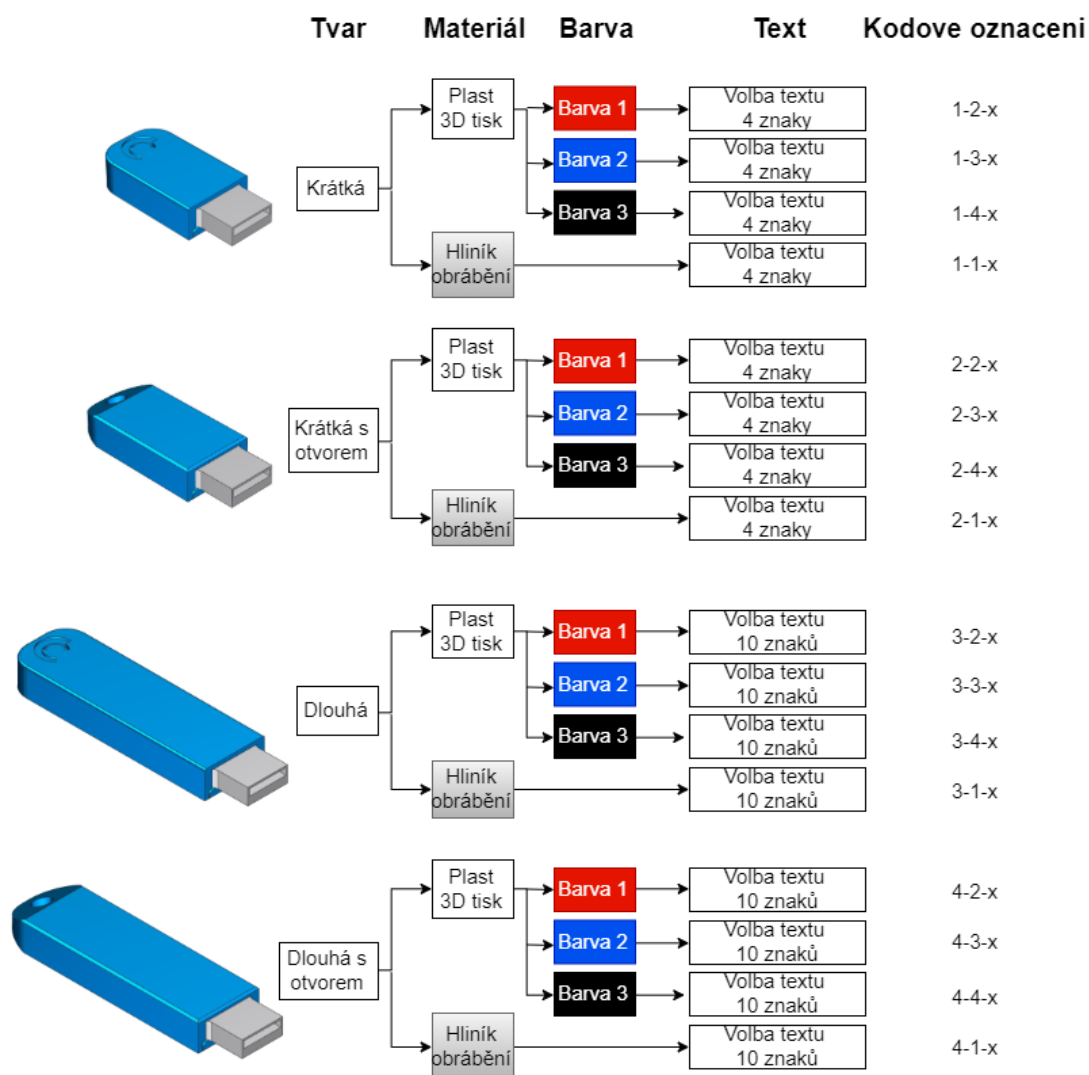
Jako vzorový výrobek byl s přihlédnutím k výše uvedenému zvolen USB flash disk. Jeho základní součástí je samotný flash čip, který lze zakoupit jako hotovou součást již v kovovém obalu. Odlišnost výrobků zajišťuje obal (tělo USB), do kterého je čip vložen. Ten se může lišit tvarem a použitým materiálem, který určuje i barvu. Výroba je navržena tak, že si uživatel může zvolit text gravírovaného popisu na obalu, čímž je zajištěna úplná personifikace výrobku. Čip v obalu uzavírá kryt totožného materiálu jako obal.



Obrázek 14: Návrh vzorového výrobku USB flash disk

Uživatel má jako možnost volby celkově 4 tvary. Tvar kratší, kratší s otvorem, delší a delší s otvorem. Kratší a delší tvary se liší maximálním možným počtem písmen v textovém popisu. Dále uživatel volí materiál, ze kterého kryt bude vyroben. Možnosti jsou hliník nebo plastový výtisk z PLA. U plastové verze je dále možnost zvolit si barvu v základu z červené, modré a černé. To dává celkově 16 možných variant před zadáním uživatelsky voleného textu. Ten je omezen vzhledem k dostupné ploše na 4 znaky u krátké a 10 znaků u dlouhé verze. Možnosti variant zobrazuje obrázek 14. U variant je i popsáno jejich kódové označení, které je využito pro komunikaci mezi systémy.

Kódové označení uvádí tabulka 1. Jednotlivé kódy jsou popsány v tabulce. V souvislosti s přizpůsobitelnou hromadnou výrobou se objevuje pojem 150% kusovník. Tento kusovník zahrnuje všechny možné varianty výrobku a veškeré jejich komponenty. Při uživatelském zadání se danou variantou redukuje na běžný kusovník použitelný pro výrobu.



Obrázek 15: Varianty vzorového výrobku

Tabulka 1: Kódový popis variant výrobku

Tvar		Materiál		Text	Výsledný kód
Krátká	1	Hliník	1	String(4)	1-1-string(4)
		PLA červená	2	String(4)	1-2-string(4)
		PLA modrá	3	String(4)	1-3-string(4)
		PLA černá	4	String(4)	1-4-string(4)
Krátká s otvorem	2	Hliník	1	String(4)	2-1-string(4)
		PLA červená	2	String(4)	2-2-string(4)
		PLA modrá	3	String(4)	2-3-string(4)
		PLA černá	4	String(4)	2-4-string(4)

Dlouhá	3	Hliník	1	String(10)	3-1-string(10)
		PLA červená	2	String(10)	3-2-string(10)
		PLA modrá	3	String(10)	3-3-string(10)
		PLA černá	4	String(10)	3-4-string(10)
Dlouhá s otvorem	4	Hliník	1	String(10)	4-1-string(10)
		PLA červená	2	String(10)	4-2-string(10)
		PLA modrá	3	String(10)	4-3-string(10)
		PLA černá	4	String(10)	4-4-string(10)

Samotné flash čipy v kovovém obalu byly zakoupeny přímo od jejich čínského výrobce. Po jejich dodání a přeměření byly navrženy rozměry těla USB. Kovový obal čipu má na spodní straně otvor, který může sloužit k aretaci. Na těle USB byl proto navržen zámek, který do otvoru zapadá a zajišťuje čip proti vysouvání. K uzavření těla slouží kryt.

Hliníkové obaly jsou navrženy jako obrobek z přířezu frézovaný na stroji AXA. Návrh hliníkové varianty byl rozpracován a byla také provedena technologická příprava. Vzhledem k tomu, že stroj AXA nebyl připojen do řídicího systému MES, nebyla tato výroba realizována. Systém je však připraven na jeho připojení a s výrobou je počítáno.

Jako polotovár u plastové verze je uvažován hotový obal připravený ke gravírování. Plastové dílce mohou být vytištěny na 3D tiskárně Prusa i3 MK3S. K přípravě tisku byl využit program PrusaSlicer. U plastové verze je využito poddajnosti. Obal má v horních vrstvách drobný přesah a kryt je navržen se sražením. Při montáži je kryt vtlačen pod přesah a tím je zajištěn v obalu.

Výroba je plánována v prvotní fázi na konkrétním stroji bez možnosti zastoupení jiným strojem jako pevná sekvence úloh. Na obráběcím stroji AXA je tak plánována výroba hliníkového těla. Na obráběcím robotu KUKA je plánováno gravírování. Na manipulačním robotu je plánovaná finální montáž. Pro realizaci modelové výroby musela být nejdříve pracoviště dovybavena a přizpůsobena novým požadavkům. Těmto změnám je věnována kapitola 6.

V případě naší modelové výroby jsou jasně dány stroje i jejich rozložení v Testbedu. Pokud by nebyly dopředu dány konkrétní výrobní zařízení, muselo by se v této fázi návrhu přistoupit k výběru strojního zařízení a layoutu výroby (fáze návrhu výroby). V tomto i v našem modelovém případě může následovat požadavek stanovení kapacity výroby, její optimalizace z hlediska rozložení či simulace materiálových toků (implementační, provozní fáze výroby). Nejen pro tyto účely jsou využívány možnosti diskretních simulací výroby popsané v následující kapitole.

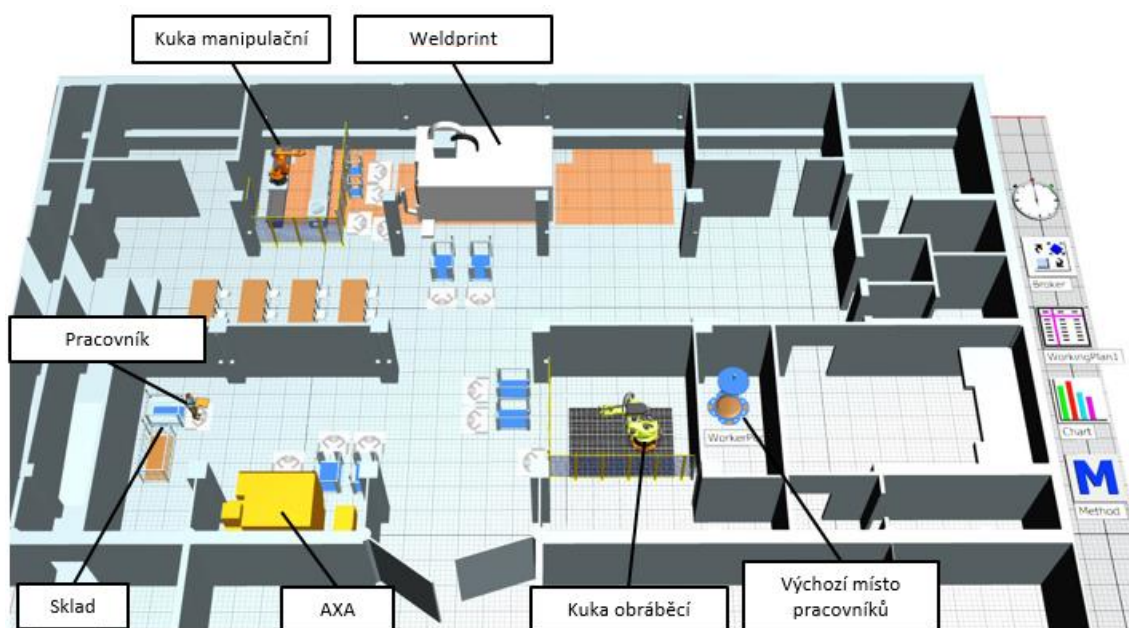
5 Digitální dvojče výrobní buňky

V diplomové práci byla vytvořena diskrétní simulace výroby jako digitální dvojče pracoviště v programu Tecnomatix Plant Simulation. Každé pracoviště je v programu Plant Simulation bráno jako celek a je modelováno pomocí daných objektů programu. Program Plant Simulation se nezaměřuje na simulaci jednotlivých výrobních procesů ale na výrobní systém jako celek. Umožňuje tak plánovat výrobu komplexně i s ohledem na logistiku, mezioperační manipulaci a materiálové plánování. Cílem aplikačního příkladu je ukázat průběh výroby a určit celkové výrobní časy pro jednotlivé typy výrobku.

5.1 Model

V prostředí Tecnomatix Plant Simulation lze vytvářet simulaci jako 2D nebo 3D model. Z důvodu vizualizace výroby byly využity možnosti 3D modelu. Stroje tak jsou reprezentovány svým 3D modelem a pracovník nemusí mít pevně danou dráhu pracovištěm, naviguje se po neobsazené ploše pracoviště.

Model pracoviště je vytvořen na základě existujícího 3D modelu suterénu budovy a obsahuje 4 stroje – stroj AXA, stroj Weldprint, robot Kuka obráběcí, robot Kuka manipulační. Stroj Weldprint není používán pro žádný ze scénářů modelové výroby, je však možné jej v budoucnu využít. Každé z pracovišť je modelováno jako samostatný funkční celek (frame). Celkový model je zobrazen na obrázku 16.



Obrázek 16: Model pracoviště TX Plant Simulation

5.2 Nastavení modelu

Model respektuje kódové označení variant výrobku uvedené v tabulce 1. Pořadí vyráběných dílců modelovaných jako mobilní jednotky (movable units, MU) je dáno sekvencí Working Plan. Zde jsou uživatelem simulace určeny počty kusů, označení typu (v názvu MU) a materiálu (v atributu MU) jednotlivých dílců. Podle sekvence se na počátku simulace (v umístění skladu) generují jednotlivé MU a jsou jim přiřazeny proměnné z kódového označení. Příklad zadání výrobní sekvence ukazuje tabulka 2. Výrobek je tak v celém procesu jednoznačně identifikován a je podle těchto informací směřován na jednotlivá pracoviště použitím metody kontroly opuštění objektu (exit control) nebo cest. Příklad metody exit control je zobrazen na obrázku 17 s komentáři. Pracoviště pak mají dle těchto informací určené výrobní časy pro jednotlivé typy výrobku reprezentovaného MU. Příklad definiční tabulky výrobních časů je zobrazen v tabulce 3.

Tabulka 2: Working Plan

object 1	integer 2	string 3	table 4
MU	Number	Name	Attributes
.MUs.Part	2	Type_1	Material
*.MUs.Part	1	Type_2	Material
*.MUs.Part	1	Type_3	Material
*.MUs.Part	2	Type_4	Material

Tabulka 3: Nastavení Kuka obráběcí

string 1	time 2
MU Type	Time
Type_1	1:15.0000
Type_2	45.0000
Type_3	2:10.0000
Type_4	1:40.0000

if @.Material = 1	;Zjištění materiálu současného MU (@), pokud je hliník, dojde k určení cíle na stroj AXA
?.MUTarget := Axa.bufferin	
else	;Pro ostatní typy materiálu je cíl Kuka obrábění.
?.MUTarget := KukaObrabeni.bufferin	
end	
@.move	;Uvolnit dílec pro pohyb s definovanými pravidly

Obrázek 17: Metoda pohybu MU

Jednotlivé časy byly získány ze simulací obrábění v prostředí CAM nebo následně upraveny podle reálné výroby a společně s časy nastavení strojů a manipulace určují celkový čas výroby jednotlivých dílců. U jednotlivých strojních operací také lze požadovat přítomnost pracovníka. Je možné nastavovat počty pracovníků a v případě větších výrobních dávek například také jejich směny a pracovní pauzy.

5.3 Možnosti uplatnění

Vyhodnocovat lze především celkový výrobní čas celé sekvence, dále vytíženost pracovišť či pracovníků v závislosti na nastavení jednotlivých vstupů. Výhodou je především možnost v rychlosti simulovat libovolné množství různých scénářů a statisticky je vyhodnotit bez nutnosti využití reálných výrobních kapacit. Všeobecně tak může simulace sloužit k vyhodnocování úzkých míst výrobního systému i k operativnímu plánování výroby. Uvedený je pouze jeden modelový příklad uplatnění pro představu o možnostech systému. V něm je cílem vyrobit všechny typy výrobku ve zvoleném počtu kusů.

Pro vzorový výrobní scénář uvedený v tabulce 2 lze zjistit simulovaný celkový čas výroby s jedním pracovníkem 17:54. U jednotlivých typů výrobků je vyhodnoceno procentuální zastoupení výroby, transportu a mezioperačního skladování. Vyhodnocení zobrazuje obrázek 18. Pokud bychom chtěli výrobu optimalizovat, snahou bude maximálně zvýšit podíl produkčního času. Toho lze docílit například přidáním dalšího pracovníka, čímž se nejen sníží celkový výrobní čas na 9:30, ale dojde i lepšímu využití výrobních kapacit a tím i k vyšší přidané hodnotě výrobků. To lze vidět ve vyhodnocení na obrázku 19. Přidáním pracovníka tak došlo ke snížení celkového výrobního času o 43 % a vzrostlo vytížení strojů. Na grafickém znázornění lze pozorovat zvýšení času zpracování výrobků a snížení času přepravy a skladování. Tyto informace mohou být ve fázi plánování výrobní buňky/zavádění nové výroby cennými vstupy pro posuzování ekonomické efektivity a kapacity výroby.

Simulation time: 17:54.8732

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted									
Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain	Type_1	10:57.9682	2	7	57.91%	3.11%	38.98%	13.68%	
Drain	Type_2	4:27.1920	1	3	93.43%	6.57%	0.00%	22.46%	
Drain	Type_3	10:38.1515	1	3	54.81%	2.75%	42.44%	18.80%	
Drain	Type_4	15:03.2446	2	7	55.80%	2.27%	41.93%	19.93%	

Obrázek 18: Výsledky simulace s jedním pracovníkem

Simulation time: 9:30.7174

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted									
Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain	Type_1	6:12.4641	2	13	53.70%	5.50%	40.80%	24.16%	
Drain	Type_2	2:18.9975	1	6	87.37%	12.63%	0.00%	43.17%	
Drain	Type_3	4:24.1726	1	6	76.19%	6.65%	17.16%	45.42%	
Drain	Type_4	7:51.4332	2	13	64.08%	4.35%	31.58%	38.18%	

Obrázek 19: Výsledky simulace s dvěma pracovníky

6 Technologická příprava výrobních pracovišť

V této kapitole jsou rozebrány kroky potřebné k přípravě jednotlivých pracovišť pro samotnou technologii výroby. V následující kapitole 7 je popsána technologická příprava výroby.

Ve stroji AXA bude polotovar (hliníkový přířez) upnut do běžného strojního svěráku, kterým je již stroj vybaven. Pracoviště tak nemuselo být specificky uzpůsobeno. V případě pracoviště gravírování vybaveného obráběcím robotem Kuka bylo třeba zajistit upnutí dílce – těla USB. Robot je z důvodu bezpečnosti uzavřen v kleci, jejíž vstupy jsou ovládány z bezpečnostního PLC. Pracoviště musí být upraveno způsobem, aby bylo možné upnout obrobek bez přítomnosti pracovníka. Ten bude polotovar pouze zakládat do přípravku a následně jej odebírat po ukončení operace.

Pracoviště montáže je vybaveno robotem Kuka, který nebyl vybaven koncovým efektozem. Bylo tak třeba navrhnout samotné pracoviště a vhodnou variantu koncového efektoru, který je schopen provést požadovanou montáž sestavy.

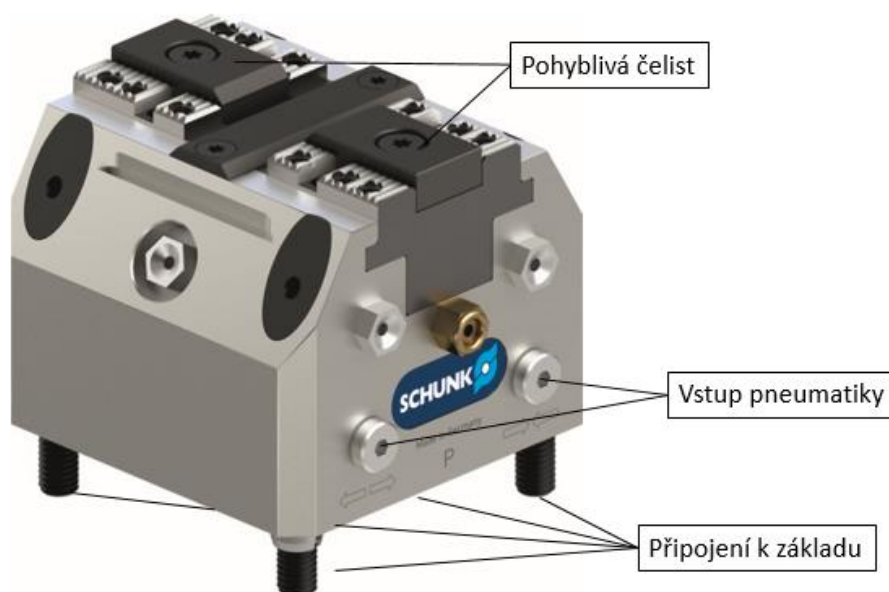
6.1 Pracoviště gravírování

Uvažované pracoviště gravírování je vybaveno průmyslovým robotem KUKA KR 60 HA, který je kromě běžného vybavení osazen obráběcím vřetenem a řídicím systémem KUKA pro obrábění. K řídicímu systému robotu KUKA je také připojen řídicí systém Siemens Sinumerik 840D, který může být k ovládní robotu využit. Dále je pracoviště vybaveno zásobníkem nástrojů, který je připojen k PLC skrze vlastní modul a je do něj přiveden stlačený vzduch pro ovládní otevírání a zavírání zásobníku. Zdroj vzduchu je ve skříní řídicího systému obrábění KUKA. V pracovním prostoru robotu musí vyřešeno automatické upnutí součásti.

Automatické upnutí součásti

Automatické upnutí součásti je možné řešit vícero způsoby. Jako možnost se nabízí pneumatický, hydraulický či elektromechanický svěrák. Hlavním požadavkem je možnost zapojení do automatizovaného pracoviště, tedy řízení z PLC ideálně pokynem přímo z NC kódu. Jako způsob vyvození upínací síly byl zvolen pneumatický mechanismus, neboť zdrojem stlačeného vzduchu je současné pracoviště vybaveno. Hydraulický ani elektrický aktuátor svěráku není pro tuto aplikaci tolik vhodný. Pro využití v automatizovaném pracovišti představuje vhodné řešení pneumatický

upínací blok Schunk v kombinaci s vhodným pneumatickým obvodem řízeným PLC. Upínací bloky se rozlišují na verzi s upnutím pomocí pružiny a s upnutím pouze pomocí pneumatického válce. U pružinové verze je uzavírací síla dána pružinou. Díky tomu nabízí tato verze vyšší hodnoty svěrné síly. U verze s pneumatickým válcem je uzavírací síla dána tlakem v obvodu a je tak říditelná. Z toho důvodu byl zvolen upínací blok s pneumatickým válcem bez pružiny. Zvolena byla samostředící verze svěráku. Z hlediska požadované svěrné síly i rozměrů splňoval požadavky nejmenší model KSP plus 64 se svěrnou silou až 4,5 kN při maximálním tlaku 9 Bar a zdvihem 2 mm na čelist. Tento model je zobrazen na obrázku 20. Upínací síla je dostatečná pro plánované použití, lze regulovat použitím redukčního ventilu a zároveň není příliš veliká na to, aby hrozilo poškození upínaných dílců. V případě použití redukčního ventilu je velikost svěrné síly lineárně závislá na tlaku.



Obrázek 20: Pneumatický upínací blok KSP plus 64 [28]

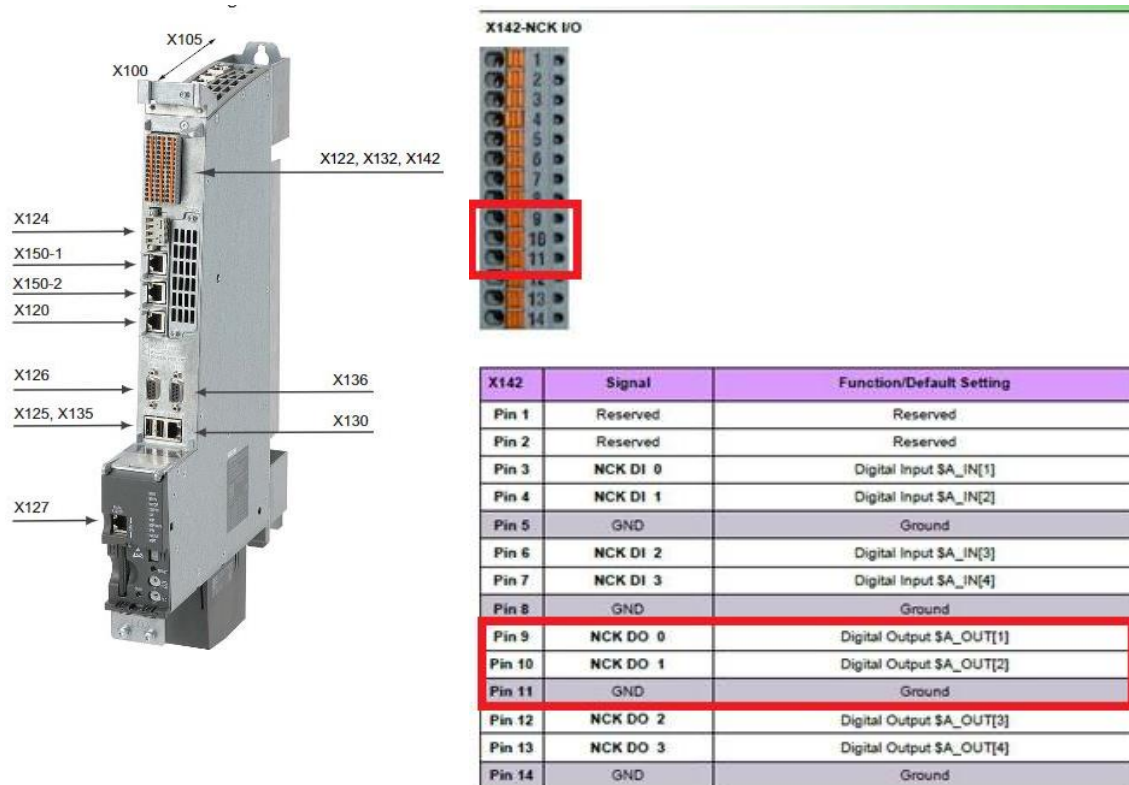
Upínací blok má 2 vstupy ovládající otevření a zavření na boku a 2 na spodní ploše. Spodní vstupy slouží k připojení v případě použití výměnných adaptérů Schunk. Ten v našem případě použit nebude a využity tak budou vstupy boční s připojovacím závitem M5 pro pneumatickou spojku. Pneumatický obvod je obdobný jako v případě koncového efektoru druhého robotického pracoviště a bude ukázán až na jeho příkladu.

Upínací blok je vybaven výměnnými čelistmi, jejichž tvar je navržen s ohledem na upínanou součást. Rozhodující je šířka součástí. Čelisti v otevřené poloze musí

umožnit vložení součásti do přípravku a v uzavřené poloze součást sevřít. Čelisti je možné obrobit z nabízeného polotovaru Schunk.

Upínací blok je připojen na montážní desku z oceli tloušťky 30 mm, která byla vyříznuta pomocí vodního paprsku a následně obrobena na přesný rozměr. Deska umožňuje montáž na pracovní plochu obráběcího robotu, nebo může být upnuta do mechanického svěráku. Na desku je také připojen přípravek sloužící k polohování součástky v pracovišti. Přípravek umožňuje pouze jednu možnost vložení všech typů součástí, eliminuje tak chybu obsluhy. Zároveň plně určuje polohu součásti, tudíž může být pevně daný její souřadný systém v řídicím systému robotu.

PLC řízení



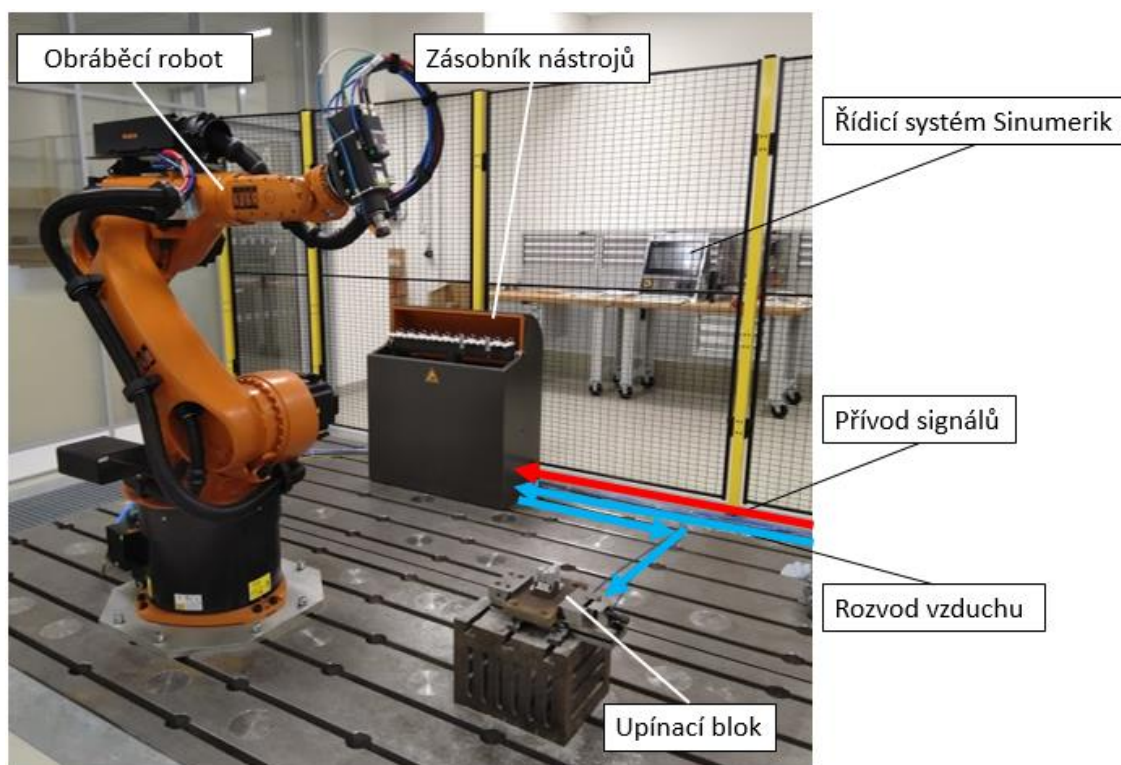
Obrázek 21: Řízení upínacího bloku - Sinumerik NCU [29]

Pro řízení systému je potřeba z řídicího systému Sinumerik ovládat dva digitální výstupy pro ovládání ventilu svěráku a jeden analogový výstup pro ovládání redukčního ventilu. Bylo plánováno využít stávající rozšiřující PLC modul ET200ECO PN umístěný v zásobníku nástrojů pro potřebné digitální vstupy a rozšířit jej o další modul stejné řady s potřebnými analogovými výstupy. Stávající systém však nebyl propojen se systémem Sinumerik. K ovládání ventilu svěráku tak byly využity stávající digitální výstupy přímo na terminálu X142 NCU řídicího systému Sinumerik. Výstupy a uzemnění jsou připojeny

přímo k ventilu a ovládány z řídicího systému pomocí proměnných \$A_OUT[n]. Využity byly piny 9 - \$A_OUT[1], 10 - \$A_OUT[2] a 11 - Ground. Ovládání výstupů je možné přímo z NC kódu příkazem \$A_OUT[n] = true/false.

Realizace

Vzhledem k nemožnosti připojit dodatečné výstupní karty a absenci analogového výstupu byla omezena funkce jen na ovládání ventilu bez možnosti regulace tlaku. Ventil byl umístěn do zásobníku nástrojů, ve kterém byl využit stávající zdroj vzduchu. Ovládací signály a uzemnění bylo do zásobníku nástrojů vedeno čtyřžilovým kabelem skrze stávající kabelové vedení. Z ventilu v zásobníku nástrojů poté vedou dvě hadice až do upínacího bloku v pracovním prostoru. Pracoviště je zobrazeno na obrázku 22. Modře je znázorněn tok stlačeného vzduchu a červeně tok elektrických signálů a uzemnění.



Obrázek 22: Pracoviště gravírování

6.2 Pracoviště montáže

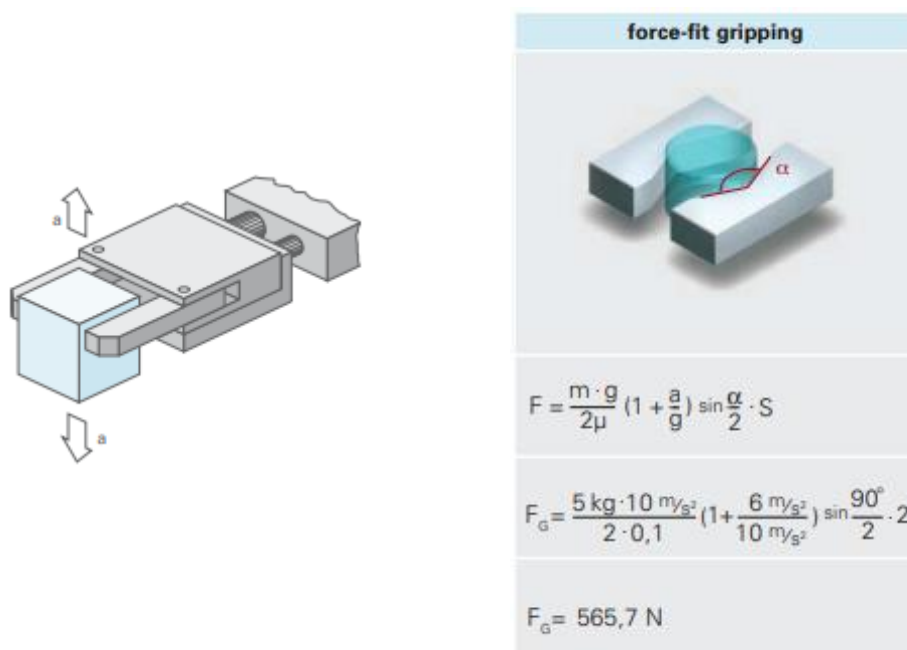
Uvažované pracoviště montáže je vybaveno robotem KUKA KR 60 HA na lineárním pojezdu. Nosnost tohoto robotu je až 30 kilogramů a nebude zdaleka překročena. Robot je řízen systémem Kuka KR C4 a zároveň je vybaven PLC Beckhoff pro řešení bezpečnostních vstupů. Tento robot nebyl vybaven koncovým efektem, který tak musel být navržen. Pracoviště není vybaveno zdrojem stlačeného vzduchu, ten tak bude muset být k robotu přiveden z dostupné přípojky. Dále bylo pracoviště vybaveno montážním pracovištěm, které bude popsáno v kapitole věnující se technologii výroby.

Vzhledem k plánovanému způsobu montáže byl zvolen koncový efektor se dvěma nástroji – vakuovou přísavkou pro manipulaci s menšími dílky flash čipu a krytu a paralelní úchopná hlavice (chapatlo) pro manipulaci s tělem a s finálním výrobkem. Paralelní úchopné hlavice jsou nabízeny s elektrickým a pneumatickým pohonem. Vzhledem k tomu, že bude na koncovém efektoru i přísavka, je nutné přivádět vzduch. Použití pneumatické úchopné hlavice je tak možné a cenově vychází výhodněji než obdobná elektrická varianta.

Výběr úchopné hlavice

Hlavní kritérium výběru hlavice je její nosnost a zdvih čelistí. Zvažována v tomto případě byla také použitelnost zvolené hlavice pro jiné účely v rámci využití robotu v Testbedu. Vzhledem k tomu byla zvolena hlavice s větším zdvihem čelistí i nosností, než by bylo zapotřebí pro modelovou výrobu. Komponenty v modelové výrobě váží do 100 g, uvažovaná použitelnost je až pro 0,5 kg. Zvolena byla úchopná hlavice od společnosti Schunk MPG-plus 40 s doporučenou nosností 0,7 kg. Pro ověření výběru byl proveden kontrolní výpočet potřebné síly úchopu pro maximální zrychlený pohyb dle literatury výrobce [30]. Výpočtový vztah je uveden na obrázku 23. Uchycení bude řešeno skrze silový styk s rovnoběžnými dosedacími plochami.

Uvažovaný koeficient tření pro nejhorší možný případ plast – ocel je uvažován μ 0,2, koeficient bezpečnosti S je uvažován 2 a zrychlení a 20 ms^{-2} . Úhel alfa, který určuje úhel úchytu součásti vůči prstům, je uvažován 180° (prst není prizma).



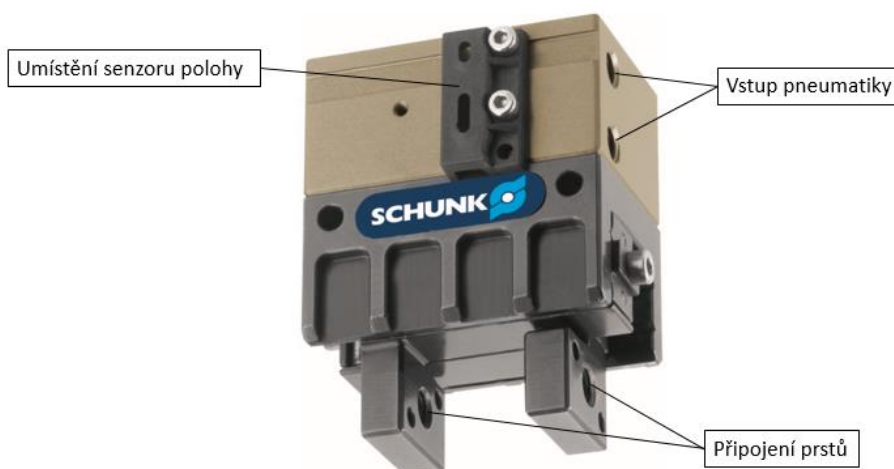
Obrázek 23: Výpočet potřebné uzavírací síly F_G [30]

$$F_G = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \mu} \cdot \left(1 + \frac{a}{g}\right) \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot S \quad (1)$$

$$F_G = \frac{0,5 \cdot 9,81}{2 \cdot 0,2} \cdot \left(1 + \frac{20}{9,81}\right) \cdot \sin \frac{180}{2} \cdot 2 \quad (2)$$

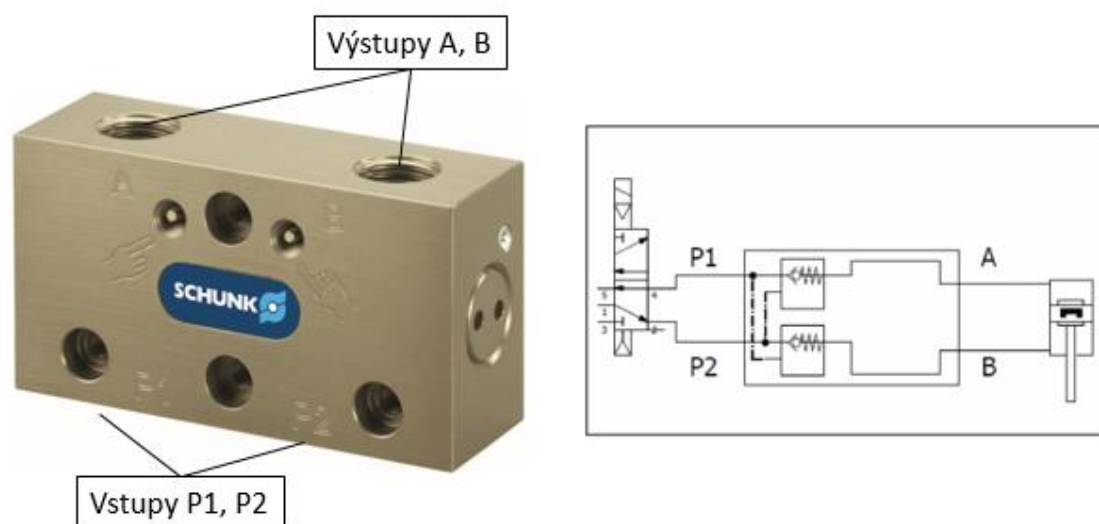
$$F_G = 75,5 \text{ N} \quad (3)$$

Uzavírací síla zvoleného modelu MPG plus 40 je 135 N při maximálním tlaku 6 Bar. Na tlaku je síla lineárně závislá, je možné ji snížit použitím redukčního ventilu v tlakovém obvodu. Zdvih na jednu čelist je 6 mm. Vybraný model úchopné hlavice zobrazuje obrázek 24. Bude dále vybaven magnetickým snímačem polohy MMS-P, který lze jednoduše umístit do připravené pozice.



Obrázek 24: Pneumatická úchopná hlavice Schunk MPG plus 40 [31]

Pneumatická hlavice musí být z hlediska bezpečnosti zajištěna proti výpadku vzduchu a elektřiny. Zajištění lze realizovat mechanicky pružinou integrovanou v hlavici. V tomto případě však ztrácíme možnost regulovat sílu úchopu. Druhou možností je využití pneumatického ventilu pro udržení tlaku integrovaného v obvodu. Ten v případě poruchy zabrání odvzdušnění modulu. Tuto součást nabízí společnost Schunk jako doplňkový produkt ke svým produktům pod označením SDV-P. V obvodu byl použit model SDV-P 04. Obrázek součástky a schéma funkce je na obrázku 25.



Obrázek 25: Schunk SDV-P [32]

K pneumatické hlavici byly dále navrženy vhodné prsty pro úchop těla USB. Pro jejich výrobu lze využít nabízeného polotovaru firmy Schunk, nicméně pro tuto aplikaci byla zvolena metoda 3D tisku z plastu. Prsty musí být navrženy tak, aby v otevřené poloze umožnily úchop předmětu a v zavřené poloze dosedly na předmět, aniž by byla hlavice zcela uzavřena. Tím je manipulovaný předmět sevřen. Zároveň musí být tvar prstů takový, aby nedošlo ke kolizi při pracovním pohybu. Omezujícím faktorem je také hmotnost a celková délka prstu, neboť s celkovou délkou se snižuje úchopová síla. U modelu MPG plus 40 je maximální délka 50 mm a maximální hmotnost 80 g.

Výběr přísavky

K manipulaci s menšími díly flash čipu a krytu nelze použít úchopnou hlavici. Vzhledem k velikosti by byly obtížně uchopitelné, a i samotná montáž by se s úchopnou hlavicí špatně realizovala. Z toho důvodu byla navržena vakuová přísavka jako druhý nástroj koncového efektoru. Maximální velikost přísavky je dána nejmenším rozměrem uchopované součástky, který je 13 mm. Minimální průměr přísavky lze určit dle podkladů společnosti SMC z následujícího vzorce za předpokladu požadované nosnosti.

Ta je v našem případě pro díly manipulované přísavkou maximálně 100 g (1 N). Vysokým součinitelem bezpečnosti je pak zajištěna různá hodnota součinitele tření pro různé materiály.

$\varnothing D$ minimální průměr přísavky [mm]
 P podtlak vakua [kPA]
 W zátěž [N]
 t bezpečnost [-]
 pro sílu působící při zvedání kolmo na plochu přísavky cca 4

$$\varnothing D = \sqrt{\frac{4}{3,14} \cdot \left(\frac{1}{P}\right) \cdot \frac{W}{n} \cdot t \cdot 1000} \quad (4)$$

$$\varnothing D = \sqrt{\frac{4}{3,14} \cdot \left(\frac{1}{70}\right) \cdot \frac{1}{1} \cdot 4 \cdot 1000} \quad (5)$$

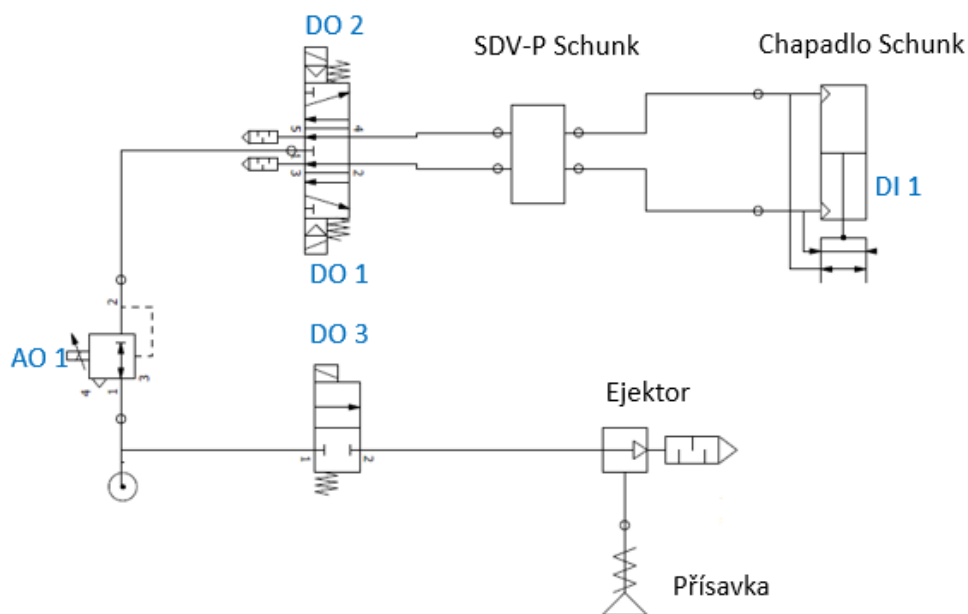
$$\varnothing D = 8,5 \text{ mm} \quad (6)$$

Vypočtená hodnota je minimální možná. Neboť lze využít i větší variantu a výběr je omezen na vyráběné velikosti, byla vybrána přísavka o průměru 10 mm. Po konzultaci se společností SMC dodávající prvky pneumatického obvodu byl určen materiál a tvar přísavky s ohledem na materiál krytu a flash čipu. Specifikována byla přísavka s měchem z materiálu NBR (Nitril Butadien Rubber) ZP3-10BN s držákem. Držák byl vybrán s axiálním přívodem vakua a s odpružením až 6 mm. Toto odpružení umožňuje integraci lisovacího přípravku, který může uchopené předměty dotlačit při montáži. Vakuum zajišťuje jednostupňový ejektor ZH05BS schopný vytvářet vakuum až -88 kPA. Ejektor je ovládán elektromagnetickým 2/2 ventilem. Sestava byla společností SMC vyzkoušena s oběma uchopovanými díly, čímž byla ověřena správnost výběru před nákupem.

Návrh pneumatického obvodu

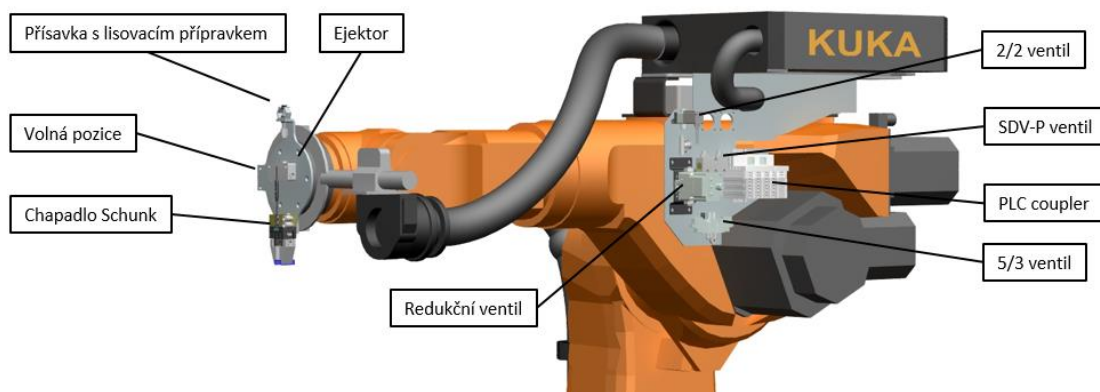
Pneumatický obvod ovládající koncový efektor se skládá z jednotky úpravy vzduchu a ze 2 částí – části pro úchopnou hlavici a části pro přísavku. Vzhledem k požadavku na ovládání síly úchopu byl do této části obvodu zakomponován redukční ventil ovládaný analogovým vstupem ITV1050. Pro řízení úchopu byl zvolen elektromagnetický 5/3 ventil s otevřenou střední polohou SY3420. Ventil je řízen digitálními vstupy. K zajištění bezpečnosti při poruše byl použit ventil SDV-P popsaný výše, z důvodu této aplikace je použit ventil se střední odvětranou polohou. Stejně prvky byly využity pro pneumatický obvod pneumatického svěráku na pracovišti gravírování. Ve větvi přísavky byl využit elektromagnetický 2/2 ventil SY100 ovládaný digitálním vstupem a ejektor.

K propojení prvků byly využity pneumatické spojky a hadice průměru 6 mm z důvodu standardizace všech součástí. Jako zdroj vzduchu byl využit centrální rozvod na pracovišti s využitím jednotky úpravy vzduchu. Na obrázku 26 jsou zobrazeny 2 hlavní větve se vstupy a výstupy PLC, celý pneumatický obvod je v příloze III.



Obrázek 26: Základní prvky pneumatického obvodu pracoviště montáže
Modře vyznačenými vstupy

Po specifikaci prvků byla navrženo konstrukční uspořádání koncového efektoru a pneumatického obvodu. Koncový efektor je připojen k přírubě robota a nese přísavku s ejektorem a úchopnou hlavici. Je navržen jako ohýbaný výpalek z hliníku tloušťky 4 mm. Pozice pro nástroje jsou po 90°, je zde navržena třetí pozice pro případný další nástroj, například odměřovací trn. Pneumatický obvod je montován na ocelový výpalek tloušťky 3 mm připojený na třetí osu robota. Na ten je připojen i PLC coupler k řízení pneumatického obvodu. K montáži je využita DIN lišta.



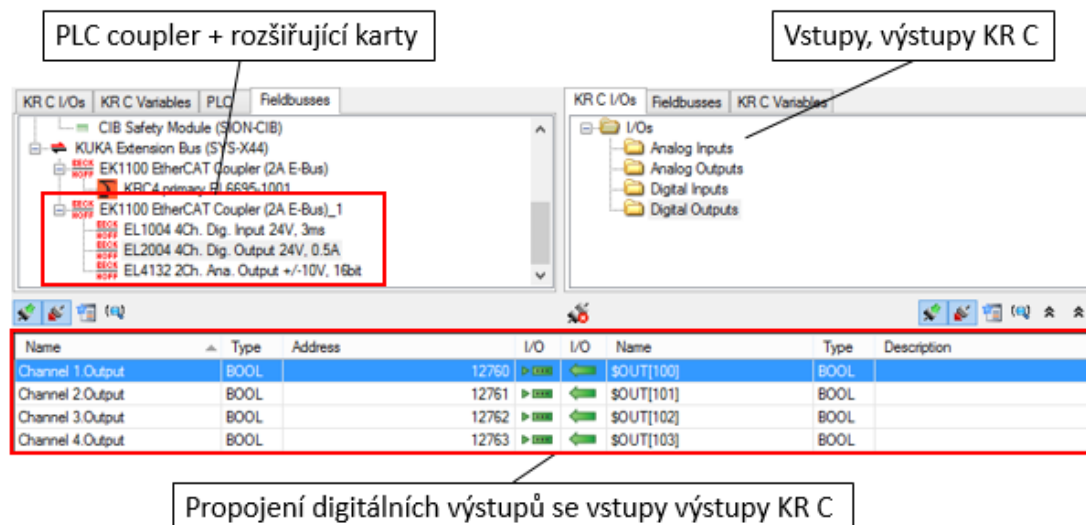
Obrázek 27: CAD model úpravy pracoviště montáže

PLC Řízení

Řízení koncového efektoru zajišťuje PLC Beckhoff připojené k řídicímu systému KUKA KR C4. Pro řízení bylo potřeba zajistit analogový výstup 0–10 V (AO) pro ovládání redukčního ventilu a tím hladiny tlaku, 2 digitální výstupy (DO) pro ovládání ventilu polohy chapadla, 1 digitální vstup (DI) pro senzor polohy chapadla a jeden digitální výstup pro ventil ejektoru. Dále bylo třeba zajistit napájení a zemnění. K pneumatickému obvodu byl proto umístěn PLC coupler EK1100 firmy Beckhoff se třemi rozšiřujícími kartami. AO kartou EL4132, DO kartou EL2004 a DI kartou EL1004. Zobrazení použitého coupleru je v příloze. PLC coupler je připojen k hlavnímu PLC skrze profinet kabel integrovaný ve struktuře stroje, k napájení byl také využit integrovaný kabel, využity byly 2 piny. Výstupy a vstupy jsou propojeny do řídicího systému skrze nastavení IO Mapping v KUKA Workvisual, viz obrázek 28. V programovacím dialogu KR C4 je tak možné výstupy přímo ovládat dle tabulky 4.

Tabulka 4: Propojení proměnných v KRC 4 s PLC, propojení PLC s pneumatickým obvodem

Označení	Adresa PLC	Proměnná	Pneu obvod	Funkce
EL 1004 DI1	728	\$IN[100]	DI 1	Čidlo polohy
EL 1004 DI2	729	\$IN[101]		
EL 1004 DI3	730	\$IN[102]		
EL 1004 DI4	731	\$IN[103]		
EL 2004 DO1	12760	\$OUT[100]	DO 1	Otevřít chapadlo
EL 2004 DO2	12761	\$OUT[101]	DO 2	Zavřít chapadlo
EL 2004 DO3	12762	\$OUT[102]	DO 3	Spustit ejektor
EL 2004 DO4	12763	\$OUT[103]		
EL 4132 AO1	12768	\$ANOUT[31]	AO 1	Nastavit tlak
EL 4132 AO2	12784	\$ANOUT[32]		



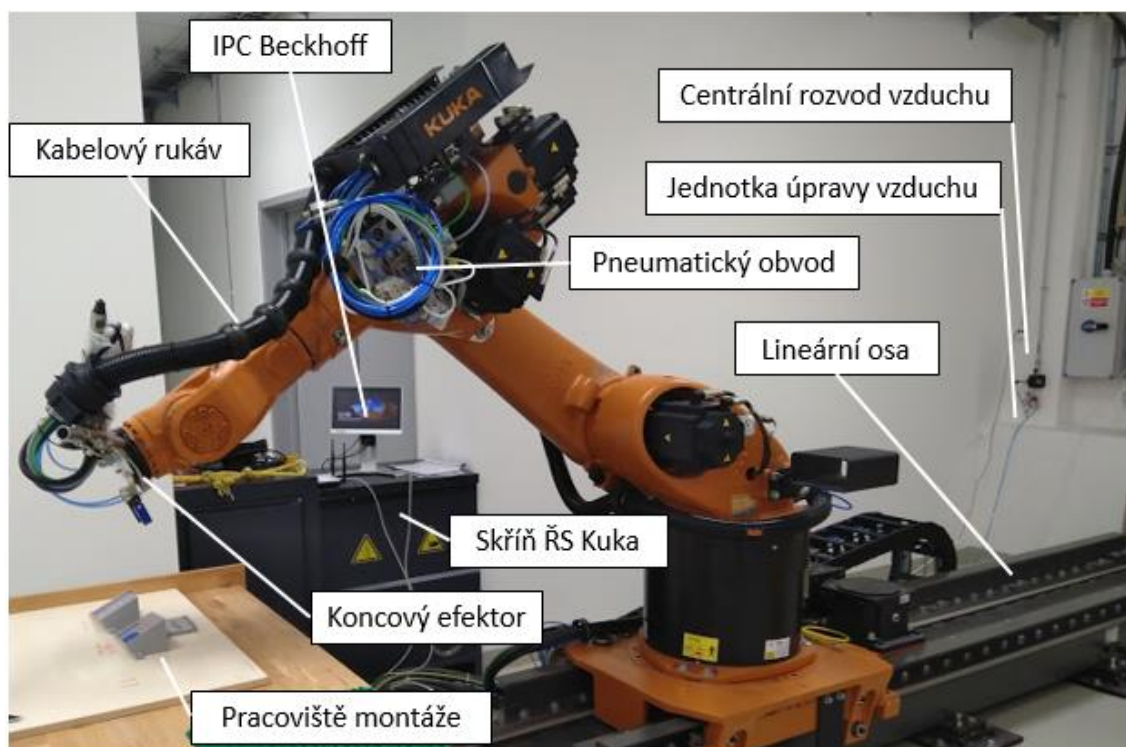
Propojení digitálních výstupů se vstupy výstupy KR C

Obrázek 28: IO Mapping – digitální výstupy v KUKA Workvisual

Redukční ventil byl nastaven tak, aby při signálu 10 V nastavil tlak na 6 Bar, tedy maximální hodnotu v systému, při signálu 0 V na hodnotu 2 Bar, nejnižší dovolenou provozní hodnotu pro chapadlo.

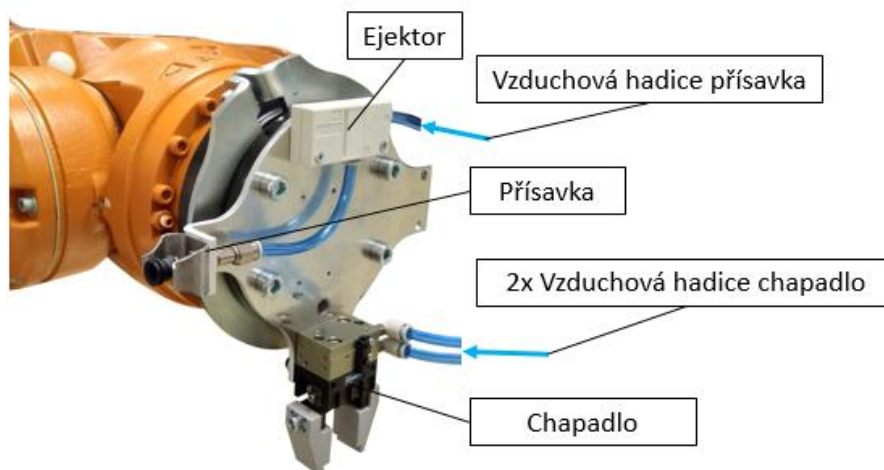
Realizace

Při montáži prvků bylo třeba vyřešit přívod vzduchu, energie a signálů s uvažováním lineárního pojezdu robota. Využity byly stávající nevyužité kabely pro přívod energie a kabel profinetu, které byly vedeny od třetí osy robota (umístění pneumatického obvodu a coupleru) až ke konci kabelového řetězu na lineární ose a následně do PLC ve skříni řídicího systému. Pro propojení koncovky profinetu na třetí ose s couplerem byl přidán krátký profinet kabel. Byla přidána hadice z jednotky úpravy vzduchu umístěné u centrálního rozvodu do pneumatického obvodu na třetí ose. Vede kabelovým řetězem po lineární ose k patě robota a poté kabelovým rukávem. Z pneumatického obvodu vedou 3 hadice až ke koncovému efektoru kabelovým rukávem.

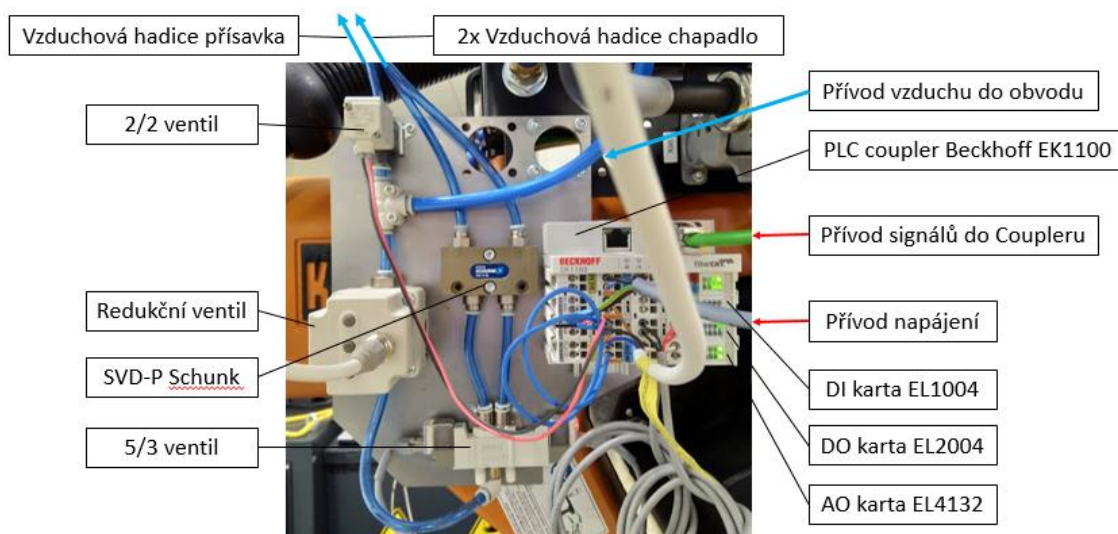


Obrázek 29: Realizace pracoviště montáže

Obrázek 29 zobrazuje celkový pohled na pracoviště. Ukazuje umístění všech komponent. Níže je podrobně zobrazen koncový efektor na obrázku 30 a pneumatický obvod na obrázku 31. Na obrázcích je modře vyznačen tok vzduchu a červeně tok elektrických signálů a napětí.



Obrázek 30: Realizace koncového efektoru



Obrázek 31: Realizace pneumatického obvodu a řízení

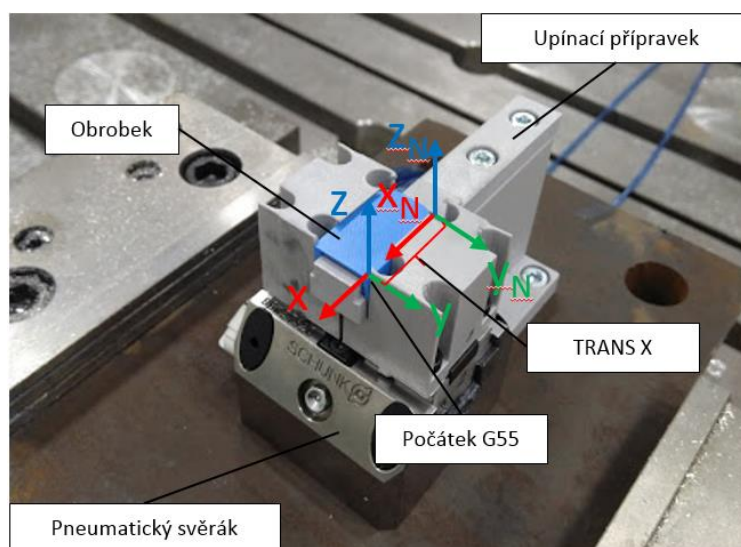
7 Technologická příprava výroby

Pro realizaci modelové výroby byla potřebná kompletní technologická příprava výroby. Bylo zapotřebí navrhnout technologii frézování včetně gravírování a technologii montáže.

7.1 Frézování

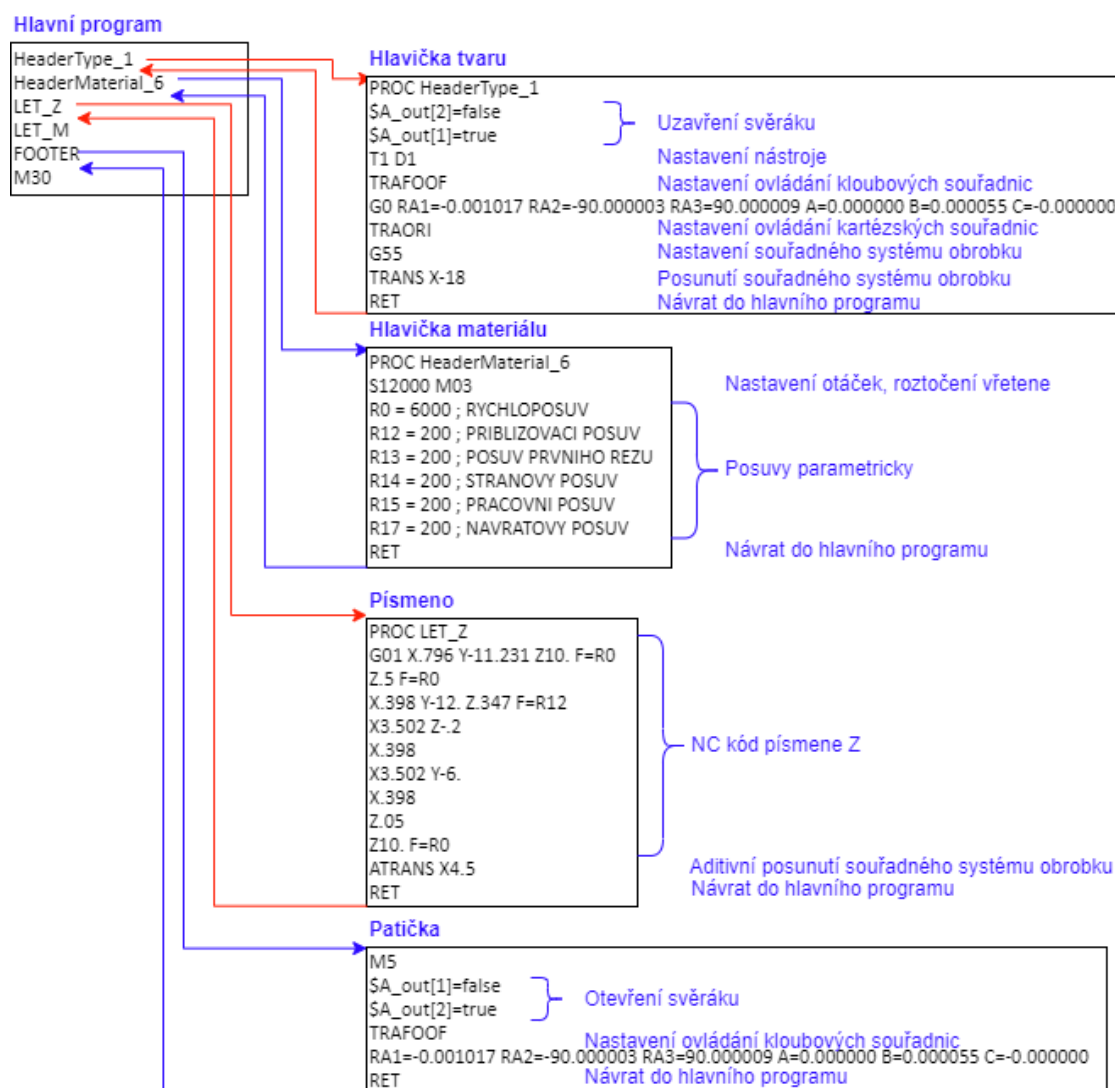
Frézování hliníkového těla USB je navrženo na stroji AXA jako tříosé obrábění. Stroj je vybaven řídicím systémem MEFI. Návrh technologie probíhal v CAM programu Siemens NX 10. Byly specifikovány vhodné nástroje, technologické podmínky a vytvořeny dráhy nástroje pro hrubování, seminfiniš a finiš těla USB. Ve výsledku výrobní operace na stroji AXA nebyla realizována, podrobnosti proto nebudou rozváděny.

Gravírování probíhá na robotu KUKA vybaveném řídicím systémem Siemens Sinumerik 840D. Zde je potřeba vyřešit variabilitu gravírovaných nápisů. Uživatel může zadat libovolnou sekvenci znaků. Tato sekvence je společně s informací o tvaru výrobku a použitém materiálu použita k vytvoření a navolení hlavního programu (main). Pro funkci je klíčová myšlenka, že program main volá postupně podprogramy na základě získaných informací. Skládá se tak z hlavičky pro nastavení tvaru, hlavičky pro nastavení materiálu a následně z jednotlivých písmen. Program je zakončen společným podprogramem paty. Jeho funkce je založena na možnostech řídicího systému Sinumerik 840D pracovat s podprogramy a posouvat počátek v rámci programu příkazy TRANS, ATRANS. Využití funkce TRANS k posunutí souřadného je zobrazeno na obrázku 32.



Obrázek 32: Upnutý obrobek s vyznačením posunutí souřadného systému

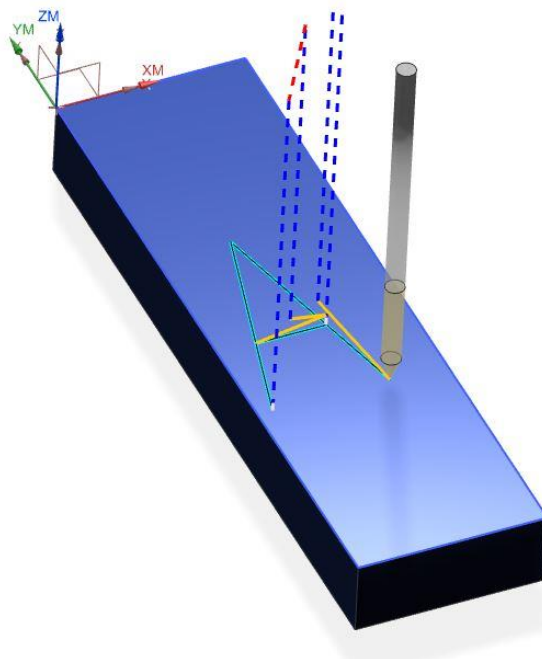
V hlavičce tvaru je řešeno sevření automatického svěráku, nastavení souřadného systému a jeho posunutí, nastavení nástroje a nastavení funkce TRAORI (transformace z kloubových souřadnic robota do kartézského souřadného systému). V hlavičce materiálu jsou řešeny technologické podmínky jako otáčky a rychlost posuvu. Jednotlivá písmena obsahují příslušný NC kód a následně posunutí souřadného systému, aby mohlo být gravírováno další písmeno. Pata programu uvolňuje svěrák a vrací robot do bezpečné polohy. Funkci zjednodušené sady programů zobrazuje obrázek 33. Šipky značí průchod programu, modře jsou značeny komentáře k funkci jednotlivých bloků.



Obrázek 33: Program gravírování uživatelem voleného textu

Drahy nástroje gravírování jednotlivých písmen byly vytvořeny v programu Siemens NX CAM pomocí funkce Planar Text. K vygenerování NC kódu byl následně použit generický postprocesor pro Sinumerik 840D, část s drahou nástroje byla upravena dle požadavků programu (parametrické posuvy) a vložena do předpřipravené šablony

podprogramu písmen. Programovaná jsou písmena A-Z a číslovky. Pokud by byl uživatelem zvolen neprogramovaný znak, vyhlásí řídicí systém chybu. Na obrázku 34 je tvorba programu písmena A v prostředí Siemens NX 10.



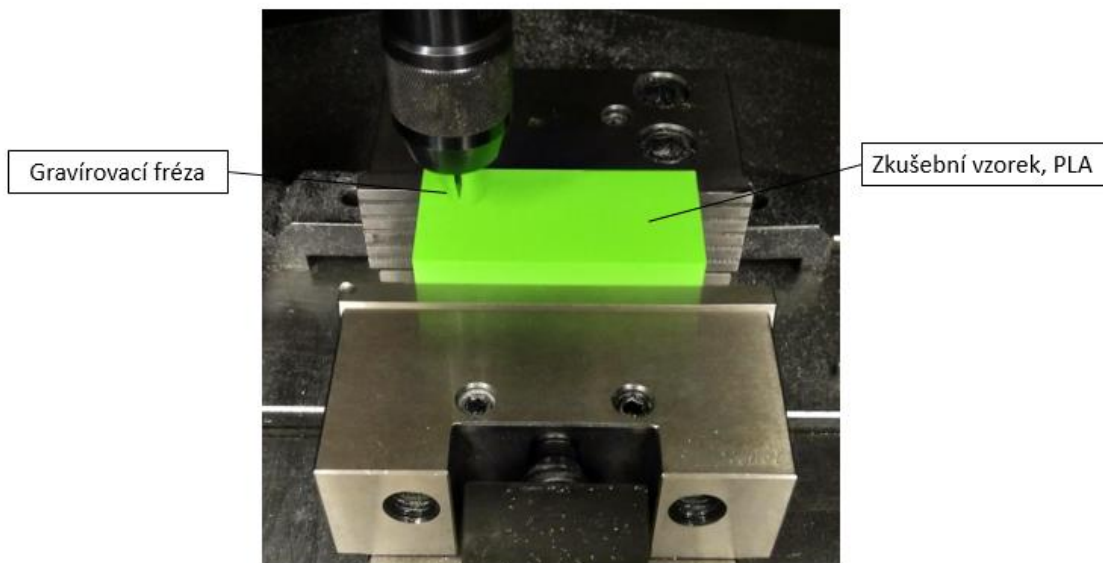
Obrázek 34: Program obrábění písmene A, Siemens NX 10

Jako nástroj byla zvolena půlkruhová karbidová gravírovací fréza s jedním břitem o úhlu 30 stupňů a zakončením 0,1 mm. Vřetenem umístěné na robotu má rozhraní HSK E40. Fréza je upnuta v nástrojovém držáku Haimer E40.025.32 pomocí kleštiny ER32 4-3 mm.

K volbě technologických podmínek byl nejprve obroběn testovací vzorek frézovaného materiálu. Byly ozkoušeny různé hodnoty otáček a posuvů. Při obrábění plastů je obecně využíváno vysoké řezné rychlosti. U vytištěných plastových dílců však může docházet k tavení materiálu. Ze zkoušek vplynuly jako nejvhodnější parametry v následující tabulce.

Tabulka 5: Řezné podmínky gravírování

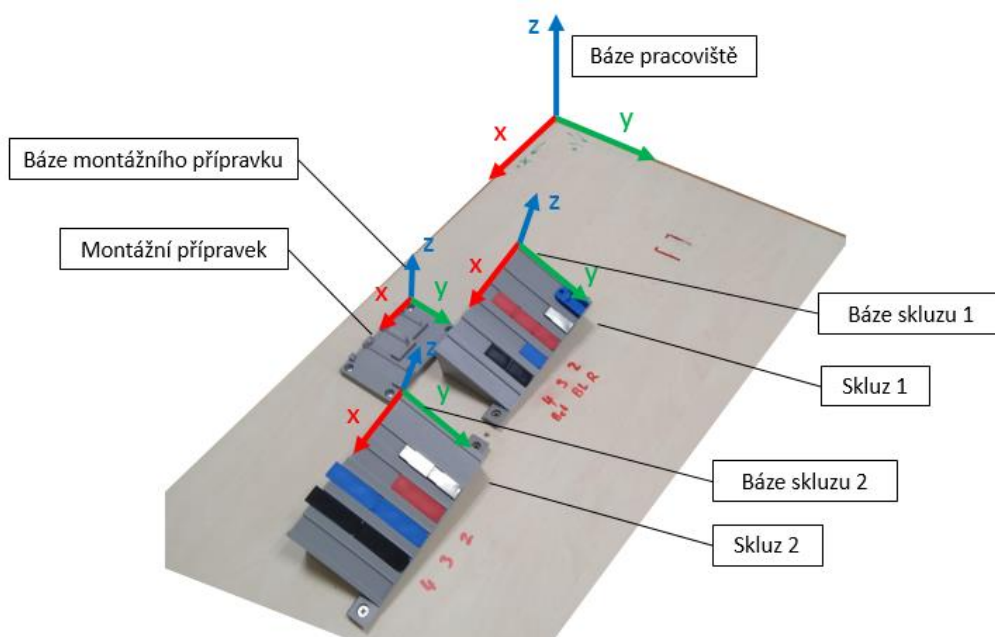
Nástroj	Gravírovací fréza
Otáčky S	12 000 ot/min
Pracovní posuv F	200 m/min
Hloubka řezu a_p	0,3 mm
Směr řezu	Sousledný
Chlazení	Ano, vzduch



Obrázek 35: Zkouška řezných podmínek technologie gravírování

7.2 Montáž

Montážní robot KUKA je ovládán řídicím systémem KR C4. Při připojení stroje do systému MES je ovládán externě z PLC, které volí příslušný program a spouští výrobu dle pokynů uživatele. Tato funkce je popsána v kapitole věnující se systému MES. Výsledkem je volba programu dle navoleného tvaru a materiálu. Tyto programy musely být připraveny pro každou verzi výrobku. Bylo navrženo pracoviště montáže, které umožňuje zakládání všech součástí výrobku a obsahuje montážní přípravek, ve kterém výroba probíhá. Pracoviště je zobrazeno na obrázku 36.

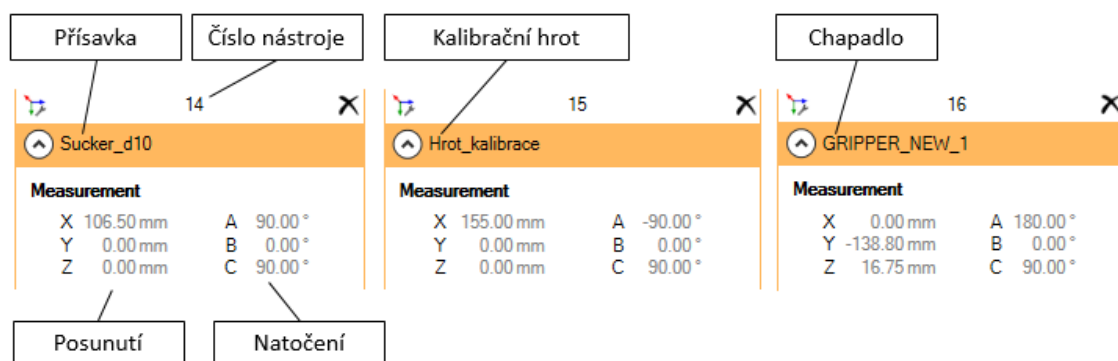


Obrázek 36: Montážní pracoviště

Montážní pracoviště se skládá ze dvou skluzů a z montážního přípravku. Přípravky byly vytištěny na 3D tiskárně Prusa. Jeden ze skluzů je určen pro všechny typy výrobku delší varianty, druhý je určen pro všechny typy výrobku kratší varianty. Byly navrženy tak, aby pojaly všechny varianty součástí výrobků a zároveň jasně definovaly jejich polohu v prostoru. Z tohoto důvodu je skluz nakloněn ve dvou rovinách. Musí také umožňovat úchop všech součástí koncovým efektozem tak, aby nedocházelo ke kolizím robotu a pracoviště.

Montážní přípravek umožňuje zakládání všech tvarů součástí do tří pozic (pozice pro delší tvar je sdílena oběma verzemi). Montážní pozice jsou po krajích zkoseny pro navádění součásti při vkládání, větší zkosení jsou v rozích pozic. Postupně je vkládáno tělo USB chapadlem, následně je do něj vložen flash čip přísavkou a poté je tělo uzavřeno krytem pomocí přísavky. Kryt je dotlačen lisovacím nástrojem na přísavce.

Programování pohybů robota probíhá v jazyku KRL (Kuka robot language), který je obdobou NC kódu. Pro snadnější programování bylo využito možností souřadných systémů nástrojů a bází robotu v řídicím systému. Báze je označení souřadného systému pracovního prostoru, v našem případě například přípravku. Souřadné systémy bází jsou zobrazeny na obrázku pracoviště. Souřadné systémy nástrojů byly nastaveny tak, aby při nastavení nulových souřadnic natočení v kartézském systému báze byl nástroj správně orientován v pracovním prostoru. Posunutí od středu příruby byly nastaveny tak, aby v nulových souřadnicích středový bod nástroje (tool center point) souhlasil s počátkem kartézského souřadného systému báze. Vzdálenosti byly odečteny v CAD modelu sestavy a ověřeny. Chapadlo i přísavka tak mají vlastní souřadný systém. Stejně tak má vlastní souřadný systém nástroj hrot, který byl použit k odměřování souřadných systémů bází. Souřadné systémy nástrojů z KUKA WorkVisual zobrazuje obrázek 37.



Obrázek 37: Souřadné systémy použitých nástrojů v KUKA WorkVisual

Báze byly nastaveny za pomoci kalibračního hrotu tříbodovou metodou. Nástrojem o známém souřadném systému je nejprve určen počátek souřadného systému nastavované báze, poté další bod na ose x a finálně bod v rovině xy . Tím je jasně určen souřadný systém nastavované báze. Báze přípravků je natočena dle jejich orientace v prostoru. Při programování tak stačí určit příslušnou bázi a nástroj. Při nastavení nulové rotace ve všech osách poté bude nástroj orientován kolmo na pracovní rovinu xy .

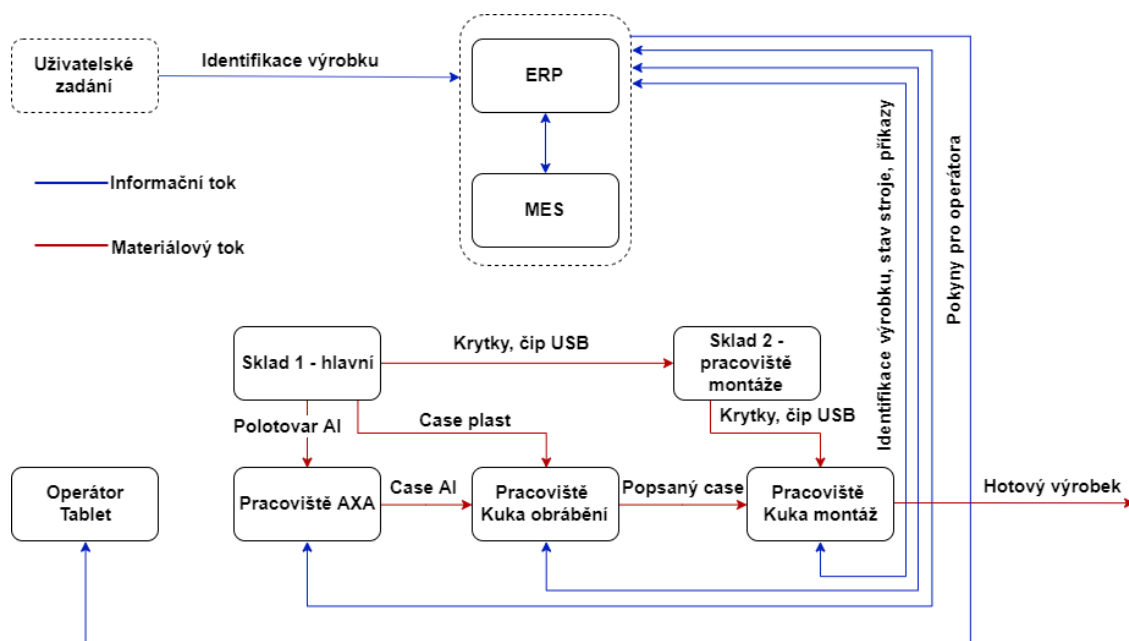
Samotné programování poté probíhá jako sekvence pohybů v určeném souřadném systému a ovládání digitálních vstupů a výstupů. Logika části jednoho programu bez vypisování jednotlivých pohybů je zobrazena na obrázku 38. Červeně jsou značené proměnné, vstupy a výstupy, modře pohyby.

PTP HOME	;Navrat do výchozí polohy
V_pohyb = 0.3	;nastaveni promenne rychlosti pohybu
V_z = 0.05	;nastaveni promenne rychlosti pohybu v z
V_z_pomalu = 0.01	;nastaveni promenne rychlosti pomaleho pohybu v z
\$vel.cp=V_pohyb	;nastaveni rychlosti
LIN_REL {Y -1000, E1 -1000}	;Pojezd lin osy na určenou pozici
\$base=base_data[16]	;Nastaveni souradneho systemu spadu 1 - 16
\$tool=tool_data[16]	;Nastaveni souradneho systemu chapadla - 16
\$ANOUT[31]=10	;Nastaveni redukcnioho ventilu - 10 V_pohyb
;=====TELO=====	
\$out[101]=false	;Zruseni signalu uzavreni chapadla
\$out[100]=true	;Otevreni chapadla
;Najeti na pozici uchopu tela USB	
;Uchop	
\$base=base_data[17]	;Nastaveni souradneho systemu montazee - 17
;Vlozeni do montazniho pripravku	
;Pusteni	
;=====CIP=====	
\$base=base_data[16]	;Nastaveni souradneho systemu spadu 1 - 16
\$tool=tool_data[10]	;Nastaveni nastroje prisavka - 10
;Najeti na pozici uchopu cipu	
\$out[102]=true	;Ovladani ejektoru - prisati
\$base=base_data[17]	;Nastaveni souradneho systemu montazee - 17
;Montaz USB cipu	
\$out[102]=false	;Ovladani ejektoru - vypnout
WAIT SEC 2	;Prodleva k pusteni soucasti
;=====KRYT=====	

Obrázek 38: Část montážního programu

8 Návrh řízení výroby MES systémem

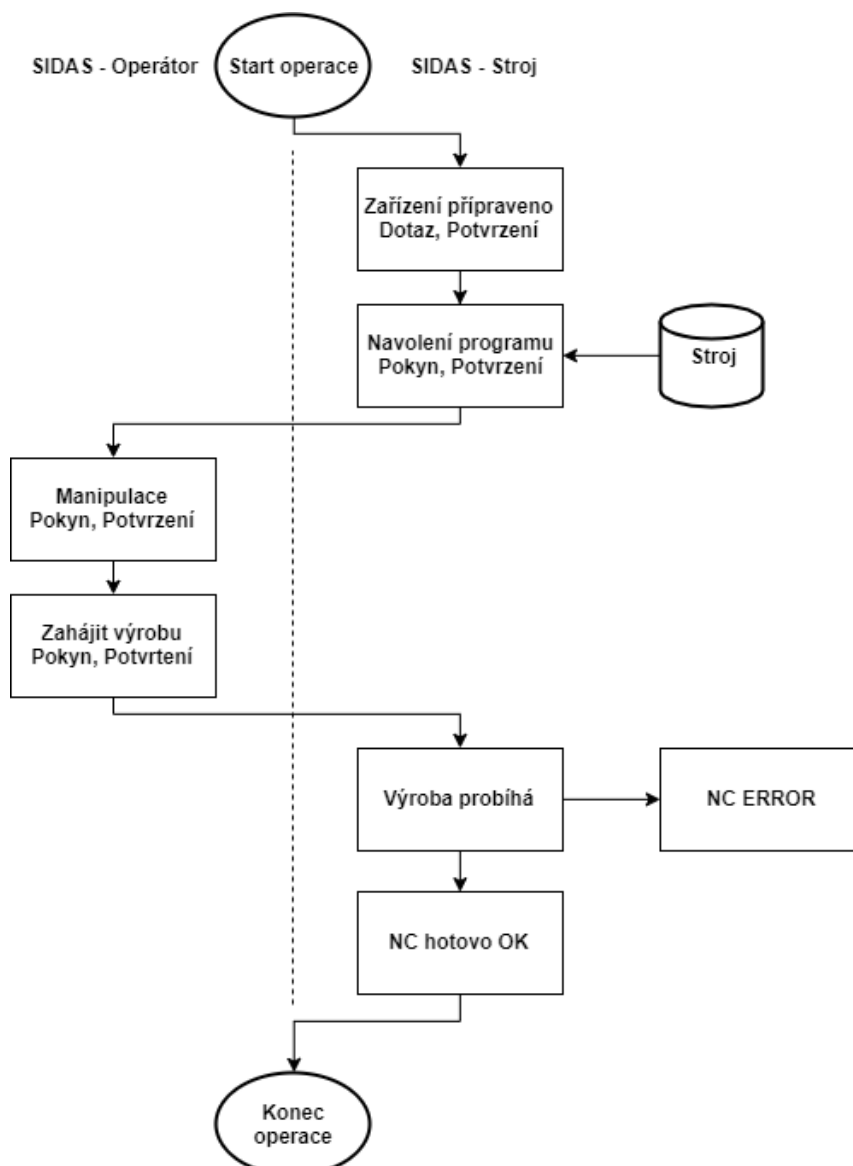
V první fázi realizace nebylo uvažováno začlenění ERP systému ani datové propojení se systémem PLM. Jejich funkce musí tak být suplovány systémem MES SIDAS nebo musí být nahrazeny jiným způsobem. Samotný MES systém a jeho aplikace na modelovou výrobu byla realizována společností SIDAT, popis se tak zaměřuje především na funkci systému a souvislost s výrobním procesem. V této prvotní fázi bylo hlavním cílem zkouška možností propojeného systému, realizována tak byla pouze sekvenční výroba, která má jasně danou posloupnost operací. Nejsou také uvažovány skladové zásoby a předpokládá se dostupnost všech vstupních materiálů. To celý systém zjednodušuje a lze sestavit zjednodušený informační a materiálový tok pracovištěm zobrazený na obrázku 39. ERP a MES je v tomto případě uvažováno jako propojení objednávkové aplikace a MES systému SIDAS.



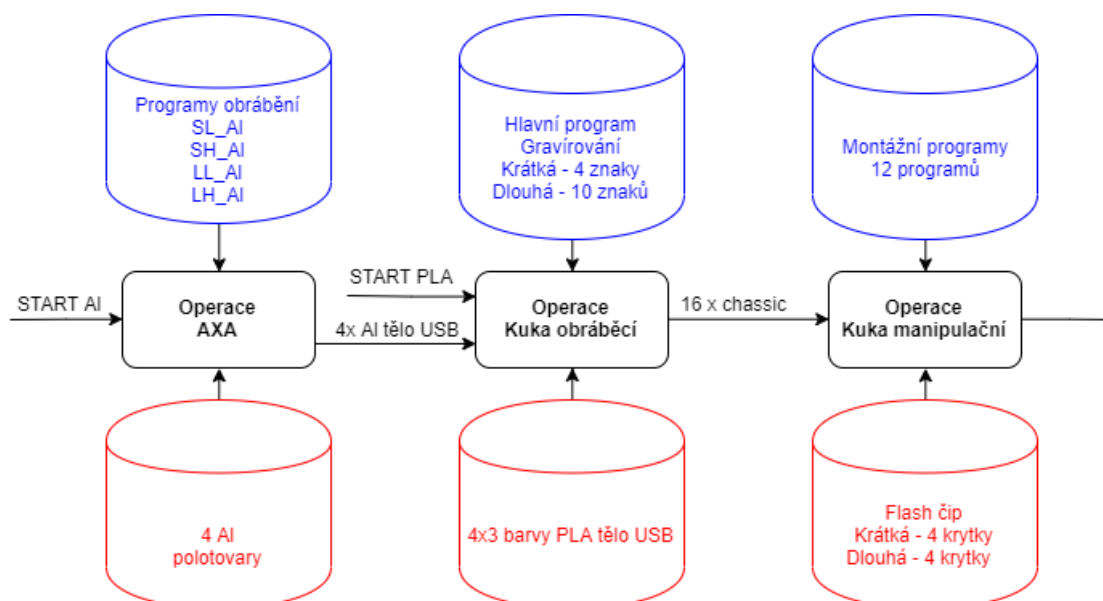
Obrázek 39: Informační a materiálový tok pracovištěm

Na začátku procesu stojí definování objednávky uživatelem v systému ERP. ERP systém je modelovém příkladu nahrazen objednávkovým systémem v uživatelském rozhraní. Uživatelem jsou definovány požadované parametry výrobku – tj. tvar, materiál (tedy i barva) a text. Tyto parametry jednoznačně identifikují výrobek kódem, jak ukazuje obrázek 15 a tabulka 1. U tvaru i materiálu lze určit typ číslovkou, u textu je třeba využít proměnnou typu string o délce textu. U krátkých verzí je tato délka 4 znaky, u dlouhých 10 znaků.

Dle kódu je výrobek identifikován pro MES systém a pro všechny operace na strojích. Pokud je objednávka odbavena operátorem, přechází do MES systému. Ten nadále řídí výrobu a zasílá informace strojům a operátorovi dle definovaného scénáře pro daný typ výrobku. Celý výrobní proces je rozdělen na operace na jednotlivých strojích a ty jsou dále rozděleny na jednotlivé příkazy (kroky), jak ukazují schémata na obrázku 40 a obrázku 41. Informace o průběhu výroby (start programu, chyba apod.) jsou ze strojů zasílány MES systému a vyhodnocovány pro pokračování výrobní sekvence. Klíčové pro funkci celého systému je propojení MES systému s výrobními stroji.



Obrázek 40: Příkazy (kroky) jednotlivých operací



Obrázek 41: Průchod pracovištěm s materiálovými a informačními vstupy

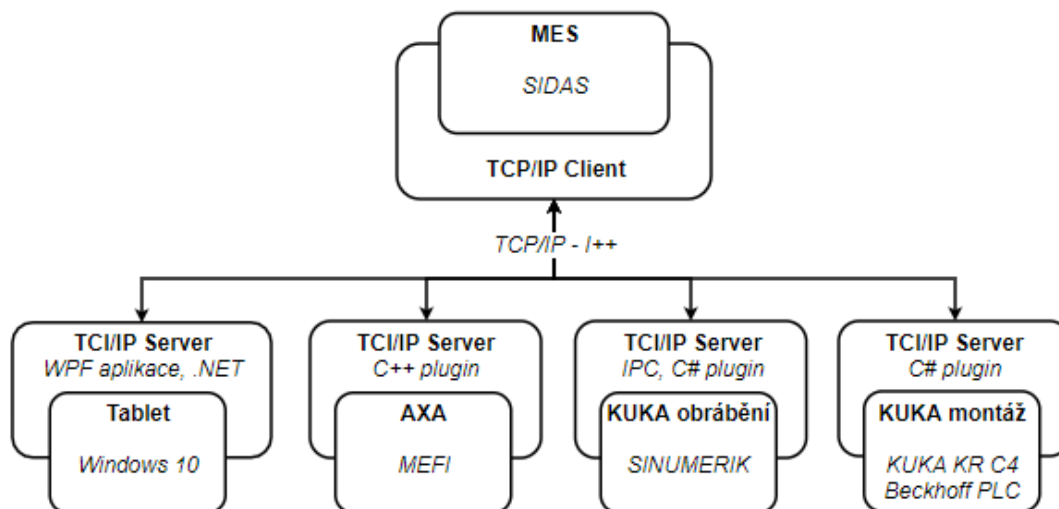
8.1 Propojení strojů se systémem MES

Stroje a jejich nadřazené systémy musí být propojeny do jednotné sítě. K tomu slouží fyzická topologie sítě (způsob propojení prvků fyzicky či bezdrátově) a komunikační protokol, který určuje pravidla přenosu informací v síti. Stroje již byly připojeny do jednotné sítě Tesbedu CIIRC, do této sítě byl připojen i systém MES. Jako komunikační protokol byl původně uvažován OPC UA. Ten umožňuje propojit rozdílné stroje jednotným komunikačním rozhraním. Každý stroj je v této architektuře vybaven svým vlastním OPC serverem, který zajišťuje komunikaci s řídicím systémem daného stroje například dle OPC UA Companion Specification¹². OPC server poté již může komunikovat jen na bázi protokolu OPC s libovolným množstvím klientů. Klient tak může komunikovat s rozdílnými řídicími systémy strojů jednotným komunikačním protokolem OPC. Klientem by v našem případě byl systém MES Sidas. Komunikační protokol OPC UA má také již v základu implementováno robustní zabezpečení. Ne všechny stroje v Testbedu CIIRC však byly vybaveny OPC serverem.

Zvolena proto byla varianta komunikačního protokolu TCP/IP, kdy MES systém opět bude klientem a jednotlivé stroje budou vybaveny TCP/IP servery navázané na možnosti svého řídicího systému. Tento způsob zapojení je zobrazen na schématu na obrázku 42. Pravidla TCP/IP komunikace byly nastaveny dle standardu I++. Zasílá se vždy zpráva s inkrementálním číselným identifikátorem (může být časová značka vygenerovaná

¹² Viz UMATI pro CNC stroje, OPC Unified Architecture for Robotics pro roboty, MTConnect-OPC UA

klíčem) a textem příkazu, následně je vráceno potvrzení přijetí příkazu pomocí znaku &, návratová hodnota pomocí # a dokončení vykonání příkazu pomocí %. Příkazy pro jednotlivé operace odpovídají struktuře, kterou zobrazuje obrázek 40.



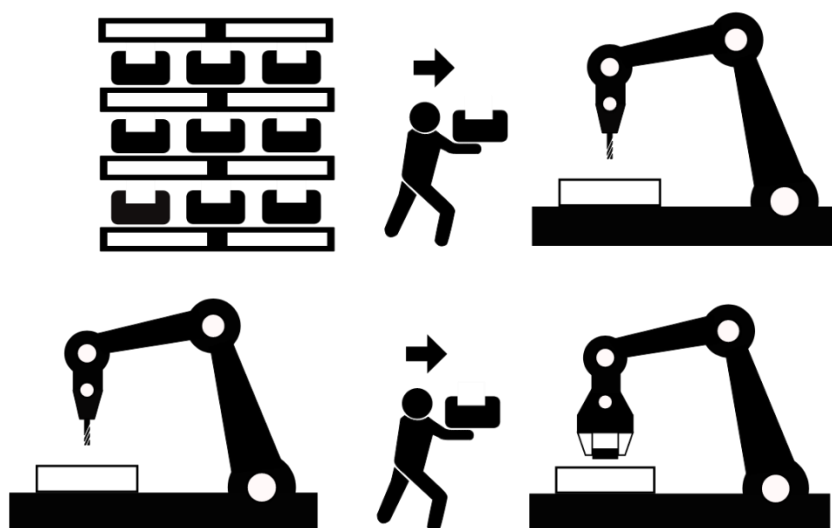
Obrázek 42: Propojení strojů se systémem MES

Každý z připojených strojů je odlišný, což vhodně demonstuje strojní vybavení jakéhokoliv výrobního podniku. Zároveň to však představuje problém z hlediska vzájemné kompatibility. Každému stroji z tohoto důvodu musel být na míru vytvořen TCP/IP server. V případě operátora tabletu se jedná o WPF aplikaci, na které současně funguje operátorské rozhraní. U obráběcího robotu KUKA se systémem Sinumerik bylo připojeno dodatečné IPC s aplikací fungující jako TCP/IP server a schopností vygenerovat dle příchozích dat hlavní obráběcí program a navolit jej na stroji. U montážního robotu KUKA bylo využito panel PC Beckhoff fungující jako TCP/IP server a ovládající řídicí systém KUKA KR C4 v režimu external control. V tomto režimu je robot ovládán z externího PLC a programy jsou volány dle nastavení v souboru cell.src. Jak již bylo zmíněno, stroj AXA nebyl připojen právě z důvodu komplikací s tvorbou TCP/IP serveru komunikujícího s řídicím systémem MEFI.

8.2 Funkce systému a výsledky testování

Takto nastavený systém je funkční pro všechny plastové verze výrobku. Zákazník (uživatel) si může v objednávkovém systému na webové adrese navolit svůj výrobek a zvolit gravírovaný text. Jakmile je tato objednávka vytvořena, zobrazí se v komunikačním rozhraní tabletu v seznamu objednávek operátorovi. Ten ji může odbavit. Při odbavení se operátorovi zobrazí instrukce co, kam a případně jak má umístit.

Zároveň se na příslušném stroji nastaví parametry a navolí příslušný program tohoto kroku. Operátor musí založit daný dílec a následně jen stroj spustit (stisknout NC start). MES systém komunikuje se strojem a získává data o průběhu operace. Operátor je informován na tabletu, že operace probíhá, či že se vyskytl problém. Pokud je operace dokončena, operátor je vyzván k vyjmutí dílce a jeho přenesení na další pracoviště dle výrobního scénáře. Příklady instrukčních piktogramů zobrazuje obrázek 43. Na následném pracovišti jsou současně opět nastaveny parametry a příslušný program. Toto se opakuje dle scénáře výroby konkrétního dílce. Po dokončení výroby je zakázka převedena do stavu hotovo.



Obrázek 43: Piktogramy instrukcí pro operátora.

Nahoře přesun ze skladu na obráběcí robot, dole přesun z obráběcího robotu na montážní robot

Ačkoliv je systém do značné míry automatizován, rozhodování o spuštění výroby je ponecháno operátorovi. Tím je zajištěna bezpečnost, respektive je bezpečnost shodná jako v případě, kdy by MES systém využit nebyl. Hlavní výhodou systému je, že operátor je v každém kroku instruován, co má přesně udělat a nemusí volit příslušné programy a nastavení. Značnou část inteligence ve výrobě přebírá automatizovaný systém a dochází tak k redukci chyb a celkové úspoře času. Činnost operátora v tomto systému je také možné automatizovat například nasazením AGV¹³ s manipulační možností.

¹³ Automated Guided Vehicle, automaticky naváděný vozík

8.3 Praktické ověření

Funkce systému v popsané konfiguraci byla vyzkoušena v praktickém nasazení pro zadání objednávky a následnou výrobu vybraných plastových typů výrobků. V objednávkovém formuláři ve webovém rozhraní byla zadána výroba prostřednictvím libovolného zařízení. Zadáním objednávky došlo k aktualizaci výrobní fronty v MES systému a tím i směrem k operátorovy. Na tabletu vybaveném operátorskou aplikací následně bylo možné odbavit danou objednávku, čímž dojde ke spuštění výroby a instruování operátora jednotlivými kroky dle vyhodnocení MES. V ukázkovém provozu byl vyráběn 1 ks flash disku typu 1. Celková doba výroby byla v tomto případě 5:30 min, což přibližně odpovídá predikci ze simulace v Plant Simulation (5:00 min). Rozdíly jsou dány především nepřesností simulace s ohledem na pohyb operátora, nastavení vedlejších časů přípravy výroby a odlišný průběh z hlediska bezpečnosti operátora. To vše by bylo možné v případě potřeby dále optimalizovat a dosáhnout shody virtuální a fyzické výroby řízené systémem MES.

Dochází tak ke spojení předností virtuálního a fyzického světa. Samostatně může virtuální prostředí sloužit k plánování výroby bez nutnosti fyzického protějšku ať již ve fázi přípravy, či při provozu. Ve spojení s fyzickým procesem a výrobními zařízeními pak virtuální prostředí tvořené komunikačními rozhraními a systémem MES slouží ke sběru dat a k řízení výroby.

9 Shrnutí a závěr

Výroba v současnosti prochází radikálními změnami vlivem propojování fyzického světa a světa ICT technologií. Výsledek tohoto procesu představují kyberneticko-fyzické systémy, ve kterých jsou tyto dva aspekty neodlučně spojeny. Technická veřejnost dnes vnímá CPS ve výrobě celkově jako možnost pro zefektivňování procesů, zvyšování kvality či snižování počtu zaměstnanců. Umožňují však také zcela nové možnosti propojování systémů, procesů a lidí napříč životním cyklem výrobku a napříč strukturou výrobních společností.

V této práci byly popsány kyberneticko-fyzické výrobní systémy jako koncept, který se v současnosti stává realitou. Představeny byly možnosti pro realizaci a současný stav poznání problematiky s ohledem na vertikální integraci systémů ve výrobě. Tato teoretická východiska byla využita na aplikačním případě výrobní buňky Testbedu pro průmysl 4.0 v CIIRC. Práce tak pokrývá vícero rozdílných oblastí, tedy samotný návrh výrobků a technickou přípravu výroby, pro kterou byla přizpůsobena i výrobní pracoviště. Dále virtuální simulaci výrobních dějů pro její plánování a optimalizaci a finálně návrh systémového propojení výroby a popis jeho realizace ve spolupráci s CIIRC a společností SIDAT.

Pro stávající výrobní zařízení byl navržen vzorový výrobní program uživatelsky přizpůsobitelných výrobků. Výroba je proměnná a sestává z vícero obráběcích a montážních operací na reálných strojních zařízeních. Simuluje tak přizpůsobitelnou hromadnou výrobu v libovolné diskrétní výrobě. Vzorovým výrobkem je v tomto případě přizpůsobitelný USB flash disk, na kterém si uživatel může zvolit tvar, barvu a gravírovaný text.

Pro simulaci výroby ve virtuálním prostředí bylo vytvořeno digitální dvojče výroby, diskrétní simulace výrobních dějů v programu Siemens Tecnomatix Plant Simulation. V této simulaci lze navolit uvažované typy modelových výrobků a snadno měnit parametry ovlivňující jejich výrobu (výrobní časy, výrobní sekvence, aj.). Diskrétní simulace také uvažuje pracovníky, směnnost výroby nebo může uvažovat i statistická data jako spolehlivost strojů. Díky tomu představuje robustní nástroj pro virtuální plánování výroby. Lze zde simulovat libovolné scénáře bez nutnosti využití reálných výrobních kapacit. Tím lze výrobu již jejím plánování nebo i v průběhu optimalizovat.

Reálná výroba vyžadovala přípravu jednotlivých výrobních strojů a technologickou přípravu výroby pro veškeré varianty modelových výrobků. Připraveny byly NC kódy ovládající obrábění a montáž. Pro uskutečnění reálné výroby s vertikální integrací systémů byl pro řízení a rozvrhování výroby využit systém MES. Jednotlivé výrobní stroje a výrobní systémy musely být fyzicky propojeny do jednotné sítě.

Na pracoviště byl nasazen MES systém SIDAS od Společnosti SIDAT. Obsluhuje veškerou komunikaci mezi stroji a operátorem výrobního systému, umožňuje tak řízení informačního a materiálového toku pracovištěm. Pro jednotlivé varianty určuje pořadí výrobní sekvence, potřebu vstupních dílců a volbu konkrétních NC programů. MES systém tak přebírá logiku výrobního systému. Operátor je v tomto případě uvažován taktéž jako řízená součást systému. Provádí instrukce, které od systému dostává skrze komunikační rozhraní a zajišťuje pouze manipulaci, vizuální kontrolu a následné spouštění předem navolených programů. Výroba byla v tomto řízeném režimu odzkoušena pro vybrané varianty výrobků.

Tímto byly splněny cíle diplomové práce. Jako celek práce pokládá základ vertikálně integrovaných výrobních systémů na pracovišti Testbedu CIIRC. Modelová výroba slouží jako demonstrace možností propojené výroby, na kterém je možné dále libovolně stavět.

V budoucnu je možné dále rozšiřovat propojení těchto systémů s plnohodnotnými systémy ERP a PLM. Tím by byla umožněna automatická výměna výrobních a podnikových dat. NC programy by například nemusely být distribuovány na stroje předem. Další rozšíření je možné i na úrovni propojení systémů, kdy použitý protokol TCP/IP nemusí postačovat s ohledem na přenášené informace a bezpečnost přenosu. V budoucnu je proto zamýšlena záměna za protokol OPC UA. V neposlední řadě je možné další rozšiřování Testbedu, ať již o původně zamýšlený stroj AXA, či o další výrobní stroje a zařízení. Zde se nabízí již přítomný stroj Weldprint či 3D tiskárny používané v modelovém scénáři k výrobě vstupních polotovarů. I operátor výroby může být celkově nahrazen řešením mezioperační manipulace.

10 Seznamy

Použité zdroje

- [1] BRECHER, Christian. *Integrative Production Technology for High-Wage Countries*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. 978-3-642-21066-2.
- [2] MONOSTORI, L., B. KÁDÁR, T. BAUERNHANSL, S. KONDOH, S. KUMARA, G. REINHART, O. SAUER, G. SCHUH, W. SIHN a K. UEDA. Cyber-physical systems in manufacturing [online]. *CIRP Annals*. 2016, **65**(2), 621-641. Dostupné z: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
- [3] MAŘÍK, Vladimír a ET. AL. *Iniciativa Průmysl 4.0* [online]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>.
- [4] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013.
- [5] LEE, Jay, Behrad BAGHERI a Hung-An KAO. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems [online]. *Manufacturing Letters*. 2015, **3**, 18-23. Dostupné z: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [6] WANG, Lihui a Xi Vincent WANG. *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Cham : Springer International Publishing, 2018. 978-3-319-67692-0.
- [7] KADERA, Petr. *Methods for Development of Industrial Multi-Agent Systems*. Disertace, 2015.
- [8] MAŘÍK, Vladimír. Konference HoloMAS 2005. Holonické a multiagentní systémy. 2005 [cit. 8. září 2019]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/konference-holomas-2005-holonicke-a-multiagentni-systemy-2005_02_30330_3055/.
- [9] LAPERRIÈRE, Luc a Gunther REINHART. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. 978-3-642-20616-0.
- [10] VAN BRUSSEL, H., J. WYNS, P. VALCKENAERS, L. BONGAERTS a P. PEETES. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. *Computers in Industry*. 1998, **37**:255–274.
- [11] WANG, Lihui, Martin TÖRNGREN a Mauro ONORI. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing [online]. *Journal of Manufacturing Systems*. 2015, **37**, 517-527. Dostupné z: 10.1016/j.jmsy.2015.04.008.

- [12] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. *Details of the Administration Shell* [online]. 2018 [cit. 21. října 2019]. Dostupné z: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vws-in-detail-presentation.pdf?__blob=publicationFile&v=7.
- [13] ZEZULKA, František, Ivo VESELÝ a Vlastimil BRAUN. Úvod do problematiky a základní modely Industry 4.0 [online]. *IT SYSTEMS*. 2017, **1-2**. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/uvod-do-problematiky-a-zakladni-modely-industry-4.0.htm>.
- [14] OPC FOUNDATION, ZVEI. *OPC Foundation and ZVEI cooperate for OPC UA based mapping of Industrie4.0 Asset Administration Shell* [online]. 24. dubna 2018 [cit. 5. prosince 2019]. Dostupné z: <https://opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-zvei-cooperate-opc-ua-based-mapping-industrie4-0-asset-administration-shell/>.
- [15] MESA INTERNATIONAL, IBM, CAPGEMINI, CHANDLER. MESA (2008) SOA in Manufacturing Guidebook. White Paper, White Paper 27.
- [16] SCHOLTEN, Bianca. Integrating ISA-88 and ISA-95 - White Paper. 2007. Dostupné z: <https://www.isa.org/pdfs/integrating-isa-88-and-isa-95/>
- [17] ISA, *ANSI/ISA-95.00.01-2000*. Norma
- [18] TULIP. *Manufacturing Execution Systems* [online] [cit. 23. října 2019]. Dostupné z: <https://tulip.co/resources/mes-ultimate-guide/#Introduction>.
- [19] KLETTI, Jürgen. *Manufacturing Execution Systems (MES)*. Berlin, London : Springer, 2007. 3540280103.
- [20] ŠTRUBLÍKOVÁ, Iva. *MES Systémy ve strojírenství* [online]. Část I [cit. 27. září 2019]. Dostupné z: <http://www.mescentrum.cz/o-projektu/co-mes/131-mes-systemy-ve-strojirenstvi-cast-1>.
- [21] FRANZOSA, Rick. Gartner, Magic Quadrant for Manufacturing Execution Systems. 2018.
- [22] SIEMENS. *Product Lifecycle Management (PLM) Software* [online] [cit. 25. října 2019]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/product-lifecycle-management-plm-software/12506>.
- [23] SAAKSUORI, Antti a Anselmi IMMONEN. *Product Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008. 978-3-540-78173-8.
- [24] SIEMENS. *Computer-Aided Engineering* [online] [cit. 25. října 2019]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>.
- [25] ČESKÝ INSTITUT INFORMATIKY, ROBOTIKY A KYBERNETIKY – ČVUT PRAHA. *Testbed pro Průmysl 4.0* [online]. *Nahlédněte do budoucnosti výroby* [cit. 9. listopadu 2019]. Dostupné z: https://www.ciirc.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/10/brozura_A4_testbed.pdf.

- [26] SIEMENS. *Siemens launches Siemens Opcenter* [online] [cit. 11. listopadu 2019]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/newsroom/opcenter-launch/61430>.
- [27] SIEMENS. *Siemens Opcenter* [online] [cit. 11. listopadu 2019]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-operations-center/>.
- [28] SCHUNK. *KSP Plus 64* [online] [cit. 13. listopadu 2019]. Dostupné z: https://schunk.com/de_en/clamping-technology/product/18377-0405100-ksp-plus-64/.
- [29] SIEMENS. *Sinumerik 840D sl / 828D Extended Functions* [online]. *Function Manual* [cit. 14. listopadu 2019].
- [30] WOLF, Andreas, Ralf STEINMANN a Henrik SCHUNK. *Grippers in motion. The fascination of automated handling tasks*. Berlin : Springer, 2005. 3-540-25657-1.
- [31] SCHUNK. *Schunk MPG plus 40* [online] [cit. 14. listopadu 2019]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_en/gripping-systems/product/17396-0305521-mpg-plus-40/.
- [32] SCHUNK. *Schunk SDV-P* [online] [cit. 14. listopadu 2019]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/product/17396-0305521-mpg-plus-40/accessories/sdv-p/.

Seznam použitých programů

Siemens NX 10, 12
Siemens Teamcenter 10
Siemens Tecnomatix Plant Simulation 14.2
Cimco edit V5
Notepad++ 7.3.2
Kuka WorkVisual 6.0
PrusaSlicer
SIDAS

Seznam obrázků

Obrázek 1: Propojenost ICT, výroby [2 s. 622].....	12
Obrázek 2: 5C architektura [5 s. 19].....	13
Obrázek 3: Typy holonů [9 s. 659]	15
Obrázek 4: Multiagentní systém [převzato 6 s. 53]	16
Obrázek 5: Multiagentní systém průchod, převzato z [11 s. 522], upraveno	17
Obrázek 6: Průmyslové revoluce v čase [4 s. 15].....	18
Obrázek 7: Propojení komponent I4.0 [12]	20
Obrázek 8: Pyramida výroby dle ISA, převzato [17]	22
Obrázek 9: Transformace automatizační pyramidy [2]	23
Obrázek 10: Funkce MES dle MESA 11 [20]	24
Obrázek 11: Srovnání MES systémů Gartner [21]	27

Obrázek 12: Plánovaná podoba Testbed CIIRC s propojením systémů	30
Obrázek 12: IT systémy v rámci podniku. [19]	31
Obrázek 13: Návrh vertikální integrace systémů na pracovišti	33
Obrázek 14: Návrh vzorového výrobku USB flash disk	36
Obrázek 15: Varianty vzorového výrobku.....	37
Obrázek 16: Model pracoviště TX Plant Simulation.....	39
Obrázek 17: Metoda pohybu MU	40
Obrázek 18: Výsledky simulace s jedním pracovníkem.....	41
Obrázek 19: Výsledky simulace s dvěma pracovníky	41
Obrázek 20: Pneumatický upínací blok KSP plus 64 [28]	43
Obrázek 21: Řízení upínacího bloku - Sinumerik NCU [29]	44
Obrázek 22: Pracoviště gravírování.....	45
Obrázek 23: Výpočet potřebné uzavírací síly F_G [30]	47
Obrázek 24: Pneumatická úchopná hlavice Schunk MPG plus 40 [31]	47
Obrázek 25: Schunk SDV-P [32].....	48
Obrázek 26: Základní prvky pneumatického obvodu pracoviště montáže.....	50
Obrázek 27: CAD model úpravy pracoviště montáže	50
Obrázek 28: IO Mapping – digitální výstupy v KUKA Workvisual	51
Obrázek 29: Realizace pracoviště montáže	52
Obrázek 30: Realizace koncového efektoru	53
Obrázek 31: Realizace pneumatického obvodu a řízení	53
Obrázek 32: Upnutý obrobek s vyznačením posunutí souřadného systému	54
Obrázek 33: Program gravírování uživatelem voleného textu	55
Obrázek 34: Program obrábění písmene A, Siemens NX 10	56
Obrázek 35: Zkouška řezných podmínek technologie gravírování	57
Obrázek 36: Montážní pracoviště	57
Obrázek 37: Souřadné systémy použitých nástrojů v KUKA WorkVisual.....	58
Obrázek 38: Část montážního programu	59
Obrázek 39: Informační a materiálový tok pracovištěm	60
Obrázek 40: Příkazy (kroky) jednotlivých operací.....	61
Obrázek 41: Průchod pracovištěm s materiálovými a informačními vstupy.....	62
Obrázek 42: Propojení strojů se systémem MES.....	63
Obrázek 43: Piktogramy instrukcí pro operátora.....	64

Seznam tabulek

Tabulka 1: Kódový popis variant výrobku	35
Tabulka 2: Working Plan.....	38
Tabulka 3: Nastavení Kuka obráběcí.....	38
Tabulka 4: Propojení proměnných s PLC.....	49
Tabulka 5: Řezné podmínky gravírování.....	54

Seznam příloh

Příloha I – Architektura RAMI 4.0	P1
Příloha II – MESA model 2008	P2
Příloha III – Pneumatický obvod	P3
Příloha IV – PLC Coupler pracoviště montáže KUKA montážní	P4

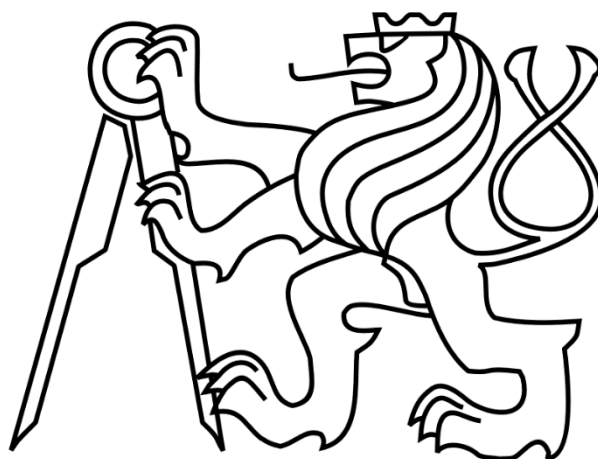
Seznam elektronických příloh

- Složka Plant Simulation
Model výroby v diskrétní simulaci. Obsahuje soubor modelu Testbed_CIIRC.spp ve verzi Plant Simulation 14.2 a soubory grafiky. (.spp, .jt)
- Složka Programy Gravírování
Složka obsahuje NC soubory podprogramů Sinumerik pro gravírování na pracovišti Kuka Obráběcí. Umožňuje gravírování libovolného textu na všechny varianty plastových dílců. (.spf)
- Složka Programy Montáže
Složka obsahuje soubor programů potřebný pro montáž všech plastových variant výrobků na pracovišti KUKA montážní. Obsahuje také soubor cell.src určující volaný program. (.src, .dat)
- Složka STL verze k tisku
Složka obsahuje stl soubory plastových komponent výrobků určené k 3D tisku dalších komponent (.stl)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

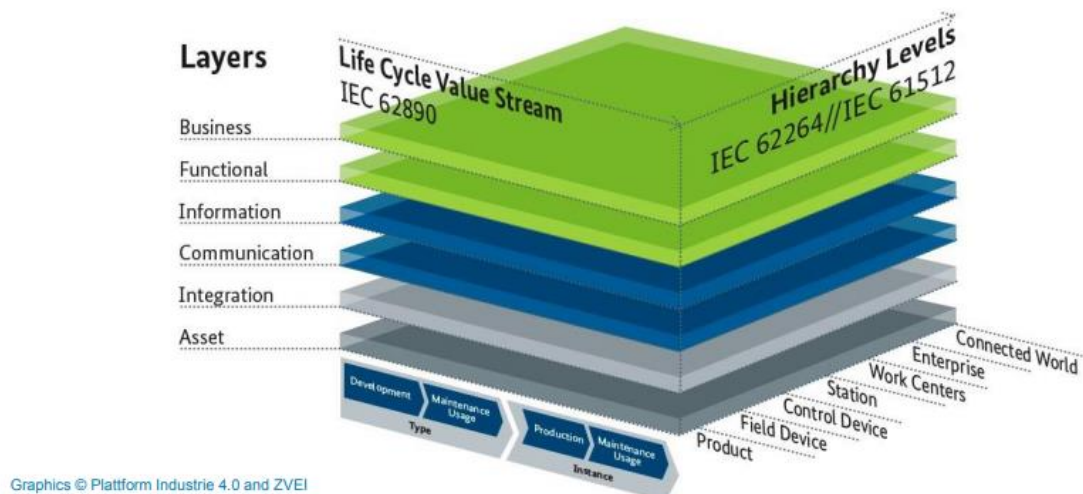


Přílohová část

Příloha I – Architektura RAMI 4.0

Tuto architekturu představily organizace ZVEI, VDI. Převzala ji Plattform Industrie 4.0 jako trojrozměrnou reprezentaci všech aspektů současné výroby v pojetí Průmyslu 4.0. Architektura umožňuje vymezení a následnou standardizaci pojmů souvisejících s průmyslem 4.0. V první horizontální ose zobrazuje životní cyklus výrobku s uvažováním standardu IEC 62890. V druhé horizontální ose je zobrazena hierarchie (vertikální uspořádání) od jednotlivých produktů přes společnosti po propojený svět na základě IEC 62264 (ISA 95) a IEC 61512 (ISA 88 pro dávkovou výrobu). Tato hierarchie je v modelu uvažovaná jako distribuovaná síť jednotlivých komunikujících entit. Vertikální osa poté zobrazuje rozdělení komponenty průmyslu 4.0 na 6 vrstev od fyzického světa, jeho ovládání, zpracování jeho informací až po vyhodnocování těchto informací a funkci komponenty.

Komunikace v rámci této architektury je založena na existenci administrativního shellu (asset administration shell) popsaného v textu práce.

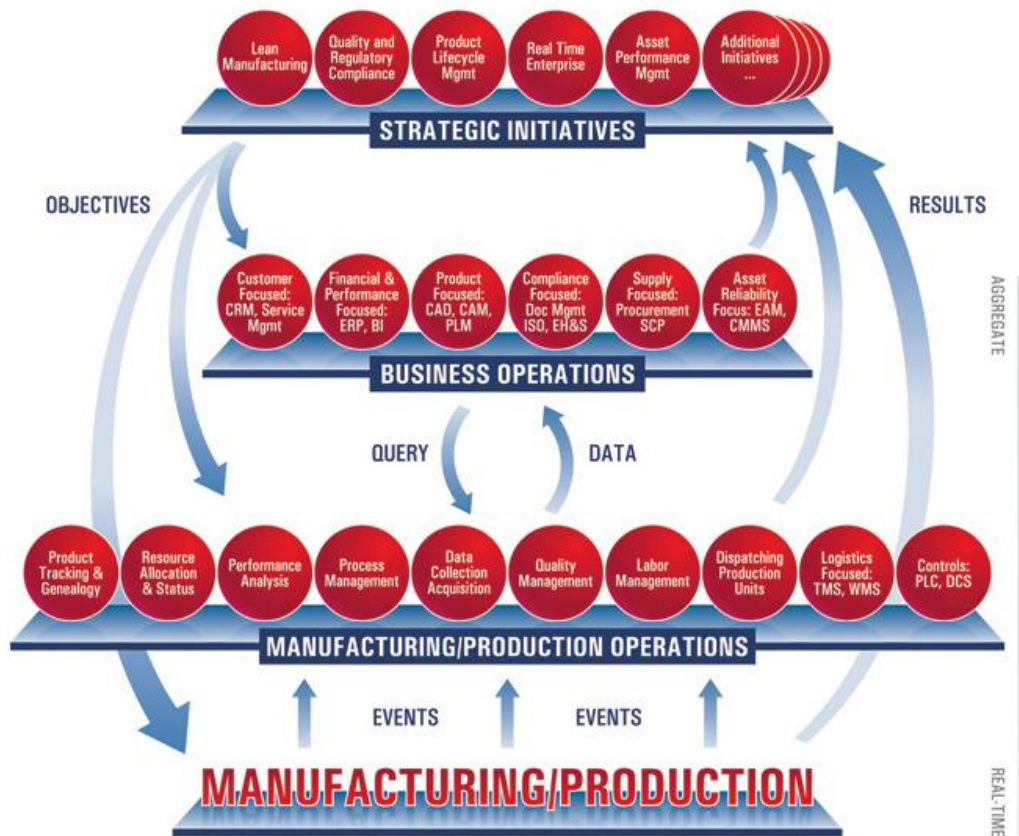


Obrázek 1: Architektura RAMI 4.0¹

¹ SCHWEICHHART, Karsten. Reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). An Introduction. Dostupné z: <https://www.plattform-i40.de/I40> (2016).

Příloha II – MESA model 2008

Organizace MESA se zabývá výrobními informačními systémy a jejich aplikací. Již od roku 1997 vydává a průběžně aktualizuje referenční modely funkce MES systému. Aktuální model je z roku 2008 a zobrazuje funkce MES systému v závislosti na funkcích podniku ve vertikálním uspořádání. Je zde vidět aktuální přesah MES systémů i nad výrobní rovinu.



Obrázek 2: MESA model 2008 ¹

¹ *MESA Model* [online]. MESA, 2008 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.mesa.org/en/modelstrategicinitiatives/MESAModel.asp>

Příloha IV – PLC Coupler pracoviště montáže KUKA montážní

