



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# DIGITÁLNÍ DVOJČE VÝROBNÍ BUŇKY V KONTEXTU PRŮMYSLU 4.0

DIGITAL TWIN OF A MANUFACTURING CELL IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

## DIPLLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Peter Janus**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.**

**BRNO 2023**



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	<b>Bc. Peter Janus</b>
Studijní program:	Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

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

### **Digitální dvojče výrobní buňky v kontextu Průmyslu 4.0**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce je tematicky věnována oblasti modelování a simulace, konkrétně tvorbě pokročilého simulačního modelu – tzv. digitálního dvojčete – fiktivní/reálné automatizované výrobní buňky splňující základní požadavky Průmyslu 4.0. Student se v práci bude zabývat tvorbou samotného 3D modelu výrobní buňky, a to s využitím simulačního prostředí Robot Studio. Jednotlivé části komplexního simulačního modelu (např. CNC, pojezdy, snímače atd.) budou v rámci simulace doplněny o vlastnosti chování a funkcionality odpovídající reálným prvkům buňky (uvažována bude i detekce kolizí). Pro simulační model bude dále vytvořen řídicí program na PLC, a to včetně možnosti ovládní prostřednictvím uživatelského vizualizačního rozhraní.

#### **Cíle diplomové práce:**

Proveďte stručnou rešerši v oblasti modelování a simulace.

Nastudujte a stručně popište softwarové prostředky použité pro modelování a simulaci výrobní buňky.

Vytvořte (případně adaptujte existující) 3D model výrobní buňky pro účely následného použití v rámci simulace.

Doplňte jednotlivé komponenty modelu o vlastnosti a funkcionality tak, aby – pokud možno – co nejvíce napodobovaly chování reálných komponent.

Naprogramujte řídicí logiku pro ovládní digitálního dvojčete výrobní buňky.

Implementujte jednoduché grafické ovládací rozhraní (na straně PLC).

Zhodnoťte dosažené výsledky a uveďte možnosti dalšího rozvoje projektu.

**Seznam doporučené literatury:**

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

SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB, ed. Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin: Springer, [2016]. ISBN 978-3-319-32550-7.

LIU, Mengnan, Shuiliang FANG, Huiyue DONG a Cunzhi XU. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Manufacturing Systems. 2021, 58, 346-361. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2020.06.017.

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Cielom diplomovej práce je vytvoriť digitálne dvojča výrobnéj bunky a grafické ovládacie rozhranie. Prvá časť práce stručne opisuje technológie digitálneho dvojčata, TestBedu a prostriedky na tvorbu digitálnych dvojčiat. Uvádza taktiež príklady z praxe a prehľad TestBedov v ČR a SR. Ďalšie kapitoly sa venujú praktickej časti práce a popisujú postup tvorby digitálneho dvojčata v softvéroch ABB RobotStudio a B&R Automation Studio. V závere práce sú zhrnuté poznatky nadobudnuté počas vývoja a možnosti ďalšieho rozvoja projektu.

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to create a digital twin of the production cell and a graphical control interface. The first part of the thesis briefly describes the digital twin technology, TestBed and the means to create digital twins. It also provides practical examples and an overview of TestBeds in the Czech Republic and Slovakia. The next chapters are dedicated to the practical part of the thesis and describe the procedure of digital twin creation in ABB RobotStudio and B&R Automation Studio software. The thesis concludes with a summary of the knowledge gained during the development and possibilities for further development of the project.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

digitálne dvojča výrobnéj bunky, ABB RobotStudio, B&R Automation Studio, mechanizmy, smart components, logika výrobnéj bunky, vizualizácia

## **KEYWORDS**

digital twin of production cell, ABB RobotStudio, B&R Automation Studio, mechanisms, smart components, production cell logic, visualisation





2023

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

JANUS, Peter. *Digitální dvojče výrobní buňky v kontextu Průmyslu 4.0*. Brno, 2023. Dostupné na: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149371>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, Vedúci práce: Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D..





## **Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela**

Prehlasujem, že táto diplomová práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry.

Ako autor uvedenej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol neoprávneným spôsobom do cudzích osobnostných autorských práv a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb. vrátane možných trestnoprávných následkov.

V Brně dne 21. 5. 2023

.....

Peter Janus



## **Podakovanie**

V prvom rade by som chcel podakovať vedúcemu tejto diplomovej práce Ing. et Ing. Stanislavovi Langovi, Ph.D. za jeho odborné rady, pravidelné konzultácie a priateľský prístup. Podakovanie patrí taktiež mojej rodine a priateľke, za podporu počas celého štúdia.



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PRIEMYSEL 4.0</b> .....	<b>17</b>
2.1	Základné pojmy Priemyslu 4.0 .....	17
2.2	Internet of things .....	18
2.3	Komunikačné protokoly .....	19
2.3.1	OPC UA .....	20
2.3.2	ProfiNet .....	21
<b>3</b>	<b>DIGITÁLNE DVOJČA</b> .....	<b>23</b>
3.1	Definícia digitálneho dvojčata .....	23
3.2	Ako funguje digitálne dvojča .....	23
3.3	Kategórie digitálneho dvojčata .....	25
3.4	Rozdiel medzi digitálnym dvojčatom a digitálnym tieňom .....	26
3.5	Oblasti využitia digitálneho dvojčata vo výrobe .....	27
3.5.1	Monitorovanie v reálnom čase .....	27
3.5.2	Kontrola výroby .....	27
3.5.3	Virtuálne testovanie .....	27
3.6	Príklady digitálnych dvojčiat .....	28
3.6.1	Továrň BMW .....	28
3.6.2	Smart city .....	28
3.6.3	Veterná elektrárň .....	29
3.7	TestBed .....	30
3.8	Prehľad TestBedov .....	30
<b>4</b>	<b>PROSTRIEDKY PRE TVORBU DIGITÁLNYCH DVOJČIAT</b> .....	<b>33</b>
4.1	Riadiace systémy .....	33
4.1.1	B&R Automation Studio .....	33
4.1.2	Siemens TIA Portal .....	33
4.1.3	Beckhoff TwinCAT 3 .....	34
4.2	Simulačné prostredia .....	34
4.2.1	ABB RobotStudio .....	34
4.2.2	Siemens NX .....	34
4.2.3	Unity 3D .....	34
<b>5</b>	<b>NÁVRH DIGITÁLNEHO DVOJČA VÝROBNEJ BUNKY</b> .....	<b>35</b>
5.1	Všeobecný postup tvorby digitálneho dvojčata .....	36
<b>6</b>	<b>ABB ROBOTSTUDIO</b> .....	<b>39</b>
6.1	Nástroje v ABB RobotStudios .....	39

6.2	Príprava a import 3D modelov .....	40
6.3	Pridanie kinematických väzieb .....	42
6.4	Pridanie robota a gripuru .....	44
6.5	Ovládanie bunky .....	45
6.5.1	Smart Components (SMC) .....	46
6.5.2	Vývoj Smart Components .....	47
6.5.3	Logika bunky .....	48
6.5.4	ROBOTemplate .....	50
6.6	Programovanie robota .....	50
6.6.1	Moduly .....	51
6.6.2	Procedúry .....	51
6.7	Zhrnutie postupu v RobotStudios .....	53
<b>7</b>	<b>B&amp;R AUTOMATION STUDIO .....</b>	<b>55</b>
7.1	Príprava prostredia .....	55
7.2	Dátové štruktúry a premenné .....	57
7.3	Ovládanie digitálneho dvojčata .....	58
7.3.1	Výrobný proces .....	58
7.3.2	Pridanie stanovišta .....	60
7.3.3	Ovládanie robota .....	60
7.3.4	Využitie stavového automatu v taskoch .....	61
7.4	Užívateľské vizualizačné rozhranie .....	63
7.4.1	mappView .....	63
7.4.2	Príprava na tvorbu vizualizácie .....	64
7.4.3	Návrh vizualizácie .....	65
7.5	Zhrnutie postupu v B&R Automation Studio .....	66
<b>8</b>	<b>ZHODNOTENIE A DISKUSIA .....</b>	<b>67</b>
8.1	Simulačný softvér ABB RobotStudio .....	67
8.1.1	Výhody .....	67
8.1.2	Nevýhody .....	68
8.2	Riadiaci softvér B&R Automation Studio .....	69
8.2.1	Výhody .....	69
8.2.2	Nevýhody .....	70
8.3	Možnosti budúceho rozvoja .....	71
8.4	Zhrnutie .....	71
<b>9</b>	<b>ZÁVER .....</b>	<b>73</b>
	<b>LITERATÚRA .....</b>	<b>75</b>
	<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK .....</b>	<b>81</b>
	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>83</b>
	<b>ZOZNAM PRÍLOH .....</b>	<b>85</b>

# 1 ÚVOD

Nástup Priemyslu 4.0 spôsobil revolúciu v digitálnej transformácii priemyslu. Nejedná sa len o klasickú vizualizáciu modelov a procesov pomocou 3D objektov. Digitalizácia v kontexte Priemyslu 4.0 umožňuje tvorbu flexibilných digitálnych modelov, ktoré sú využívané k zberu dát v reálnom čase. Tieto údaje je následne možné využiť k úprave a optimalizácii samotných procesov. Existujú technológie, ktoré vykonávajú tieto úpravy dlhodobo bez zásahu človeka. Jednou z technológií, ktorá prináša tieto funkcionality je digitálne dvojča.

Táto diplomová práca sa zaoberá tvorbou digitálneho dvojčata fiktívnej výrobnjej bunky v kontexte Priemyslu 4.0. K tvorbe digitálneho dvojčata bol použitý softvér ABB RobotStudio a softvér B&R Automation Studio. Jedným z hlavných cieľov práce bolo poukázať, ako pomocou týchto dvoch softvérov vytvoriť digitálne dvojča výrobnjej bunky. Aj keď samotná práca opisuje postup tvorby digitálneho dvojčata pomocou dvojice vyššie spomenutých softvérov, postup ktorý bol aplikovaný, je možné využiť na tvorbu digitálneho dvojčata v akomkoľvek prostredí.

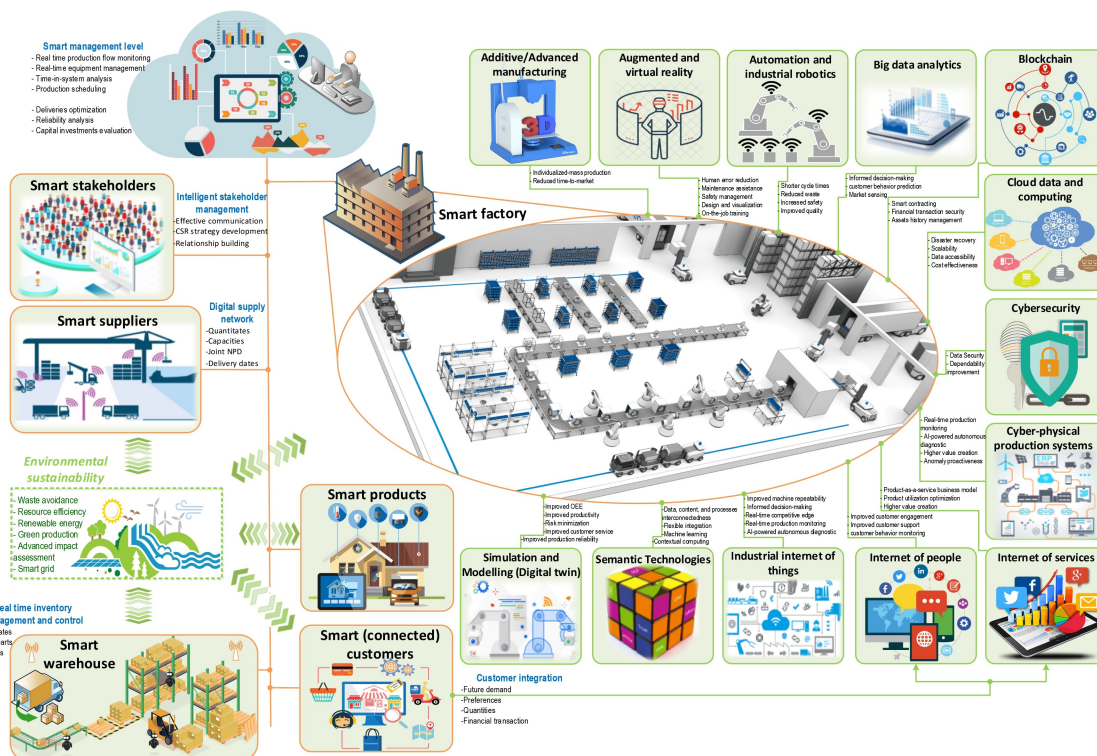
Prvá časť práce sa venuje popisu Priemyslu 4.0 a to hlavne technológiám, ktoré prináša. Ďalej je konkrétne definovaná technológia digitálneho dvojčata a jej odlišnosť od technológie digitálneho tieňu, s ktorou je častokrát mylne spájaná. V ďalšej kapitole sú stručne opísané softvéry, ktoré môžu byť využité ako riadiaci systém výrobnjej bunky a softvéry používané k digitálnej reprezentácii výrobnjej bunky pomocou 3D modelov. Druhá časť práce začína všeobecným návrhom digitálneho dvojčata a pokračuje opisom jednotlivých krokov a nástrojov použitých v simulačnom softvéri ABB RobotStudio. Nasledujúca kapitola je venovaná riadiacemu systému bunky, ktorý bol spoločne s grafickým rozhraním vytvorený v softvéri B&R Automation Studio. Práca je zakončená zhrnutím poznatkov nadobudnutých počas vývoja digitálneho dvojčata.





## 2 PRIEMYSEL 4.0

Pojem Priemysel 4.0 vznikol v roku 2011 v Nemecku. Prináša využitie digitalizovaných, prepojených a decentralizovaných sietí s cieľom zvýšiť produktivitu a spoľahlivosť pre lepšie fungovanie firmy. Priemysel 4.0 pomáha zvládať neustále rozvíjajúce sa podnikateľské prostredie, a to pomocou všestranných obchodných modelov. Priemysel 4.0 má vplyv na najnižšie vrstvy firmy od výrobných hál až po tie najvyššie rozhodovacie štruktúry. [1]



Obr. 1: Návrh Priemyslu 4.0 [2]

### 2.1 Základné pojmy Priemyslu 4.0

Priemysel 4.0 obsahuje veľké množstvo rôznych koncepcií, ktoré sú popísané nižšie.

#### Inteligentná továreň

Továreň je vybavená digitalizovanými modelmi výrobkov a strojov. Taktiež obsahuje senzory a autonómne systémy. Celok, ktorý vznikne sa nazýva „inteligentná továreň“ a je autonómne riadená. [3]

### **Kyber-fyzikálny systém**

Vzniká spojenie medzi fyzickou a digitálnou úrovňou kedy môžu vznikať systémy, u ktorých už nemožno rozumne rozlíšiť fyzickú a digitálnu reprezentáciu. Ako príklad je možné uviesť preventívnu údržbu. Fyzické opotrebovanie mechanických komponentov je popísané pomocou procesných parametrov (napätie, čas prevádzky atď.), ktoré sú zaznamenávané digitálne. Skutočný stav teda vyplýva zo spojenia fyzického objektu a jeho digitálnych procesných parametrov. [3]

### **Samoorganizácia**

Dochádza k čoraz väčšej decentralizácii existujúcich výrobných procesov. Je to spôsobené rozkladom klasickej výrobnéj hierarchie. [3]

### **Zodpovednosť podnikov**

Pri tvorení postupu výrobných procesov sa čoraz viac dbá na udržateľnosť a efektívne využitie zdrojov. Tieto faktory sa tak stávajú základnými podmienkami úspešných podnikov. [3]

### **Prispôbenie sa ľudským potrebám**

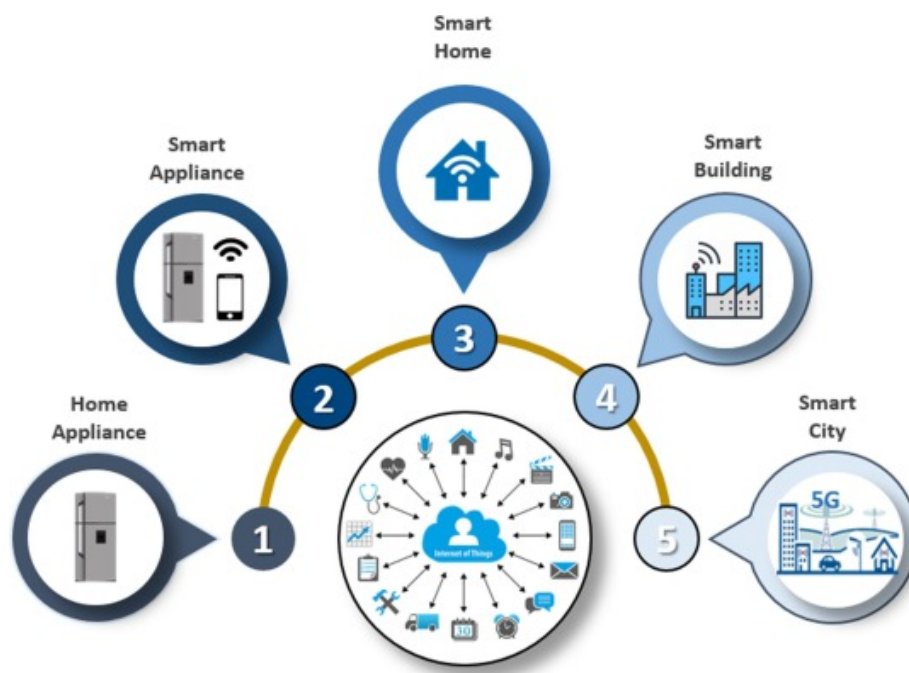
Ludia by sa nemali riadiť potrebami výrobných systémov, ale výrobné systémy by mali byť navrhnuté podľa potrieb ľudí. [3]

## **2.2 Internet of things**

IOT (Internet vecí) je možné vysvetliť ako globálnu sieť, ktorá je všadeprítomná a ktorá pomáha s integráciou fyzického sveta. K tomu dopomáhajú snímače IOT, ktoré poskytujú údaje k spracovaniu a analýze. Tieto snímače využívajú verejné komunikačné siete a sú prítomné vo všetkých zariadeniach. IOT má veľký vplyv na rôzne aspekty každodenného života. [4]

Okrem toho, že IOT predstavuje vlastnosti ako obrovský rozsah, snímanie, informovanosť o polohe a ďalšie, umožňuje taktiež prístup ku cloudovým službám. Ukladá dáta zo snímačov na cloud, kde sú dostupné pre rozsiahlejšie dátové analýzy. Výsledky z týchto analýz, ku ktorým je častokrát využitá AI, sú neskôr použité napríklad pri prediktívnej údržbe. [5]

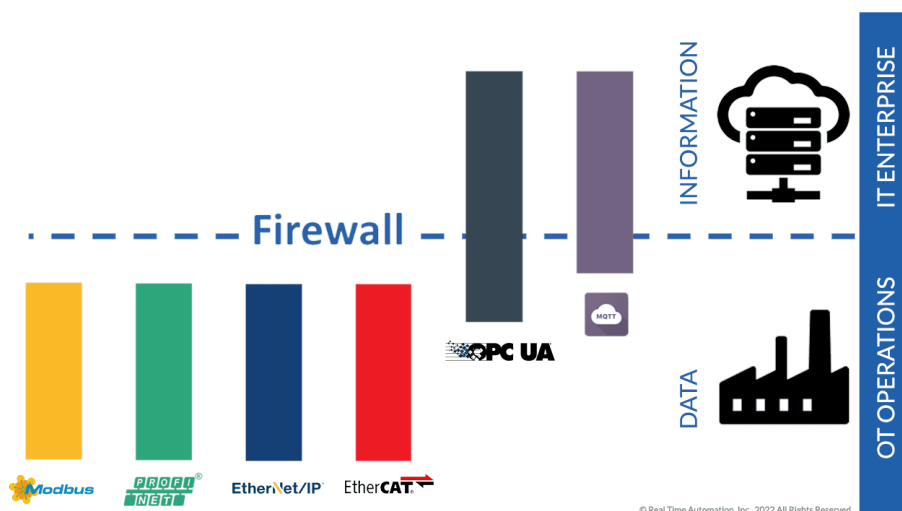
V posledných rokoch dochádza k rýchlemu rozvoju IOT a k internetu je pripojených niekoľko miliárd fyzických zariadení. Toto číslo naďalej extrémne rastie. Taktiež dochádza k vývoju rôznych aplikácií, za účelom zlepšenia života ľudí. Úsilie rozširovať IOT sa neprejavilo len v priemysle, ale taktiež v domácnostiach, čo viedlo k vzniku nových pojmov ako inteligentná domácnosť, inteligentná budova, inteligentné mesto a ďalšie. [6]



Obr. 2: Digitálna transformácia s využitím IOT [5]

### 2.3 Komunikačné protokoly

Digitalizácia, Internet vecí a celkovo Priemysel 4.0 priniesli do automatizácie mnoho zmien. To prináša aj zmeny v zariadeniach, do ktorých sú výrobcovia nútený pridávať zložitejšie technológie. Problém získať prístup k protokolu sa zmenil na problém, ako nákladovo efektívne implementovať množstvo dostupných komunikačných protokolov. [7]

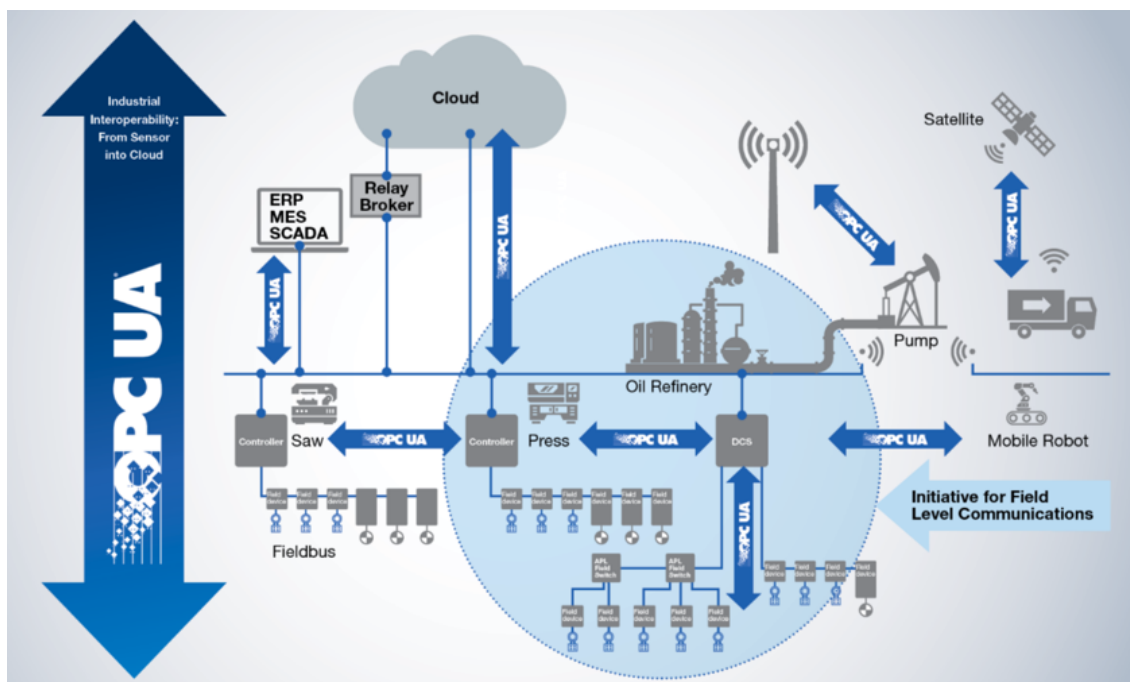


Obr. 3: Možnosti výmeny dát jednotlivých komunikačných protokolov [7]

Je pochopiteľné, že pri vývoji nového výrobku sa objavujú požiadavky na implementáciu rôznych protokolov. Ako príklad uvažujme jednoduchý pohon. Ten môže vyžadovať EtherNet/IP, ModBus alebo ProfiNet k plneniu väčšiny komunikačných požiadaviek. Tieto protokoly a protokoly ako EtherCAT, PowerLink však riešia požiadavky len v oblasti riadiacej komunikácie. V prípade potreby hlásenia údajov mimo výrobnú halu, je nutné využiť komunikačný protokol ako OPC UA alebo MQTT. So stúpajúcim počtom komunikačných protokolov, rastie aj požiadavka na zabezpečenie komunikácií založených na sieti EtherNet. [7]

### 2.3.1 OPC UA

OPC UA má dobré vyhliadky z hľadiska komunikácie. Pokrýva širokú škálu využitia od zaznamenávania jednoduchých procesných dát až po komplexný monitoring, rozbor/analýzu a riadenie. Taktiež zahŕňa bezpečnostné nároky na informačný model, respektíve prenos údajov. Model OPC UA je kompatibilný s inými komunikačnými protokolmi/štandardmi a k prenosu údajov kombinuje dva mechanizmy. [8]



Obr. 4: Využitie protokolu OPC UA v priemysle [9]

#### Model klient – server

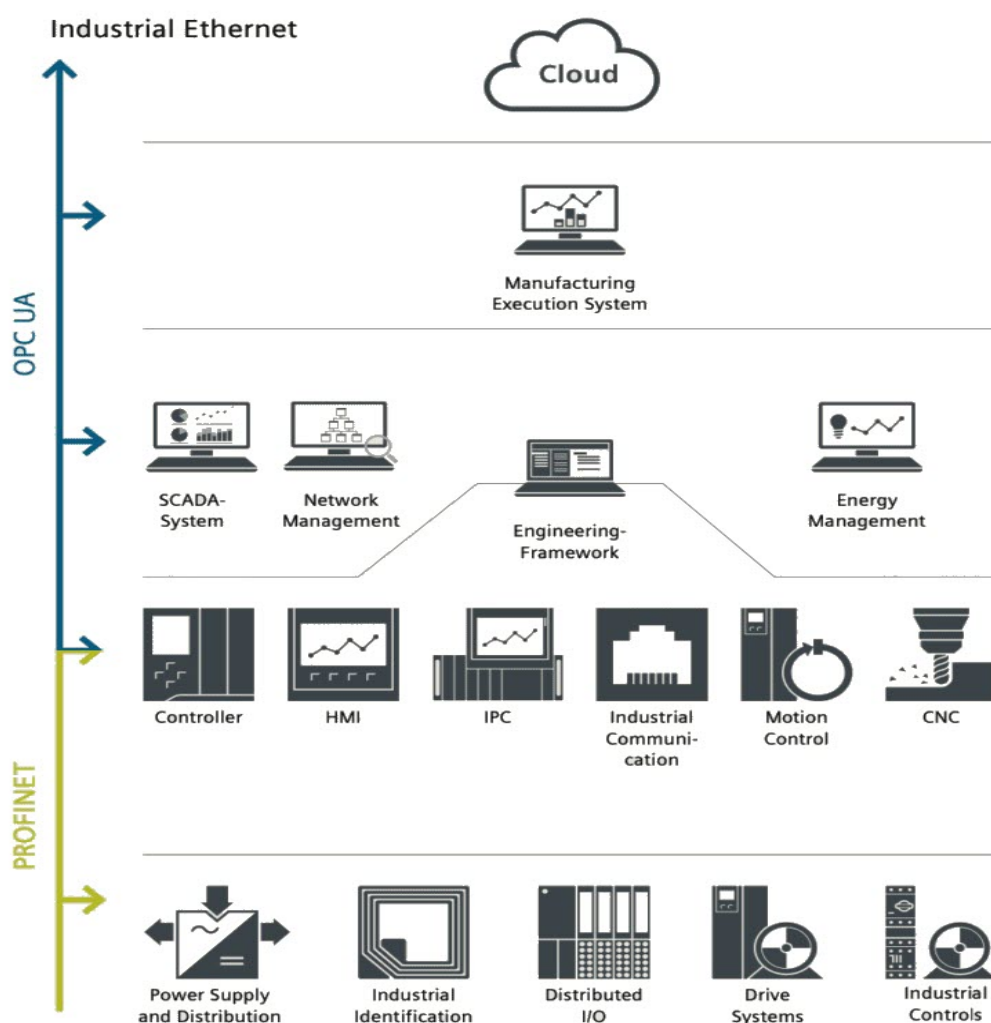
Ako z názvu plynie, komunikácia je rozdelená na dva typy účastníkov a to klientov, ktorých môže byť niekoľko a jeden server. Klienti využívajú služby poskytované serverom. Toto spojenie prináša bezpečnú a overenú výmenu informácií, ale s nevýhodou týkajúcou sa počtu spojení. [10]

## Model vydavateľ – odberateľ

Tento model je podobný modelu klient – server, kedy OPC UA server zdieľa konfigurovateľné podmnožiny informácií, ku ktorým má prístup neobmedzený počet odberateľov. Pri tomto modeli však dochádza k neoverenej výmene informácií, ktorá sa nesie v štýle „odoslať a zabudnúť“. [10]

### 2.3.2 ProfiNet

Je komunikačný protokol určený do automatizačného prostredia a ako komunikačné médium využíva priemyselný Ethernet. Pri výmene informácií medzi riadiacimi jednotkami a strojmi/zariadeniami využíva cyklickú a acyklickú komunikáciu. ProfiNet je otvorený štandard, a preto sa radí medzi najrozšírejšie riešenie priemyselného Ethernetu. Na doplnenie priemyselnej siete je možné okrem ProfiNetu využiť aj iné komunikačné protokoly, ktoré sú založené na sieti Ethernet ako napríklad OPC UA, MQTT alebo HTTP. [11]



Obr. 5: Spojenie komunikačných protokolov OPC UA a ProfiNet [12]



## 3 DIGITÁLNE DVOJČA

Digitálne dvojča (ďalej tiež DD) sa stalo zaujímavým nielen pre vedcov, ale aj pre integrátorov a odborníkov z praxe. Dnes je táto technológia rozšírená do mnohých odvetví priemyslu. Využívajú ju hlavne organizácie, ktoré sú stotožnené s IOT. Najčastejšie sa využíva k vyladeniu a kontrole rôznych prevádzkových procesov. Využitie DD poskytuje väčšiu konkurencieschopnosť, urýchľuje a zjednodušuje procesy v spoločnostiach a taktiež zvyšuje príjmy. Odhaduje sa, že do roku 2027 bude viac než 40 % svetových organizácií (hlavne výrobcov) využívať technológiu digitálneho dvojčata. [13]

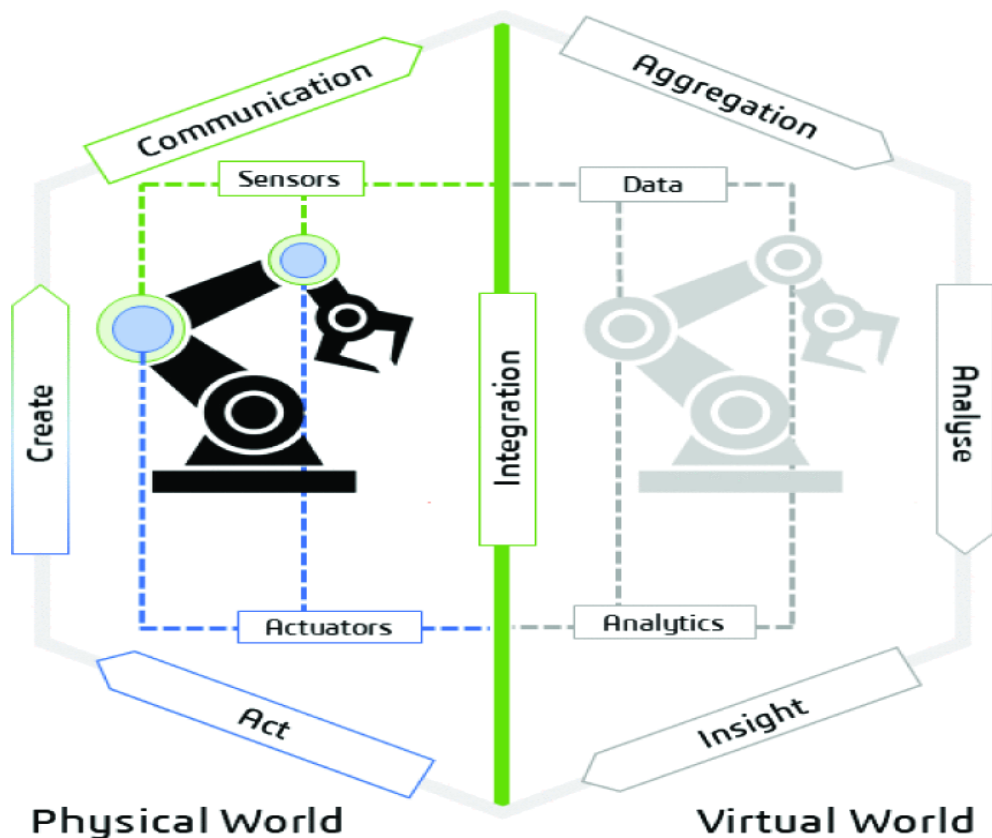
### 3.1 Definícia digitálneho dvojčata

Koncept digitálneho dvojčata bol predstavený v roku 2003 profesorom Grievesom z Michiganskej univerzity. Ten ho prezentoval v kontexte PLM (Product Lifecycle Management - riadenie životného cyklu produktu). PLM je však známe aj pod inými názvami a pojem digitálne dvojča sa časom ďalej vyvíjal a existuje niekoľko rôznych definícií. [14]

Všeobecná definícia digitálneho dvojčata hovorí, že DD je digitálnou reprezentáciou fyzického objektu v reálnom čase. Digitálny objekt môže byť vytvorený napríklad pomocou CAD modelov, ktoré sú doplnené o dynamické správanie. Digitálny a reálny objekt sú medzi sebou prepojené čo vedie k neustálemu prenosu informácií. Získavanie informácií je zabezpečené pomocou rôznych zariadení IOT, ktoré snímajú aktuálny stav fyzického objektu. Informačný tok zaisťuje, že digitálne dvojča môže existovať v rovnakom stave ako fyzický objekt a poskytovať informácie rozhodovaciemu procesu. Ten potom použije tieto dáta k optimalizácii a zlepšeniu výkonu fyzického stroja. [13, 15]

### 3.2 Ako funguje digitálne dvojča

K pochopeniu ako funguje DD vo všeobecnosti bola vytvorená schéma, ktorá je znázornená na obrázku č. 6. Skladá sa zo šiestich krokov, ktoré musia byť splnené buď pri tvorbe DD, alebo sú plnené počas jeho života. Týmito krokmi sú: *vytvorenie, komunikácia, zhromažďovanie, analýza, porozumenie a riadenie*. [16]



Obr. 6: Fungovanie digitálneho dvojčata [16]

### Vytvorenie

Do fyzického stroja sú implementované zariadenia IOT, ktoré zabezpečujú zber dát z procesov a prostredia. V tomto kroku sú taktiež odovzdané informácie o CAD a MES modeloch. [16]

### Komunikácia

V tejto fáze sa definujú komunikačné protokoly, pomocou ktorých sa budú odovzdávať informácie digitálnemu dvojčatu. Následná komunikácia pozostáva z troch častí: *spracovanie, prenos a zabezpečenie informácie*. [16]

### Zhromažďovanie

Zhromažďovanie je prvým krokom na strane digitálneho dvojčata. Venuje sa ukladaniu a sprístupneniu prenesených údajov. [16]

### Analýza

Spracované údaje z minulého kroku sú následne zanalyzované DD. [16]



## Porozumenie

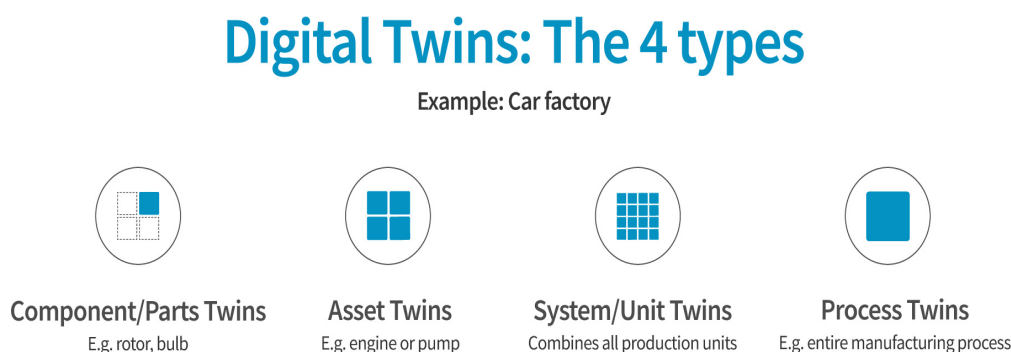
Tento krok súvisí s odovzdaním informácií získaných z analýzy dát. Digitálne dvojča odovzdáva informácie o zlepšení, zrýchlení a optimalizácií výroby, ale aj o prediktívnej údržbe fyzického stroja. [16]

## Riadenie

V poslednom kroku dochádza k aplikácii získaných informácií z predchádzajúcich krokov/digitálneho dvojčata. Dochádza teda k zmenám a optimalizácií riadiaceho programu. [16]

### 3.3 Kategórie digitálneho dvojčata

Existujú 4 typy digitálnych dvojčiat. Všetky majú rovnaký účel, ale líšia sa v oblasti použitia a rozsahu, ktorý pokrývajú. Kategórie, do ktorých sa delia digitálne dvojčatá, sú znázornené na obrázku č. 7.



Obr. 7: Kategórie digitálneho dvojčata [17]

### Digitálne dvojča súčiastky

Jedná sa o digitálne dvojča jedného výrobku, ktorý je integrovaný vo väčšom systéme. Ide o výrobok, na ktorý sú kladené špeciálne požiadavky a ktorého správne fungovanie ovplyvňuje spoľahlivosť celého systému. Nie je však nutné, aby každá súčiastka v systéme mala svoje vlastné digitálne dvojča. [17, 18]

### Digitálne dvojča produktu

Digitálne dvojča produktu je oproti digitálnemu dvojčatu súčiastky už komplexnejšou reprezentáciou fyzického modelu. Častokrát sa skladá z jednotlivých dvojčiat súčiastok, od ktorých prijíma informácie. Zatiaľ čo dvojčatá súčiastok sa sústreďujú na správne fungovanie jednotlivých komponentov, dvojčatá produktov umožňujú monitorovať fyzický model ako celok. [17, 18]

### Digitálne dvojča systému

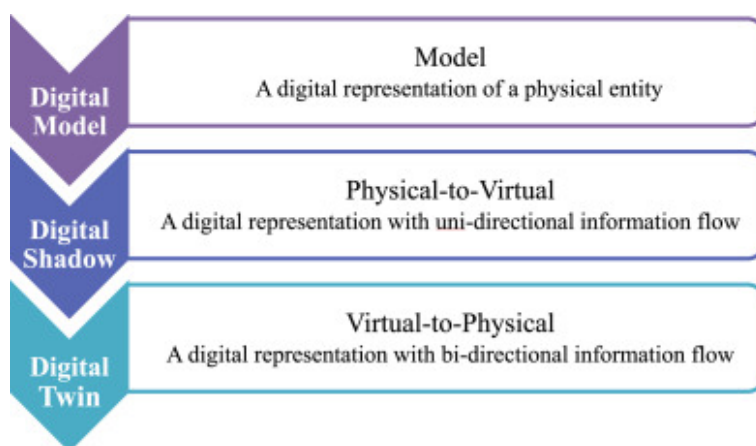
Táto kategória digitálnych dvojčiat pracuje na vyššej úrovni. Dvojča systému spája jednotlivé dvojčatá produktov do väčšieho celku. Pochopenie vzájomného fungovania produktov prináša možnosť zlepšiť ich kolaboráciu a tak dosiahnuť lepšie výsledky z hľadiska efektivity a produktivity. [17, 18]

### Digitálne dvojča procesu

Poslednou a najvyššou vrstvou je procesné digitálne dvojča alebo aj digitálne dvojča procesu. To zastrešuje digitálnu reprezentáciu niekoľkých systémov, ktoré spolupracujú. Ako príklad je možné uviesť automobilku. Systémové DD zastrešuje výrobné linky a procesné digitálne dvojča zastupuje celú fabriku a poskytuje prehľad o fungovaní všetkých jednotiek (systémov). Na tejto úrovni teda dochádza k plnohodnotnému využitiu technológie digitálnych dvojčiat. [17, 18]

## 3.4 Rozdiel medzi digitálnym dvojčaťom a digitálnym tieňom

V Industry 4.0 existujú 3 úrovne digitálnej reprezentácie. Tieto úrovne sú nasledujúce: *digitálny model*, *digitálny tieň* a *digitálne dvojča*. Hlavným rozdielom medzi jednotlivými úrovňami je spôsob odovzdávania informácií. Digitálny model poskytuje digitálnu reprezentáciu fyzického objektu bez komunikačného spojenia. Digitálny tieň je vzhľadom k digitálnemu modelu doplnený o jednosmerný tok informácií, a to z fyzického objektu do digitálneho. U digitálneho dvojčata dochádza k obojsmernému toku informácií. [19, 13]



Obr. 8: Úrovne digitálnej reprezentácie [13]

## 3.5 Oblasti využitia digitálneho dvojčata vo výrobe

S rýchlou, ktorou sa priemyselný trh rozvíja sú kladené čoraz väčšie požiadavky na efektívnosť a rýchlosť vo výrobe. Automatizácia pevne stanovených procesov už nie je dostačujúca. Výrobcovia sú tak nútení používať inteligentné procesy.

Výrobné procesy komunikujú so svojím okolím a dokážu prijímať inteligentné rozhodnutia bez toho, aby boli jasne naprogramované. Ako už bolo viackrát spomenuté, ide o fyzickú a digitálnu interakciu v uzavretom cykle. Možnosti aplikácie digitálneho dvojčata vo výrobe sú rôzne. Niektoré z nich sú predstavené nižšie. [20]

### 3.5.1 Monitorovanie v reálnom čase

Monitorovanie výrobných procesov je už v dnešnej dobe samozrejmosťou. Digitálne dvojčata však prináša vylepšené monitorovanie v reálnom čase. Dáta v reálnom čase vizuálne prezentuje na 3D modeloch v spojení s historickými údajmi dokáže predpovedať budúci stav procesu. K vizualizácií týchto dát je taktiež možné využiť technológiu rozšírenej reality. Digitálne dvojčata pre monitorovanie procesov neslúži len k prezentácii údajov a stavu fyzického modelu v reálnom čase, ale pomáha včas sa rozhodnúť a optimalizovať výrobné procesy tak, aby bol výsledok v budúcnosti čo najpriaznivejší. [20]

### 3.5.2 Kontrola výroby

Výrobné procesy sú obvykle ovládané centrálnym riadiacim systémom. Ten má vopred naplánované operácie, ktoré musí vykonávať a počas ktorých musí reagovať na poruchy. Digitálne dvojčata môže byť napojené na fyzický systém a vykonávať inteligentné riadenie. Na základe vnemov z okolitého prostredia a historických údajov môže tento inteligentný systém včas upraviť naplánované operácie. Vynútené opravy a iné udalosti, ktoré by za normálnych podmienok narušili výrobný proces, môžu byť vykonané počas nečinnosti. [20]

### 3.5.3 Virtuálne testovanie

Digitálne dvojčata môžeme taktiež využiť k simulácií výrobných procesov. V tejto simulácií môžeme otestovať bezpečnostné prvky, reakciu systému na poruchy, môžeme simulovať maximálne vyťaženie výrobných liniek a ďalšie scenáre, ktorých realizácia v reálnom svete by bola nebezpečná, zdĺhavá alebo nákladná. Z tohto pohľadu sa digitálne dvojčata podobá simulácií, ale vďaka napojeniu na fyzický model je presnejšie a realistickéjšie [20].

## 3.6 Příklady digitálních dvojčat

Digitálne dvojča bolo prvý krát nasadené v NASA (jednoduchá verzia toho, čo poznáme dnes) v 60. rokoch minulého storočia. NASA vytvorila na Zemi fyzické repliky systémov tak, aby simulovali správanie systémov, ktoré boli používané vo vesmíre. Aj napriek tomu, že pojem digitálne dvojča bol vtedy úplne neznámy a prvá oficiálna definícia vznikla až o 40 rokov neskôr, tak práve tento príklad uvádza mnoho zdrojov. Vo svete dnes existujú milióny digitálnych dvojčiat. [15]

### 3.6.1 Továrň BMW

V roku 2021, Spoločnosť NVIDIA v spolupráci s BMW vytvorila demo digitálneho dvojčata továrne na výrobu motorových vozidiel. Celé digitálne dvojča je vytvorené v NVIDIA Omniverse, ktorá umožňuje viacerým vývojárskym tímom spoločne pracovať v jednom virtuálnom prostredí. [21]



Obr. 9: Digitálna továrň BMW [21]

### 3.6.2 Smart city

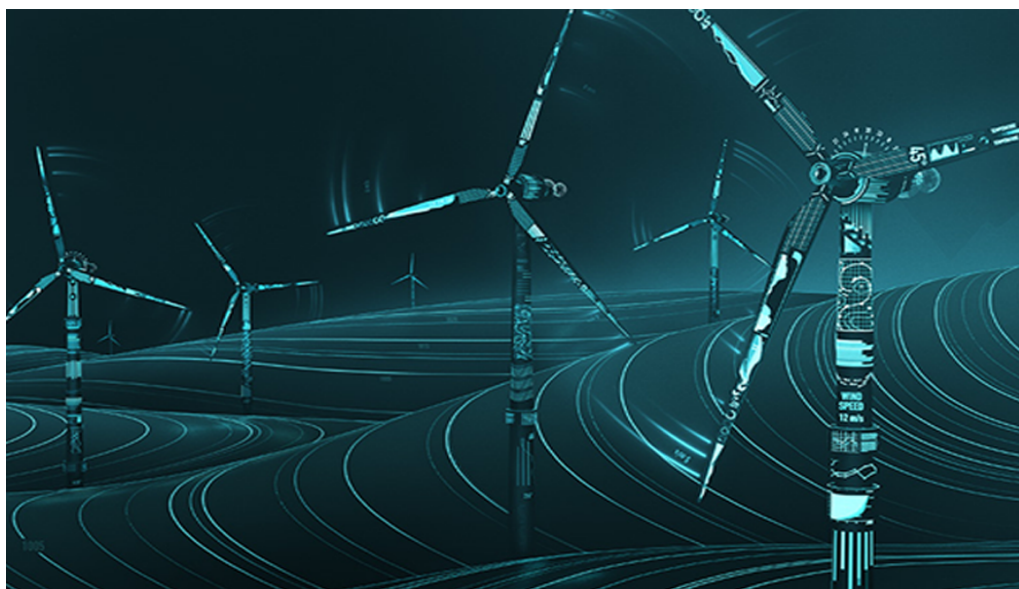
Smart city je technológia, ktorá by mala mestám pomôcť hlavne pri rozvoji. Digitálne dvojča mesta môže zaručiť efektívne a prispôsobiteľné zaobchádzanie s energetickými zdrojmi. Taktiež môže zlepšiť každodenný život ľudí napríklad prostredníctvom inteligentného riadenia dopravy. [22]



Obr. 10: Digitálne dvojča mesta [22]

### 3.6.3 Veterná elektrárň

Model digitálneho dvojčata veternej elektrárne je uložený na cloude. Aktuálny stav poveternostných podmienok je prenášaný do tohto modelu, kde môžu pracovníci vybrať jednu z 20 konfigurácií a otestovať tak, ktorá bude najefektívnejšia. Následne túto konfiguráciu aplikujú na fyzické veterné turbíny. Vďaka digitálnemu dvojčatu je možné zvýšiť efektívnosť až o 20 %. [23]



Obr. 11: Adaptívna veterná farma [23]

### 3.7 TestBed

Průmysel 4.0 definoval veľa nových technológií. Tieto technológie boli častokrát len na teoretickej úrovni a preto k ich preskúmaniu a odhaleniu reálnych prínosov bolo vytvorené prostredie s názvom TestBed (ďalej tiež TB). Toto prostredie je flexibilné, užívateľsky prívetivé a ponúka vhodné podmienky na experimenty, simulácie, vývoj a analýzu. Skladá sa z fyzických ale aj virtuálnych entít.

Pri rýchlom vývoji spoločnosti často produkujú veľké množstvo údajov, ale nie vždy vedia ako tieto údaje spracovať a využiť vo svoj prospech. Bez zbytočných prestojov a straty zisku môžu v TestBede otestovať rôzne spôsoby využitia týchto údajov a zistiť ako ich správne aplikovať. [24]

### 3.8 Prehľad TestBedov

#### TestBed Intemac Solutions

Jedná sa o český TestBed v Kuřimi neďaleko Brna. TestBed ponúka najnovšie technológie, spoluprácu s viac než 30 partnermi a podporuje všetky výrobné a technologické firmy, ktoré majú záujem o automatizáciu a digitalizáciu. TestBed sa pýši výrobnou bunkou 4.0, ktorú vyvinul pre firmu TAJMAC-ZPS v spolupráci s partnermi ako napríklad B&R Automation, SCHUNK, Festo a ďalšími. [25]



Obr. 12: TestBed Intemac

### RICAIP TestBed

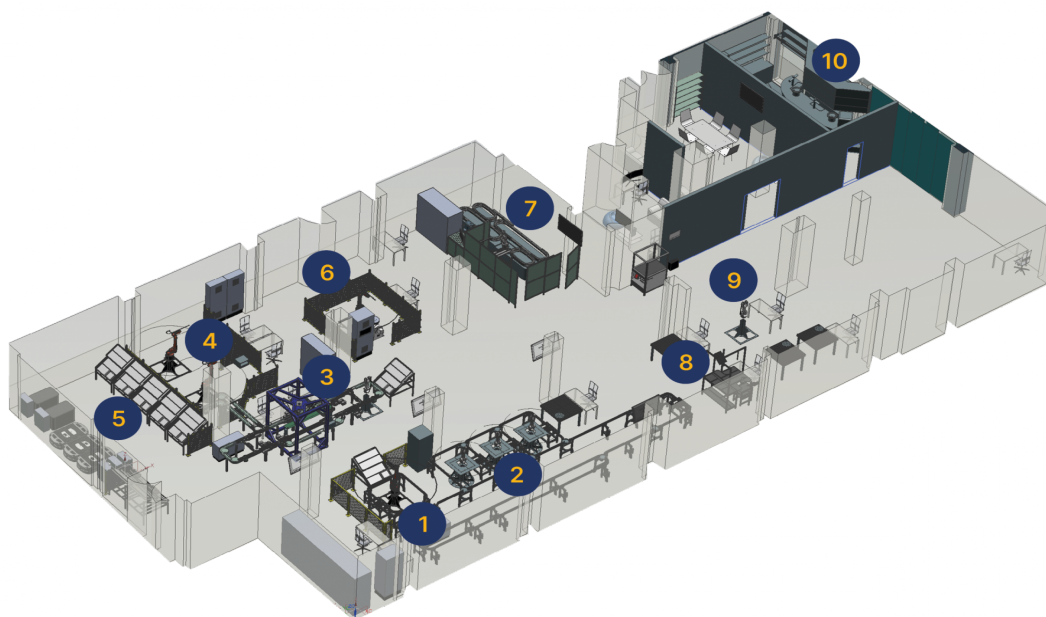
Tento TestBed sa nachádza v Brne, konkrétne vo výskumnom inštitúte CEITEC. TB po otvorení v roku 2022 je prístupný pre interných ale aj externých užívateľov. Celková plocha TB je  $420\text{ m}^2$  a k využitiu ponúka montážnu linku s kolaboratívnymi robotmi, robotizovaný sklad, 5-osé a 3-osé obrábacie centrum, technológiu AR/VR a ďalšie. [26]



Obr. 13: Náhľad RICAIP TestBedu [26]

### TestBed CIIRC ČVUT

Opäť sa jedná o TB, ktorý je súčasťou projektu RICAIP. Nachádza sa v Prahe v CIIRC ČVUT (Český inštitút informatiky, robotika a kybernetiky) a rozkladá sa na dvoch poschodiach. Priestory TB sú tak rozložené na  $1640\text{ m}^2$ . Prízemie je zamerané na automatickú montáž, plánovanie a virtuálizáciu výroby. Druhá časť je v suteréne, kde sa nachádzajú výrobné stroje a technológie. Technológie TB umožňujú optimalizáciu výrobných systémov, diagnostiku a prediktívnu údržbu produktov v rámci ich životného cyklu. [27]



Obr. 14: Náhled TestBedu CIIRC ČVUT [27]

### TestBed 4.0 Košice

Jedná sa o prvý TestBed v rámci Industry 4.0 na Slovensku. TB bol otvorený v roku 2020 a prevádzkovateľmi sú spoločnosť SOVA Digital v spolupráci so Strojníckou fakultou Technickej univerzity Košice. Tak ako aj TB v Českej republike bude košický TB slúžiť k testovaniu riešení z praxe, vzdelávaniu študentov a výskumníkov z univerzity. Všeobecne teda podporí výskum a vývoj aplikácií pre priemysel. [28]



Obr. 15: TestBed 4.0 [28]



## 4 PROSTRIEDKY PRE TVORBU DIGITÁLNYCH DVOJČIAT

Ako už bolo v úvode spomenuté, k funkčnosti DD je nutná obojsmerná komunikácia. Digitálne dvojča vo všeobecnosti má niekoľko oblastí využitia. Prostriedky opísané v tejto kapitole sa zameriavajú na tvorbu DD výrobnjej bunky. Výrobné bunky sa väčšinou skladajú z niekoľkých stanovišť/technológií a riadiaceho systému. Riadiaci systém ovláda všetky technológie, riadi výrobu bunky ako celku a zabezpečuje obojsmernú komunikáciu. Zabezpečuje tak, že informácie poskytované pre fyzický systém sú zhodné s informáciami pre digitálne dvojča.

K tvorbe digitálneho dvojčaťa výrobnjej bunky je možné použiť niekoľko softvérov. Tieto softvéry by mali byť schopné vytvoriť 3D reprezentáciu technológií výrobnjej bunky pomocou CAD modelov s príslušnými kinematickými väzbami a senzormi. Ďalej by mali poskytovať možnosť simulácie procesov a komunikácie s nadriadeným riadiacim systémom.

V nasledujúcej časti budú uvedené príklady softvérov pre tvorbu digitálnych dvojčiat. Tieto softvéry budú rozdelené na simulačné prostredia a riadiace systémy. Okrem uvedených príkladov je možné použiť akékoľvek iné softvéry pre tvorbu DD, ktoré splňujú požadované vlastnosti.

### 4.1 Riadiace systémy

#### 4.1.1 B&R Automation Studio

B&R Automation Studio je softvér, v ktorom je možné programovať PLC a priemyselné PC spoločnosti B&R. Momentálne je používaná štvrtá generácia tohto systému, Automation Studio 4. Poskytuje programovacie jazyky IEC 61131-3 a ANSI C, ktoré je možné kombinovať. Všetky jazyky používajú rovnaké dátové typy a knižnice, čo uľahčuje ich kombináciu. Automation Studio má integrovaný vizualizačný systém, pomocou ktorého je možné jednoducho ovládať procesy, a tak nie je nutné použiť externý vizualizačný nástroj. Tento softvér tiež obsahuje diagnostické nástroje, ktoré sú využívané k zisťovaniu informácií o systéme. [29]

#### 4.1.2 Siemens TIA Portal

TIA (Totally Integrated Automation) Portal je komplexná inžinierska platforma, ktorá prináša jednoduché programovanie a diagnostiku automatizačného hardvéru a softvéru Siemens. Podobne ako B&R Automation Studio, tak aj TIA Portal využíva rôzne knižnice, ktoré uľahčujú integráciu. Najčastejšie sa využíva na riadenie

automatizačních linií obsahujících různé komponenty ako dopravník, robot, různé pohony a další. [30]

### 4.1.3 Beckhoff TwinCAT 3

Riadiaci softvér TwinCAT spoločnosti Beckhoff bol uvedený na trh v roku 1986. Aktuálne sa používa tretia generácia tohto softvéru. TwinCAT 3 riadi viaceré systémy ako PLC, CNC, NC a robotické systémy v reálnom čase. K programovaniu v reálnom čase je možné použiť programovacie jazyky C/C++. Umožňuje prepojenie s Matlab/Simulink a ku komunikácií s užívateľským rozhraním používa otvorené štandardy. [31]

## 4.2 Simulačné prostredia

### 4.2.1 ABB RobotStudio

RobotStudio je populárny nástroj pre offline programovanie a simuláciu robotických aplikácií. Vybavený je virtuálnym ovládačom, ktorý zaručuje, že procesy programované v RobotStudiosu budú totožné s tými skutočnými. Softvér umožňuje jednoducho testovať, optimalizovať a zostavovať robotické aplikácie bez akýchkoľvek prestojov reálneho robota. Umožňuje taktiež import CAD modelov, pomocou ktorých je možné vytvoriť celé výrobné linky alebo bunky. Tie je následne možné vizualizovať v reálnom alebo virtuálnom prostredí pomocou mobilného zariadenia alebo okuliarov na virtuálnu realitu. [32]

### 4.2.2 Siemens NX

Spoločnosť Siemens poskytuje softvér Siemens NX, ktorý sa používa pri tvorbe 3D modelov obrábacích strojov. Okrem obrábacieho stroja je možné pomocou NX vytvárať aj modely iných komponentov. Nadstavbou k softvéru NX je softvér s názvom Mechatronics Concept Designer (MCD). V prostredí MCD je možné vytvoriť virtuálne senzory, akčné členy, priradiť jednotlivým modelom fyzikálne vlastnosti a vytvoriť kinematické väzby. Po vytvorení týchto prepojení je možné v NX zrealizovať potrebné výpočty a simulácie. [30]

### 4.2.3 Unity 3D

Unity 3D je engine, ktorý je používaný hlavne na tvorbu hier, vizualizácií alebo simulačných procesov. Unity umožňuje import 3D modelov, s ktorými je možné ďalej pracovať. Ponúka nástroje na tvorbu pokročilých animácií, a to vďaka zabudovanému prepojeniu so softvérom Visual Studio a skriptovaciemu rozhraniu API C#. [33]

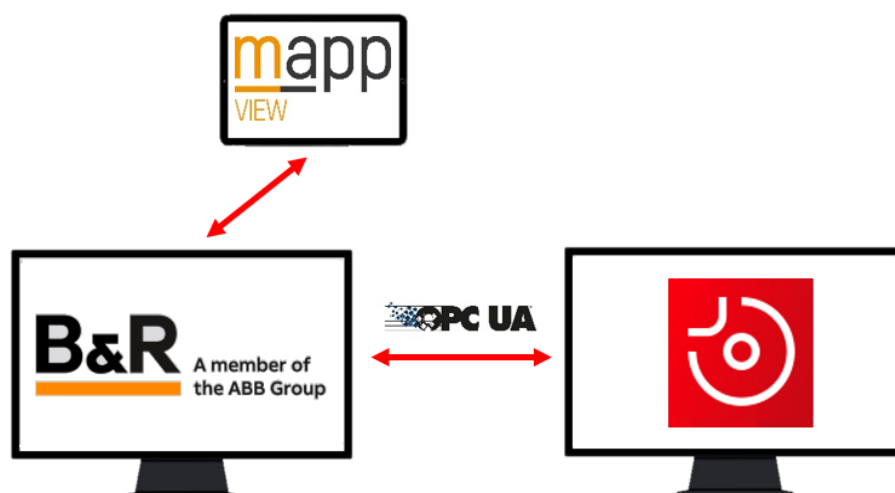
## 5 NÁVRH DIGITÁLNEHO DVOJČAŤA VÝROBNEJ BUNKY

Diplomová práca sa venuje digitálnemu dvojčatu fiktívnej výrobnjej bunky. Práca je inšpirovaná DD vo firme Intemac Solutions s.r.o., kde prebieha vývoj DD reálnej výrobnjej bunky. Využitie znalostí nadobudnutých pri vývoji DD (v praxi), prináša zdroj informácií ako správne postupovať pri tvorbe a včas sa vyhnúť problémom vzniknutým pri prepojení reálneho a digitálneho sveta. Porovnanie týchto dvojčiat taktiež zvýrazní praktické využitie DD (digitálne dvojča) vo výrobe.

Digitálne dvojča fiktívnej bunky zobrazuje výrobné procesy, ktoré napodobňujú procesy v reálnej výrobnjej bunke. Výroba vo fiktívnej bunke je obmedzená na 3 rôzne výrobky. Jedná sa o príruby servomotorov. Je nutné brať na vedomie, že sa jedná o vzorové produkty a postup ich výroby v DD nemusí odpovedať realite. Výrobky slúžia len ako nástroj na ukážku procesov a technológií digitálneho dvojčata. Fiktívna bunka má 6 stanovišť a riadiaci systém PLC. Prvým je vstupný dopravník, na ktorom sú dodávané polotovary do výroby. Druhým v poradí je kamerový systém, ktorý sníma vstupný dopravník a ukladá polohy jednotlivých polotovarov. Tieto hodnoty sú následne odoslané do PLC, ktoré ich odovzdá robotovi. Robot sa nachádza v centre výrobnjej bunky a obsluhuje všetky stanovišťa. Po obdržaní dát o polohe polotovaru, robot pomocou čelustového gripu odoberie polotovar zo vstupného dopravníku a vloží ho do CNC. CNC je štvrtým stanovištom vo výrobnom procese. Akonáhle je dokončené obrábanie, dostane robot príkaz presunúť produkt z CNC do meracieho zariadenia. Meracie zariadenie slúži na kontrolu polôh dier, ktoré boli vytvorené v CNC počas obrábania. Po úspešnej kontrole dostane robot pokyn vložiť produkt z meracieho zariadenia na výstupný dopravník. Výstupný dopravník ukončuje výrobný cyklus.

Pre tvorbu DD boli vybrané softvéry ABB RobotStudio, ktorý slúži na simuláciu a vizualizáciu 3D modelov a B&R Automation Studio, ktorý zabezpečuje ovládanie DD výrobnjej bunky. Do ABB RobotStudia boli implementované 3D modely, ktoré predstavujú jednotlivé stanovišťa. Tieto modely boli obohatené o kinematické väzby a senzory tak, aby ich správanie čo najviac odrážalo správanie reálnych komponentov. V B&R Automation Studiu bol vytvorený projekt, ktorý bol nakonfigurovaný pre simuláciu. Na ovládanie bunky ako celku bol použitý spôsob eager evaluation.

Jedným z hlavných cieľov práce, je odhalenie výhod a nevýhod, ktoré prinášajú tieto dva softvéry v spojení s tvorbou DD. K výmene informácií medzi softvérmi je používaný OPC UA komunikačný protokol, konkrétne model klient – server. Server má zastúpenie v softvéri B&R Automation Studio a komunikuje s ABB RobotStudios, kde je vytvorených niekoľko klientov. K ovládaniu bunky je používané grafické rozhranie vytvorené na strane PLC.



Obr. 16: Schéma komunikácie

K tomu, aby bola tvorba akéhokoľvek DD úspešná, je nutné správne postupovať nielen pri vývoji DD ale hneď od začiatku vývoja samotného projektu. V ďalšej časti kapitoly je všeobecne popísaný postup, ktorý by mal byť dodržaný pri tvorbe DD výrobnjej bunky, a to nie len v softvéroch ABB RobotStudio a B&R Automation Studio, ale všeobecne pri využití akýchkoľvek SW.

## 5.1 Všeobecný postup tvorby digitálneho dvojčaťa

Prvým krokom pri tvorbe akejkoľvek simulácie je príprava 3D modelov. Modely sú častokrát dostupné od výrobcov jednotlivých zariadení v CAD formáte. Existujú však aj internetové knižnice so širokou škálou 3D modelov, ktoré si užívateľ môže stiahnuť zadarmo. Vo väčšine prípadov je dobré modely zjednodušiť tak, aby obsahovali len dôležité časti pre simuláciu (pohyblivé časti, miesta kde môže dôjsť ku kolíziám atď.).

Po prípravení 3D modelov, je nutné modely importovať do simulačného prostredia. Pri počiatočnom importe je vhodné importovať všetky 3D modely bunky naraz a teda bunku ako celok. V tomto prípade je možné už v CAD softvéri vytvoriť požadované rozloženie jednotlivých komponentov bunky. Druhým prístupom je jednotlivý import komponentov a následné rozloženie v simulačnom

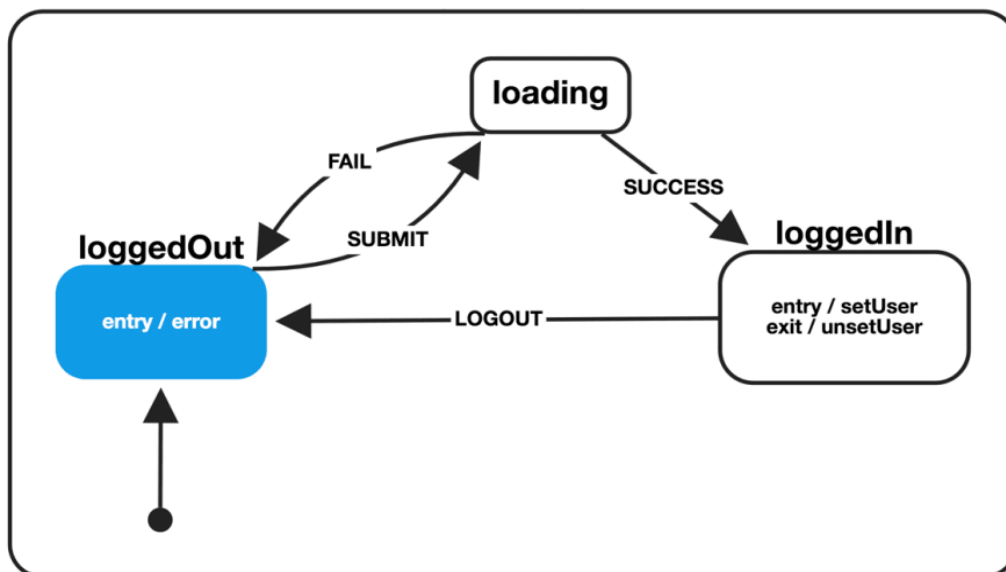
softvéři. Pri zvolení prvého prístupu je však nutné mať jednotlivé komponenty uložené aj samostatne. To z toho dôvodu, aby bolo možné v budúcnosti model v DD upraviť a aktualizovať.

Ďalším krokom je pridanie kinematiky a sensoriky do zatiaľ neaktívneho modelu. V tomto momente záleží už na vybranom simulačnom softvéři. Niektoré softvéry, dokážu preniesť kinematické väzby z CAD SW, čo opäť uľahčí prácu rovnako ako pri rozmiestňovaní jednotlivých komponentov bunky. Iné simulačné SW, zase ponúkajú tvorbu mechanizmov, ktoré po definovaní parametrov dokážu vytvoriť pohyblivé modely. Tieto mechanizmy reagujú napríklad na zmenu požadovanej vzdialenosti a presun z jedného miesta do druhého je animovaný. Mechanizmy teda simulujú všetky pohyblivé časti výrobnjej bunky, ako sú napríklad zverák, dvere CNC, dopravník a ďalšie. Pri programovaní riadenia bunky je nutné myslieť na to, na aké zmeny reagujú mechanizmy v simulačnom SW a snažiť sa tomu prispôbiť aj ovládanie reálnych pohyblivých komponentov.

Doplnenie sensoriky do bunky prinesie možnosti ovládania jednotlivých komponentov. Sensory sú doplnené na tie miesta, kde sa budú nachádzať aj v reálnej bunke. Využívajú sa hlavne ku kontrole procesov, ako je pohyb dopravníka, kontrola súčiastok na jednotlivých miestach, meranie vzdialenosti a ďalšie. V kontexte DD, môžu byť senzory v simulačnom softvéři doplnené aj na miesta, kde sa s nimi v reálnej bunke nepočíta. Dôvodom je, že ak v reálnej bunke využívame napríklad snímanie hodnoty krútiaceho momentu, simulačné prostredie vo väčšine prípadov nemá možnosť sledovania tejto hodnoty.

Po pridaní modelov, mechanizmov a sensoriky je simulačný model pripravený prijímať pokyny z riadiaceho systému. Voľba riadiaceho systému by nemala ovplyvniť fungovanie DD. Riadiaci systém však musí obsahovať možnosť simulácie PLC. Napríklad, v SW B&R Automation Studio sa technológia umožňujúca simuláciu PLC nazýva ARSim. ARSim simuluje správanie PLC, ktoré je nakonfigurované pre daný projekt. Rovnako tak SW Siemens TIA Portal má možnosť simulácie, musí byť však doplnený o ďalšie softvéry.

Ďalej sú v riadiacom systéme vytvorené dátové štruktúry a premenné, ktoré môžu byť lokálne alebo globálne. Je nutné dbať na obmedzenia simulačného SW a tak definovať dátové typy správne. Pri spätnej úprave dátových typov, môže dôjsť k viacerým komplikáciám. Po vytvorení dátových štruktúr a premenných, sú vytvorené jednotlivé *tasky* na ovládanie komponentov bunky. V automatizácii sa často využíva ako programovací model stavový automat. Stavový automat (konečný) spočíva v tom, že obsahuje niekoľko stavov, ktoré na seba nadväzujú a sú prepojené. Task po spustení vždy začne v prvom stave a ak sú splnené podmienky, prejde do stavu druhého. Jednotlivé stavy môžu odkazovať na ktorýkoľvek stav v stavovom automate. Pomocou jednotlivých stavov je tak možné vytvoriť cyklický program.



Obr. 17: Príklad stavového automatu pre prihlásenie [34]

Bunka môže byť ovládaná jedným stavovým automatom, ale v prípade rozsiahlejších projektov je vhodné zvoliť niekoľko stavových automatov, ktoré medzi sebou komunikujú pomocou globálnych premenných a štruktúr. To znamená, že jednému stanovištiu v simulačnom SW alebo v reálnom svete (robot, vision systém, cnc) odpovedá jeden stavový automat. Tento prístup udrží projekt v riadiacom systéme prehľadný.

Akonáhle je hotové programovanie, je nutné zabezpečiť aby simulačný SW a riadiaci SW medzi sebou dokázali komunikovať. Jednou z možností je využitie komunikačného protokolu OPC UA. V tomto prípade je nutné nakonfigurovať OPC UA server, klientov a povoliť premenné k zdieľaniu na OPC UA. Keď sú tieto kroky hotové a SW spolu komunikujú, ďalším krokom je vytvorenie grafického rozhrania pre ovládanie celej bunky. Každý z vyššie spomenutých riadiacich SW má vlastné možnosti tvorby vizualizácie. Vizualizácia by mala byť prehľadná, jednoduchá a mala by zobrazovať všetky potrebné informácie pre operátorov. Posledným krokom pred zavedením DD do výroby je jeho testovanie. To overí funkčnosť mechanizmov, senzorov, správnosť stavových automatov a vizualizáciu.

## 6 ABB ROBOTSTUDIO

Príprava simulačného prostredia je dôležitým krokom pri tvorbe digitálneho dvojčata. Je nutné pripomenúť, že softvér RS (RobotStudio) je licencovaný a bez licencie ponúka len niekoľko funkcií. Pre vytvorenie digitálneho dvojčata je tak nutné zakúpenie licencie. V tejto kapitole sú podrobne opísané kroky pri príprave digitálneho dvojčata v prostredí RS. Postup je rozdelený na niekoľko úsekov.

### 6.1 Nástroje v ABB RobotStudios

Sú dva jasné dôvody, prečo bol vybraný práve softvér od spoločnosti ABB. Prvým je použitie robota od tejto spoločnosti a druhým je možnosť tvorby flexibilných simulácií. Na nasledujúcom obrázku sú zobrazené záložky v softvéri ABB RobotStudio. Ich funkcia je v skratke vysvetlená.



Obr. 18: Hlavný panel v softvéri ABB RobotStudio

#### Home

Záložka Home poskytuje funkcie: vkladanie 3D modelov z knižnice softvéru, vkladanie externých 3D modelov, pridanie virtuálneho kontroléru a nástroje na prácu s robotom (vytvorenie targetu, synchronizáciu stanice do rapidu a opačne, grafické nástroje a možnosti manuálneho pohybovania 3D modelmi a jednotlivými kĺbmi robota).

#### Modeling

V tejto záložke sú nástroje spojené s úpravou a manipuláciou 3D modelov. Jedná sa o nástroje ako meranie vzdialenosti medzi jednotlivými modelmi, tvorba jednoduchých útvarov a tvorba mechanizmov. Tento nástroj je obzvlášť dôležitý, pretože bol využívaný k tvorbe všetkých pohyblivých modelov.

#### Simulation

Nástroje tejto záložky plynú už z jej názvu. Ponúka nástroje ako kontrola kolízií, spustenie a zastavenie simulácie, simuláciu vstupov a výstupov robota a rôzne spôsoby tvorby záznamov simulácie.

#### Controller

Poskytuje nástroje na prácu s virtuálnym a reálnym kontrolérom.

## RAPID

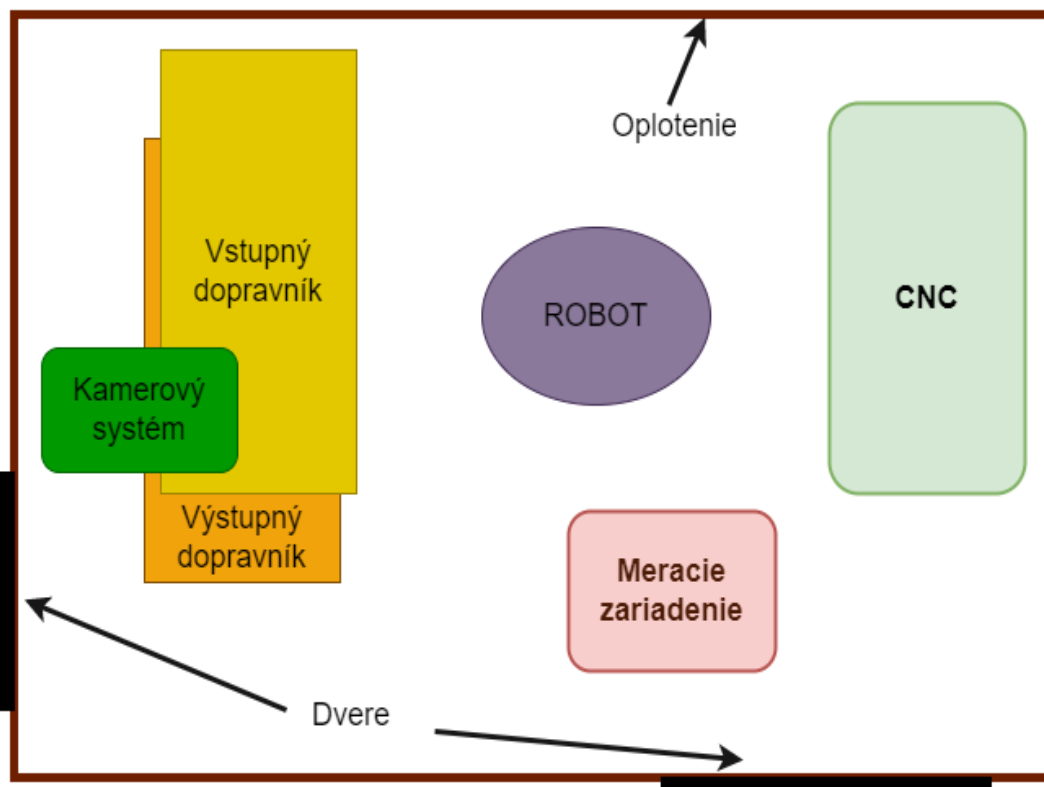
Názov tejto záložky korešponduje s názvom programovacieho jazyka využívaného pre programovanie ABB robotov. Záložka umožňuje náhľad do tasku, v ktorom bežia programy robota. Jednotlivá štruktúra a vysvetlenie modulov a procedúr je obsiahnutá v podkapitole č. 6.6.

## Add-Ins

Posledná záložka slúži na inštaláciu doplnkových nástrojov. Jedná sa hlavne o softvérové nástroje. V tejto záložke sa taktiež inštaluje samotný RobotWare. RobotWare je riadiaci softvér na ovládanie robotov.

## 6.2 Príprava a import 3D modelov

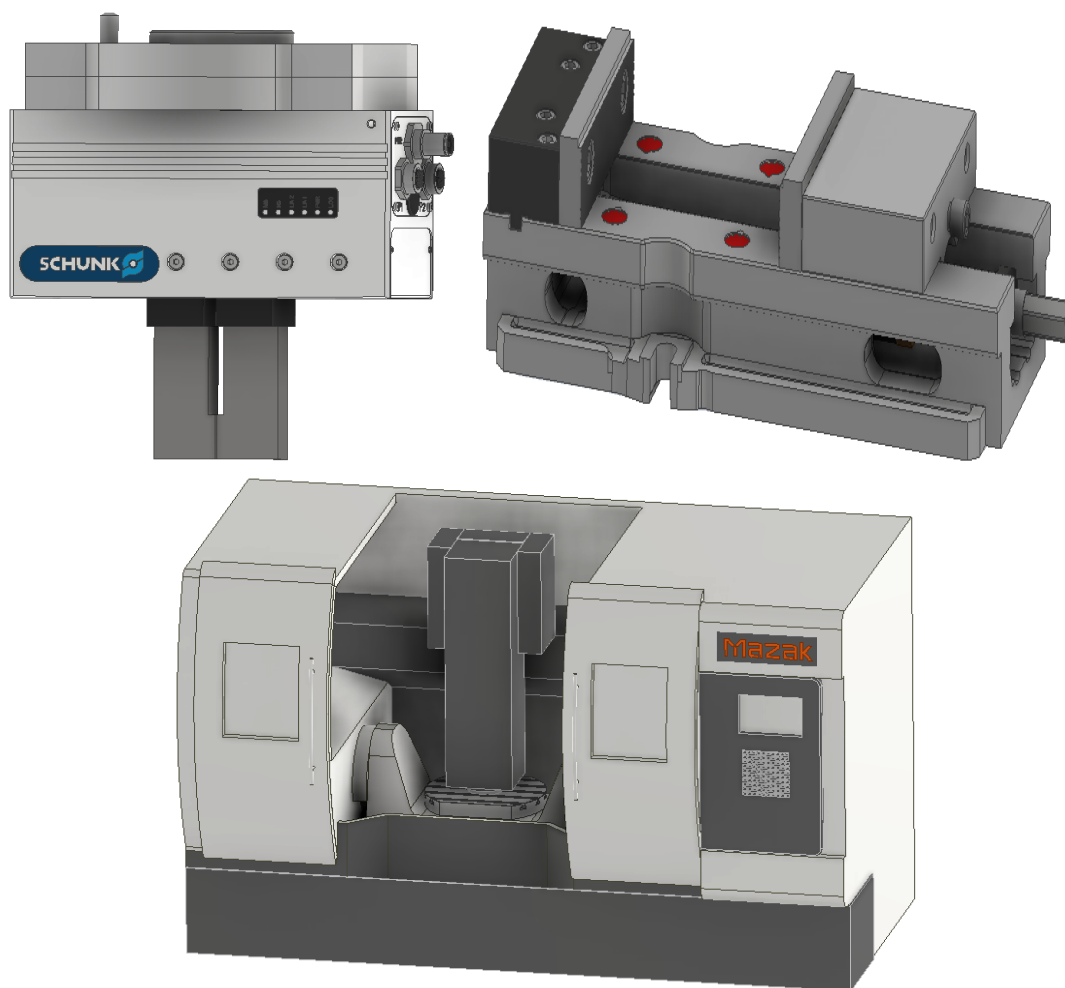
K príprave 3D modelov, bol zvolený softvér Autodesk Inventor 2023. Tu boli upravené (zjednodušené) jednotlivé 3D modely a následne po jednom importované do prostredia RS. Jedná sa o modely totožné s jednotlivými stanovišťami spomenutými v kapitole č. 5. Okrem modelov stanovišť boli doplnené modely oplotenia, kontroléru robota a PLC. Opäť je nutné zdôrazniť, že modely použité pri simulácii sú zjednodušené a ich významom je vyzdvihnúť možnosti simulačného softvéru. Preto sa ich funkčnosť a konštrukcia môže mierne líšiť od reálnych modelov.



Obr. 19: Schéma rozmiestnenia jednotlivých stanovišť

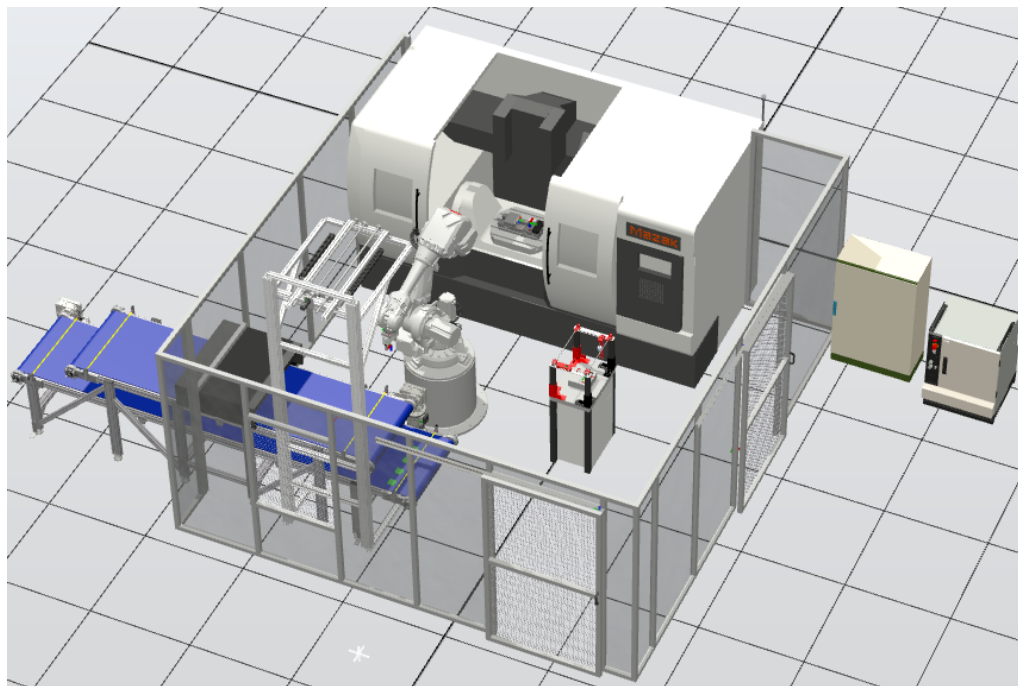


Modely vstupno-výstupného dopravníku, kamerového systému a kontrolérov boli inšpirované digitálnym dvojčatom firmy Intemac Solutions s.r.o. Tieto modely boli následne upravené, aby zapadli do štruktúry digitálneho dvojčata v kontexte tejto práce. Model grippru bol získaný zo stránok spoločnosti Schunk [35]. Konkrétne sa jedná o model EGI 080-PN s možnosťou komunikácie cez ProfiNet. Oplotenie výrobnjej bunky bolo vymodelované v prostredí Autodesk Inventor 2023. Robot bol pridaný z knižnice softvéru RS. Konkrétne sa jedná o robota ABB IRB4600\_45\_205. Je to 6-osý priemyselný robot, s nosnosťou 45 kg a dosahom 2,05 m. Ostatné modely ako CNC, meracie zariadenia a zverák boli získané z [36]. Jedná sa o verejnú knižnicu 3D modelov.



Obr. 20: 3D model grippru, zveráka a CNC

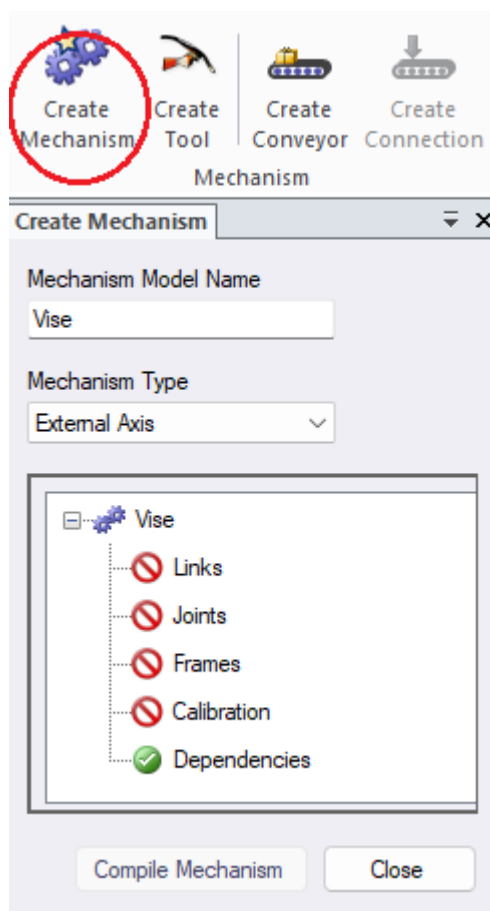
Modely boli vyexportované vo formáte .sat a nie vo formáte .step, pretože .step converter v RS nie je súčasťou licencie. Po importe boli jednotlivé 3D modely rozmiestnené podľa schémy na obrázku č. 19.



Obr. 21: Náhľad výrobnjej bunky v softvéri ABB RobotStudio

### 6.3 Pridanie kinematických väzieb

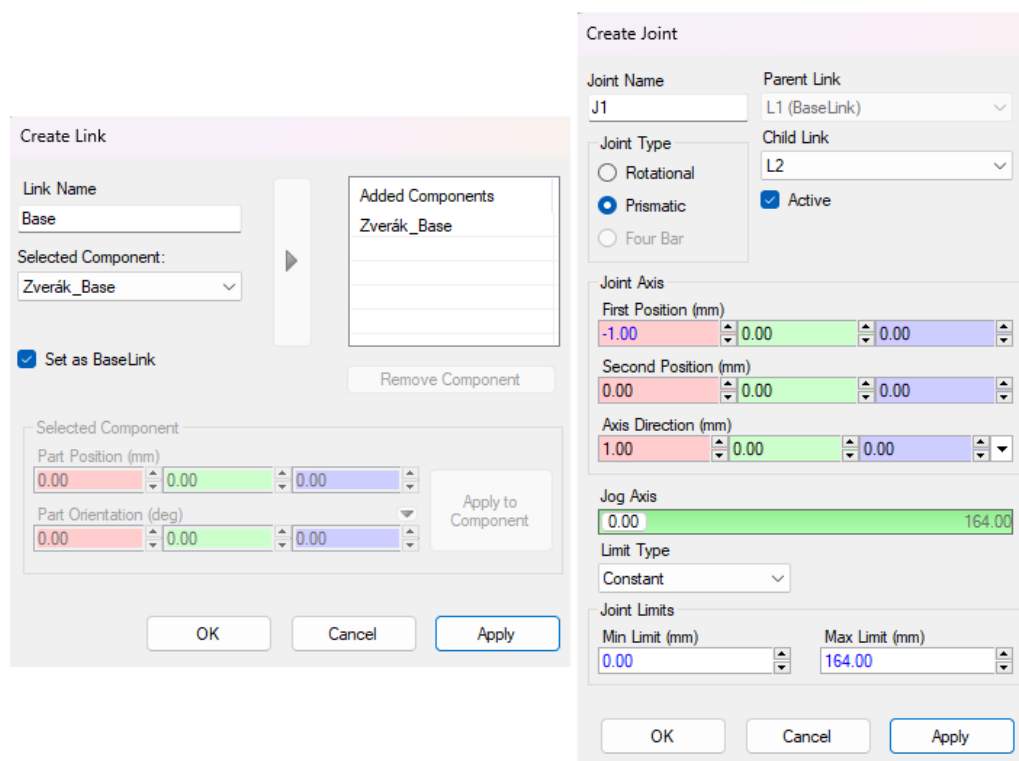
Softvér ABB RobotStudio nedokáže zachovať kinematické väzby jednotlivých modelov, ktoré boli vytvorené v CAD softvéri. Preto bolo nutné definovať kinematické väzby po importe modelov, teda v prostredí RS. V RS sa kinematické väzby vytvárajú pomocou nástroja tvorba mechanizmov v záložke modeling. Rozlišované sú druhy mechanizmov ako robot, nástroj, externá os a zariadenie. Po vybraní druhu mechanizmu a zadaní názvu, nasleduje tvorba mechanizmu v piatich krokoch. Týmito krokmi sú: prepojenie geometrie/3D modelov, definícia kĺbov (rotačné alebo posuvné), určenie stredového bodu nástroja, kalibrácia a definícia závislostí medzi kĺbmi (nutné sú aspoň 2 kĺby).



Obr. 22: Sprievodca tvorbou mechanizmu

Pre správne fungovanie stanovišť bolo nutné vytvoriť 8 mechanizmov. Jednotlivými mechanizmami sú: zverák, dvere na CNC, pohyb kamery pri snímaní, gripper, dvojica dverí, stôl v meracom zariadení a samotné meracie zariadenie. Ako príkladový mechanizmus bol vybraný zverák, na ktorom je opísaný podrobný postup tvorby.

Ešte pred prvým krokom bolo potrebné rozdeliť časti 3D modelu na stacionárne (základňa) a pohyblivé. V tomto prípade to bolo jednoduché, pretože jedna čelusť zveráka bola súčasťou základne a druhá bola pohyblivá. Po zadaní názvu bola ako druh mechanizmu zvolená externá os. Prvým krokom bolo prepojenie 3D modelov mechanizmu, kedy jeden z modelov musí byť definovaný ako základňa. Po prepojení 3D modelov, bolo nutné definovať kĺby. V tomto prípade sa jednalo o jeden posuvný kĺb. Ďalšími nutnými špecifikáciami bol smer v ktorom sa bude kĺb pohybovať a určenie limitných bodov kĺbu. Vzhľadom k umiestneniu zveráku, bol nastavený smer na kladný voči osy x. Limitné hodnoty kĺbu boli 0 a 164 mm.



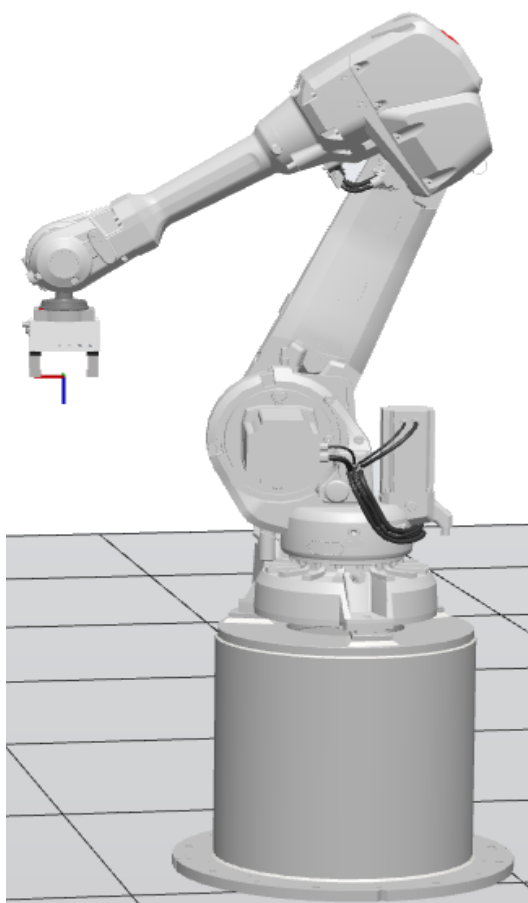
Obr. 23: Prvý a druhý krok pri tvorbe mechanizmu

Po definovaní kĺbu bolo ďalším krokom vytvorenie stredového bodu nástroja. Stredový bod nástroja bol umiestnený do stredu nepohyblivej čeľuste. Tento bod slúži ako referenčný bod pre všetky objekty, ktoré sú pripojené k danému mechanizmu. Posledným krokom bola kalibrácia kĺbov. Pri mechanizme typu robot je nutné vytvoriť jednu kalibráciu. Pre externú os je nutné kalibrovat každý kĺb a pre mechanizmy typu zariadenie a nástroj nie je kalibrácia nutná ale je možná. Dokončenie týchto krokov umožnilo zostaviť mechanizmus a vytvoriť preddefinované pozície. Tieto pozície boli neskôr využívané pomocou *Smart Components* (ďalej tiež SMC). V prípade mechanizmu zveráku boli definované dve pozície. V oboch prípadoch sa jednalo o limitné pozície a teda úplné otvorenie a zatvorenie zveráku. Jednotlivé kĺby mechanizmu je možné posúvať aj manuálne. Tento postup bol následne použitý taktiež na vytvorenie ostávajúcich 6 mechanizmov. Mechanizmus gripuru, bol vytvorený až po importovaní robota. [37]

## 6.4 Pridanie robota a gripuru

Ako už bolo spomenuté v prvej časti kapitoly, robot bol pridaný z knižnice ABB RobotStudio. Po umiestnení robota na stojan do stredu výrobnjej bunky bolo nutné pridať virtuálny kontrolér, vďaka ktorému je možné robota ovládať. Virtuálny kontrolér bol pridaný zo záložky Home. Virtuálny kontrolér je možné

pridať manuálne alebo z rozhrania stanice. Tretou možnosťou je pridanie reálneho kontroléru. V tomto prípade bola využitá možnosť pridania virtuálneho kontroléru z rozhrania stanice, ktorá je najrýchlejšia a najjednoduchšia. Po pridaní robota bol na neho pripojený gripper a vytvorený mechanizmus grippru. Tentokrát bol ako druh mechanizmu vybraný nástroj. Kroky pri tvorbe mechanizmu boli rovnaké ako pri mechanizme typu externá os.



Obr. 24: Robot ABB IRB4600\_45\_205 s gripprom Schunk EGI 080-PN

## 6.5 Ovládanie bunky

Ovládanie bunky ako celku zabezpečujú štruktúry SMC, ktoré slúžia na vykonávanie procesov počas simulácie. Jedná sa o procesy ako automatický pohyb mechanizmov, spúšťanie dopravníku, pripájanie a odpájanie objektov, reakcia na senzory a komunikácia s PLC. Logika bunky je tvorená v záložke Simulation, v nástroji *Station logic*. Tvorba logických štruktúr spočíva vo vytváraní digitálnych alebo analógových vstupov a výstupov, ktoré sú používané na ovládanie SMC.

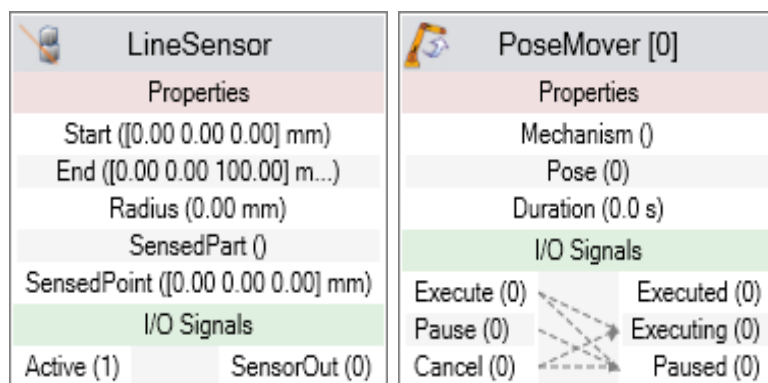
### 6.5.1 Smart Components (SMC)

Majú formu blokov, ku ktorým je možné mapovať vstupy a výstupy. Vstupy väčšinou spúšťajú samotný SMC, ktorý následne vykoná činnosť a po dokončení má na výstupe pulz vo forme logickej 1. Existuje veľké množstvo SMC, ktoré je možné spoločne kombinovať a vytvoriť tak komplexnú simuláciu reálneho zariadenia.

#### Čiarový, plošný a objemový senzor

Tieto tri SMC prijímajú na vstupe jeden digitálny signál, ktorý určuje či sú aktívne alebo nie a na výstupe vracajú logickú 1 v prípade, že snímajú objekt. Pre čiarový senzor je nutné nastaviť začiatok, koniec a rádius senzoru. V prípade plošného senzoru to je nulový bod a vzdialenosť v dvoch osách, čo vytvorí požadovanú rovinu. Posledným je objemový senzor, pri ktorom je nutné nastaviť rohový bod, orientáciu, dĺžku, výšku a šírku. Ďalej spomedzi senzorov je možné využiť senzor na detekciu kolízií, polohový senzor (sníma polohu súčiastky počas simulácie) a ďalšie.

Umiestnenie senzorov vo výrobnej bunke, pomáha samotnej výrobe, ale tiež aj k ovládaniu mechanizmov. Čiarové senzory boli umiestnené na dopravníky, kde boli využité na ich zastavenie ak mal senzor na výstupe logickú 1. Ďalej boli použité pre kontrolu polohy mechanizmov. Plošné senzory boli použité v čelustiach zveráku a v čelustiach posuvného stola meracieho zariadenia. Slúžili k tomu, že ak senzor nasnímal objekt, došlo k zastaveniu mechanizmu. Takto bolo dosiahnuté reálne správanie zveráku.



Obr. 25: SMC čiarového senzoru a polohovača mechanizmov

#### Polohovač mechanizmov

Ďalším často využívaným SMC je polohovač mechanizmov. Počas simulácie je využívaný k pohybu jednotlivých mechanizmov. K správne fungovaniu je nutné definovať, ktorý mechanizmus bude ovládaný, do ktorej pozície bude mechanizmus presunutý a čas presunu z jednej polohy do druhej. Digitálne vstupy v tomto prípade odpovedajú spusteniu, zastaveniu a zrušeniu pohybu vykonávaného polohovačom. Digitálne výstupy sú taktiež 3 a informujú o vykonávaní pohybu, dokončení pohybu

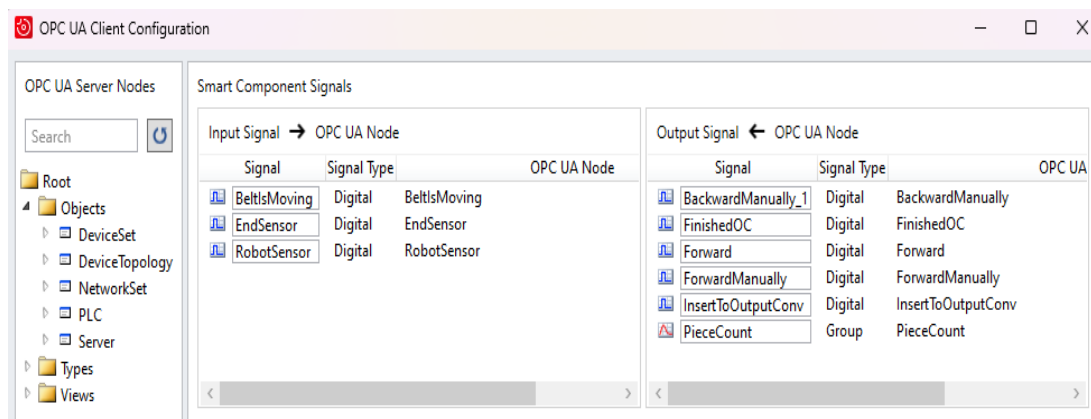
a zastavení pohybu. V prípade potreby flexibilnejšieho narábania s jednotlivými mechanizmami existuje možnosť použitia SMC s názvom polohovač kĺbov. Štruktúra SMC je rovnaká, nie je však nutné používať preddefinované polohy ale je možné nastavovať konkrétne hodnoty na zvolené kĺby.

V DD boli použité len polohovače mechanizmov, pretože bolo vždy jasné do akej polohy má byť mechanizmus presunutý. V prípade, že to jasné nebolo a poloha mechanizmu bola rôzna, využitá bola kombinácia senzorov a mechanizmov.

### OPC UA Smart komponent

Ako už bolo spomenuté, ku komunikácií medzi PLC a DD bol využitý komunikačný protokol OPC UA. ABB RobotStudio ponúka SMC, ktorý v komunikácií figuruje ako klient. To zabezpečuje prenos informácií medzi PLC a DD. Po pridaní SMC, je nutné pridať IP adresu serveru na ktorý sa má klient pripojiť. Po úspešnom pripojení sa v konfigurácii zobrazia štruktúry, ktoré sú v PLC povolené ku komunikácií cez OPC UA. Premenné z týchto štruktúr môžu byť následne pridané do klienta. Je však nutné rozdeliť premenné na vstupy a výstupy z hľadiska PLC.

Pre prehľadnosť v signáloch bolo v práci využitých 8 OPC UA klientov pre každú technológiu a ďalšie dva osobitne pre prenos rýchlosti vstupného a výstupného dopravníku.



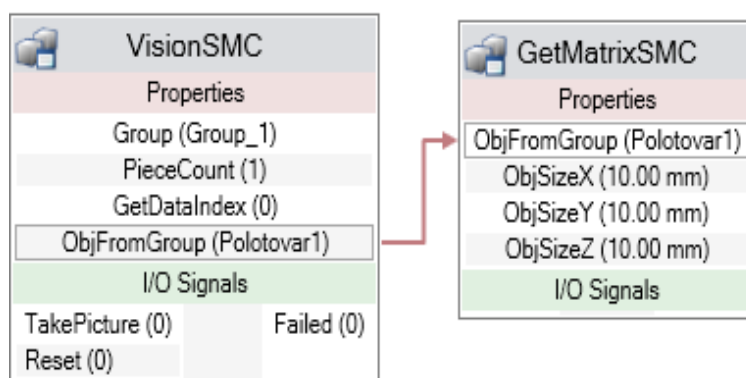
Obr. 26: Rozhranie OPC UA SMC

### 6.5.2 Vývoj Smart Components

V DD bolo použitých niekoľko ďalších SMC z knižnice RS. Existuje aj možnosť vytvorenia vlastného SMC. V tomto prípade sa jedná o využitie programovacieho jazyku C# v kombinácii s XML (*eXtensible Markup Language*). Všetky potrebné informácie a materiály k tvorbe SMC sú dostupné z [38].

## Kamerový systém

Možnosť vývoja SMC bola využitá pri tvorbe kamerového systému. Konkrétne bolo nutné vytvoriť dva SMC, ktorých funkcionality nebolo možné nahradiť žiadnym SMC z knižnice ABB RobotStudio. Vytvorený bol SMC, ktorý sa stará o snímanie polotovarov na dopravníku a nahrádza tak reálnu kameru v DD. Nasnímané polotovary sú uložené do zoznamu SMC, a na základe číselného indexu zaslaného z PLC, vráti SMC názov polotovaru. DD následne odošle do PLC dáta o polotovare ako pozícia polotovaru a rozmery polotovaru. Práve kvôli rozmerom polotovaru bolo nutné vytvoriť druhý SMC. Ten vracia rozmery objektu, ktorý je na neho napojený.



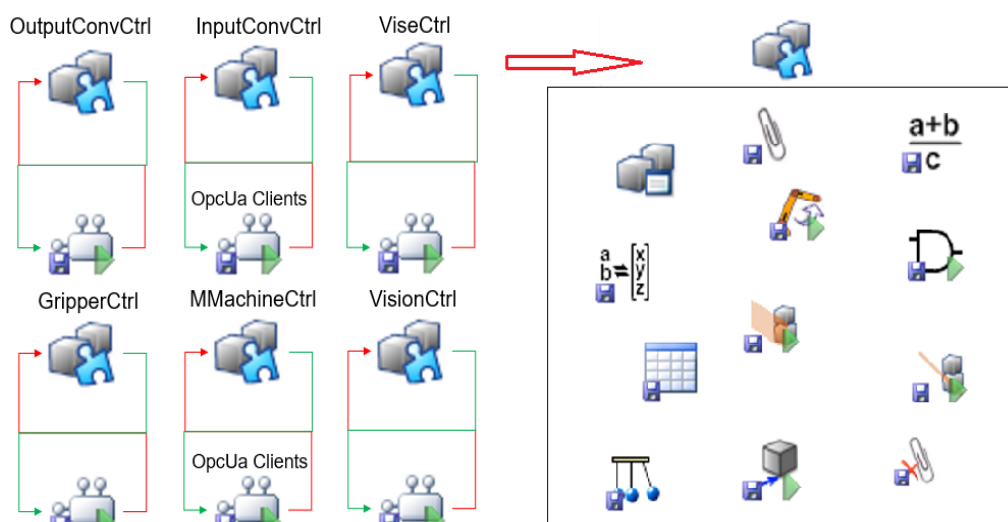
Obr. 27: Vytvorené SMC a ich prepojenie

### 6.5.3 Logika bunky

Po stručnej definícii smart komponentov je nutné definovať ako funguje celá výrobná bunka počas simulácie. Jednoduchá schéma, ktorá popisuje fungovanie logiky bunky sa nachádza na obrázku 28. V ľavej časti je náhľad OPC UA klientov a SMC pre jednotlivé stanovišťa a v pravej časti je znázornené koľko druhov SMC môže obsahovať jedna technológia.

1. Ovládanie bunky zabezpečuje PLC, ktoré posiela signály cez OPC UA.
2. Signály sú v ABB RobotStudios prijímané z PLC a odosielané do PLC pomocou OPC UA klientov.
3. Každá stanovišťa v bunke má svoj vlastný SMC k ovládaniu a svojho vlastného OPC UA klienta.
4. Jednotlivé stanovišťa sú zložené z veľkého množstva SMC, ktoré sú medzi sebou prepojené a zaručujú správne fungovanie daného stanovišťa.





Obr. 28: Schéma logiky výrobnéj bunky

Konkrétny príklad ovládania stanovišta je popísaný na kamerovom systéme. Po prijatí signálu k nasnímaniu polotovarov z dopravníku, je ako prvý spustený mechanizmus, ktorý pohybuje kamerou. So spustením kamery sú spustené aj ďalšie dva SMC, ktoré ovládajú osvetlenie kamerového systému. Akonáhle je kamera v koncovej polohe, je vytvorený zoznam všetkých objektov na vstupnom dopravníku a do PLC je odoslaný signál o dokončení snímania a počet nasnímaných objektov. PLC následne vykoná filtráciu objektov na dopravníku tak, že postupne posieľa do DD indexy objektov a VisionSMC reaguje na indexy a na výstupe poskytuje názov daného polotovaru. Tento názov je napojený na snímač polohy a snímač rozmerov. Snímač polohy vráti polohu polotovaru na dopravníku v X a Y súradnici a jeho rotáciu RZ okolo osy Z. Snímač rozmerov určí výšku, šírku a dĺžku polotovaru. Tieto údaje sú poslané do PLC, kde sú kontrolované a ak sa polotovar nachádza v dosahu robota, poloha polotovaru je uložená. Takýmto spôsobom sú vyfiltrované všetky polotovary, ktoré boli nasnímané kamerovým systémom. V PLC sú vytvorené dve skupiny polotovarov a to GoodPieces a BadPieces. Polohy polotovarov zo skupiny GoodPieces sú predávané robotickému ramenu, ktoré ich zahrnie do výroby. Polotovary z druhej skupiny sú ignorované.

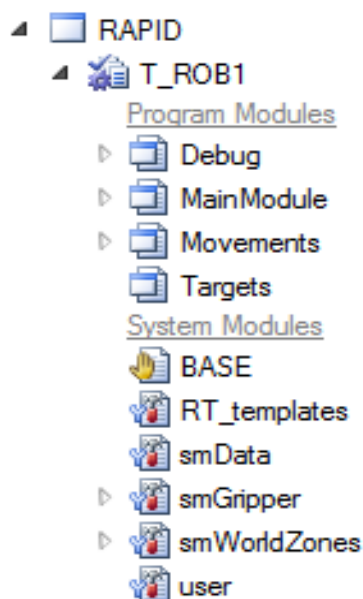
Všetky ostatné stanovišta sú ovládané na rovnakom princípe. Vždy jednotlivé SMC čakajú na signály z PLC a po obdržaní dôjde k spusteniu reťazca SMC, ktoré vykonávajú rôzne činnosti. Príklad logiky stanovišta vytvorenej a prepojenej pomocou SMC sa nachádza v prílohe C.

### 6.5.4 ROBOTemplate

ROBOTemplate je nástroj na komunikáciu a riadenie robotov ABB z prostredia PLC. Táto platforma je do PLC importovaná ako knižnica a do prostredia ABB RobotStudio ako Add-In. Zachováva všetky funkcionality robota a umožňuje upravovanie robotických programov priamo z PLC. Urýchľuje a uľahčuje nasadzovanie robotických ramien do automatizačných liniek. V simulačnom prostredí je možné využívať túto platformu zadarmo a v spojení s reálnym robotom je platforma licencovaná. ROBOTemplate je možné využívať v spojení PLC značiek B&R a Siemens.

## 6.6 Programovanie robota

Po príprave mechanizmov a logiky výrobní bunky, bolo nutné rozpohybovať robota. K programovaniu ABB robotov je využívaný programovací jazyk RAPID. Prístup k tasku je možný zo záložiek Controller alebo RAPID. Po pridaní robota do stanice je automaticky vytvorený task s názvom T\_ROB1. Task je program robota, ktorý beží samostatne ale je možné ho spúšťať aj s inými taskmi naraz. V tasku sa nachádzajú moduly, ktoré sú kategorizované na programové a systémové. Modul je súbor ktorý obsahuje rôzne deklarácie údajov a súbory procedúr. Programové moduly obsahujú dáta, ktoré sú špecifické pre daný program a systémové moduly obsahujú dáta vzhľadom k celému robotickému systému a nezáleží v ktorom tasku sú definované. Procedúry sú používané ako podprogramy, ktoré nevracajú žiadnu hodnotu a obsahujú inštrukcie pre robota. [37]



Obr. 29: Štruktúra tasku robota v DD výrobní bunky

### 6.6.1 Moduly

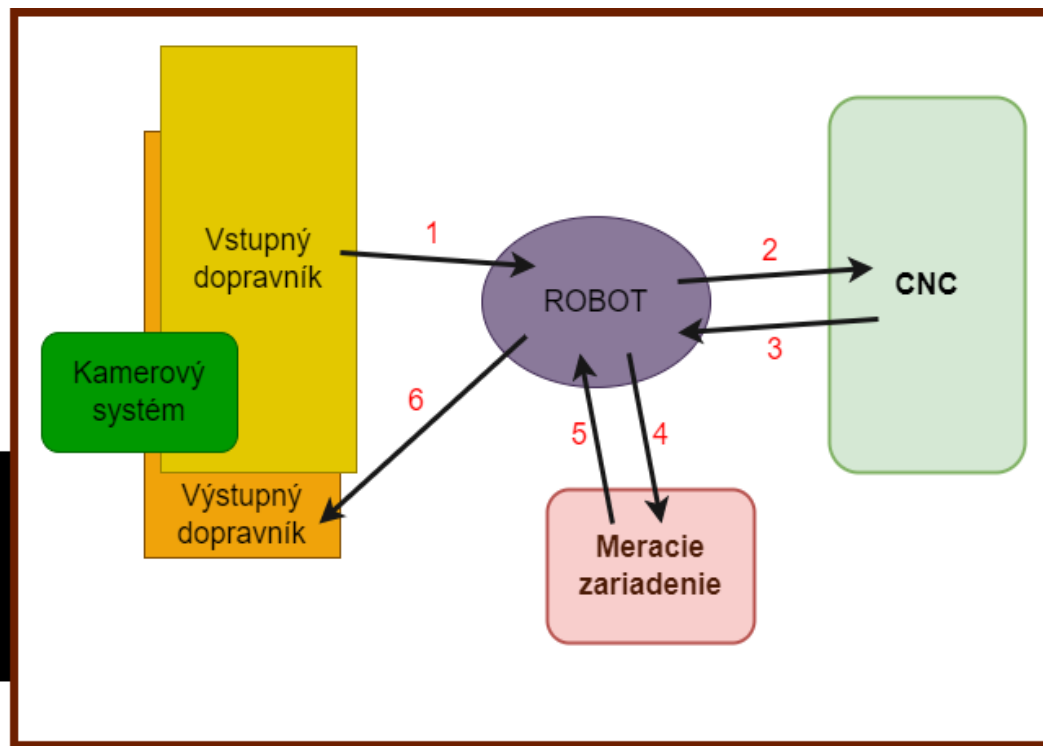
Pre prehľadnosť bolo vytvorených niekoľko systémových a programových modulov. Programový modul s názvom Targets obsahuje všetky potrebné body. V týchto bodoch robot vykonáva definovanú činnosť alebo sú to body cez ktoré robot prechádza. V module s názvom MainModul bola vytvorená procedúra main, ktorá sa spustí automaticky so spustením simulácie. Táto procedúra obsahuje odkaz na ROBOTemplate vo forme volanie procedúry *ROBOTemplateMain*. Modul Movements obsahuje niekoľko procedúr, ktoré robot využíva pri výrobe produktov v bunke. Posledným programovým modulom je Debug, ktorý obsahuje pomocnú procedúru pri vzniku chyby počas aktivity robota.

Systémové moduly BASE a user, boli vytvorené automaticky a obsahujú základné údaje o predvolenom nástroji, náklade a nulovom bode robota. RT\_templates bol taktiež automaticky vygenerovaný pri inštalácii ROBOTemplatu v záložke Add-Ins. Systémové moduly smData, smGripper a smWorldZones boli vytvorené manuálne. Modul smData obsahuje údaje o *work objects*. Work objekty sú lokálne nulové body, ktoré uľahčujú a spresňujú programovanie robota pri veľkom množstve procedúr. Modul smGripper obsahuje procedúru, ktorá zabezpečuje otváranie a zatváranie gripperu. Posledným systémovým modulom je smWorldZones, ktorý má v sebe charakterizované *world zones*. Účelom world zón je zastaviť, spomaliť alebo nastaviť logickú 1 na výstupný signál, ak sa robot nachádza v definovanej zóne. Definovaných bolo 5 world zón a využité boli na kontrolu, či sa robot nachádza v domovskej pozícii.

### 6.6.2 Procedúry

Hlavné procedúry, ktoré definujú pohyby robota, sa nachádzajú v programovom module Movements.

Pohyby robota boli rozdelené na 6 procedúr, kedy každá sa týkala jedného stanovišťa a rozlišovala vkladanie a odoberanie polotovarov z daného stanovišťa. Týchto 6 procedúr je naznačených na obrázku č. 30, a ich postupnosť odpovedá výrobe jedného produktu. V prvej procedúre robot odoberal polotovary z dopravníku a druhá procedúra sa týkala vkladania polotovarov do CNC. Nasledovalo odobranie produktu z CNC a vloženie produktu do meracieho zariadenia pomocou procedúr č. 3 a 4. Predposledná procedúra slúžila na odobranie produktu z meracieho zariadenia a vloženie produktu na výstupný dopravník bola posledná procedúra.



Obr. 30: Schéma 6 procedúr, ktoré robot vykonáva

K vytvoreniu pohybových procedúr boli využité príkazy MoveL, MoveJ, MoveAbsJ, Offs a RelTool. MoveL bol využitý pri priamych pohyboch robota, kedy sa nástroj robota pohyboval po priamej čiare. Príkaz MoveJ bol použitý k rýchlemu premiestneniu robota z jedného bodu do druhého, pričom nástroj robota nebol presunutý po priamej čiare. Príkaz Offs bol využitý k premiestneniu robota vzhľadom k existujúcemu bodu. Tento príkaz bol skombinovaný s príkazom RelTool, ktorý umožňuje premiestniť pozíciu nástroja relatívne k existujúcemu bodu.

K ovládaniu gripperu bola využitá taktiež procedúra. V procedúre bol vytvorený stavový automat, ktorý reaguje na príkazy close a open. Tieto príkazy bolo možné volať z ktorejkoľvek procedúry a po prijatí jedného alebo druhého príkazu prešiel stavový automat do odpovedajúceho stavu. V danom stave vyslal impulz na digitálny výstup, ktorý bol napojený na SMC ovládajúci gripper.

## 6.7 Zhrnutie postupu v RobotStudios

V kapitole č. 6 bol opísaný postup tvorby DD pomocou simulačného softvéru ABB RobotStudio. Pre zhrnutie postupu sú vymenované jednotlivé kroky.

1. Importovanie 3D modelov vo formáte .sat alebo .step.
2. Rozmiestnenie modelov.
3. Vytvorenie mechanizmov.
4. Pridanie robota z knižnice a upnutie gripperu na robota.
5. Vytvorenie logiky bunky pomocou smart komponentov.
6. Programovanie robotického ramena (definícia nástroja, bodov, pohybových procedúr).

Po splnení všetkých krokov, bolo DD pripravené prijímať signály z PLC a po zapnutí simulácie vykonávať výrobné procesy bunky. Ďalším krokom bolo vytvorenie taskov a vizualizačného rozhrania na strane PLC. Postup je popísaný v nasledujúcej kapitole.



## 7 B&R AUTOMATION STUDIO

B&R Industrial Automation je výrobcem automatizačnej techniky a po spojení so spoločnosťou ABB v roku 2017, sa stalo globálnym centrom ABB pre automatizáciu strojov a tovární. Spoločnosť sídli v Eggelsbergu v Hornom Rakúsku.

Softvér AS (B&R Automation Studio), dnes už štvrtej generácie, je rovnako ako ABB RobotStudio licencovaný. Na rozdiel od RS poskytuje až 90 dňovú skúšobnú licenciu, kedy sú dostupné všetky funkcionality softvéru. Pri používaní softvéru Automation Studio, je nutné v prvom kroku zvoliť verziu softvéru, v ktorej bude projekt vyhotovený. Momentálne sú k dispozícii verzie od 2.4.0 až po 4.12. Pre tvorbu DD bola zvolená najnovšia verzia, teda 4.12. Nutné je dodať, že pri vyhotovení projektu v AS 4.12., sa neodporúča projekt prevádzať do staršej ani novej verzie. Knižnice, ktoré boli použité v danej verzii, môžu byť upravené a dôjde tak k poškodeniu funkčnosti projektu.

V ďalšej časti kapitoly je popísaný postup tvorby projektu na ovládanie DD. Postup sa delí na niekoľko krokov, ktoré sú rozdelené do podkapitol. V závere kapitoly sú jednotlivé kroky zhrnuté.

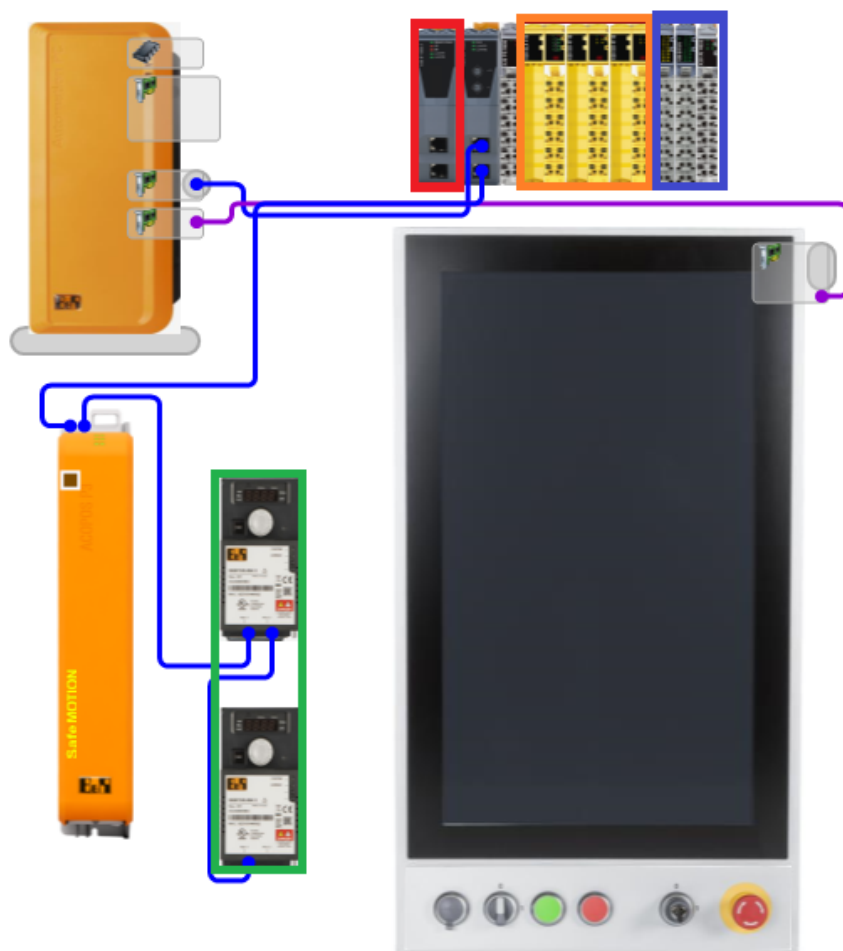
### 7.1 Príprava prostredia

Najpoužívanejšími nástrojmi v AS sú *Logical*, *Configuration* a *Physical View*. V časti *Logical View* dochádza k programovaniu všetkých taskov a užívateľského vizualizačného rozhrania. V *Configuration View* sa nastavuje konfigurácia celého projektu. *Physical View* zobrazuje HW pridaný do projektu. K ovládaniu DD bola využívaná možnosť simulácie PLC pomocou ARSim. ARSim je nástroj využívaný v prípade, že užívateľ nemá prístup k reálnemu PLC a potrebuje otestovať funkčnosť projektu. V kontexte tejto práce nebolo uvažované zapojenie reálneho PLC a preto je využitie ARSim jediná možnosť ako riadiť DD výrobnjej bunky.

Pri tvorbe projektu bolo nutné definovať názov projektu, názov konfigurácie, druh CPU a HW modul. Aj keď v kontexte diplomovej práce nebolo uvažované o spojení reálneho PLC a DD, HW projektu bol vybraný tak, aby bolo možné toto prepojenie v budúcnosti uskutočniť. Včasný výber správnych HW prvkov, môže neskôr ušetriť čas a zamedziť vzniku komplikácií pri ich výmene.

Na obrázku č. 31, je náhľad HW konfigurácie projektu k ovládaniu DD. V ľavej hornej časti sa nachádza priemyselné PC, ktoré je obdobou PLC, ale poskytuje väčší výkon. V pravom hornom rohu je skupina kariet. Červenou vyznačená je karta zabezpečujúca komunikáciu s gripprom cez ProfiNet, oranžovou sú naznačené safety karty a modrou sú označené karty k digitálnym a analógovým

vstupom a výstupom. Taktiež sa tu nachádza 24V napájací zdroj a BUS controller, ktorý je prepojený s PC a servo driveom. V ľavom dolnom rohu je už spomenutý ACOPOS servo drive, na ktorý sú napojené dva ACOPOS frekvenčné meniče, ktoré by v prípade reálnej bunky ovládali motory vstupného a výstupného dopravníku. Posledným HW komponentom je panel slúžiaci na ovládanie DD pomocou grafického rozhrania.



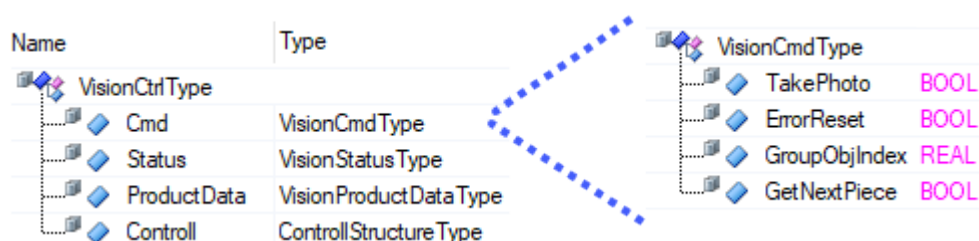
Obr. 31: Náhľad HW konfigurácie v AS

K ovládaniu DD je dostačujúci samotný priemyselný PC. Ďalšie HW komponenty boli pridané len ako možnosť ďalšieho rozšírenia a prepojenia s reálnou výrobnou bunkou. HW konfigurácia bola opäť inšpirovaná DD vo firme Intemac Solutions s.r.o.



## 7.2 Dátové štruktúry a premenné

Po príprave prostredia v AS, bolo potrebné navrhnuť dátové štruktúry, ktoré boli neskôr využité k programovaniu jednotlivých stanovišť. V dátových štruktúrach figurujú premenné, ktoré môžu mať rôzny dátový typ. Dátové štruktúry, ale aj samotné premenné, môžu v AS figurovať lokálne (dostupné len pre tasky v ktorých sú definované) alebo globálne (dostupné pre všetky tasky, definujú sa mimo tasky). Dátové štruktúry sa definujú v záložke *Logical View*. Po pridaní novej štruktúry je nutné vytvoriť členské premenné, ktoré bude táto štruktúra obsahovať. Tieto premenné, môžu byť dátového typu ako INT, BOOL alebo REAL, ale taktiež môžu mať dátový typ štruktúry. Týmto spôsobom sú tvorené niekoľko vrstvové štruktúry, ktoré prispievajú k prehľadnosti projektu a k zjednodušeniu programovania. Hierarchia dátových štruktúr je znázornená na nasledujúcom obrázku.



Obr. 32: Dátová štruktúra kamerového systému

Tak ako tomu bolo v RS, tak aj v AS je každé stanovište zastúpené samostatne. K tomu bola prispôbená aj hierarchia dátových štruktúr. Každé stanovište má svoju dátovú štruktúru, ktorá obsahuje niekoľko podštruktúr. Konkrétny príklad je znázornený na obrázku č. 32. Ukážka sa týka štruktúry pre kamerový systém. Hlavná štruktúra s názvom *VisionCtrlType* je zostavená z premenných ako *Cmd* pre príkazy, *Status* pre stavy, *ProductData* pre hodnoty o produktoch a *Controll* pre ovládanie chodu celej bunky. Tieto premenné obsahujú ďalšie podštruktúry v ktorých sa už nachádzajú konkrétne premenné. V projekte sa vyskytujú hlavne dvojúrovňové štruktúry.

K práci so štruktúrami jednotlivých stanovišť boli vytvorené globálne premenné. Globálne premenné mali dátový typ štruktúry konkrétneho stanovišta. Týmto bolo zabezpečené, že z ktoréhokolvek tasku bolo možné používať štruktúry jednotlivých stanovišť. Zoznam globálnych premenných slúžiacich k ovládaniu jednotlivých stanovišť je znázornený na nasledujúcom obrázku.

Name	Type
gCellCtrl	CellCtrlType
gRBTemplateCtrl	RobotCtrlInterfaceType
gRBTemplateArmCtrl	RBTemplateArmCtrlType
gRobotCtrl	RobotCtrlType
gGripperCtrl	GripperCtrlType
gMMachineCtrl	MMachineCtrlType
gCncCtrl	CncCtrlType
gInputConveyorCtrl	InputConveyorCtrlType
gOutputConveyorCtrl	OutputConveyorCtrlType
gViseCtrl	ViseCtrlType
gVisionCtrl	VisionCtrlType
gIOHandling	IOHandlingType
gCellSettings	CellSettingsType
gVisuInterface	VisuInterfaceType
gVisuCtrl	VisuCtrlType

Obr. 33: Prehľad globálnych premenných a ich dátových typov

## 7.3 Ovládanie digitálneho dvojčaťa

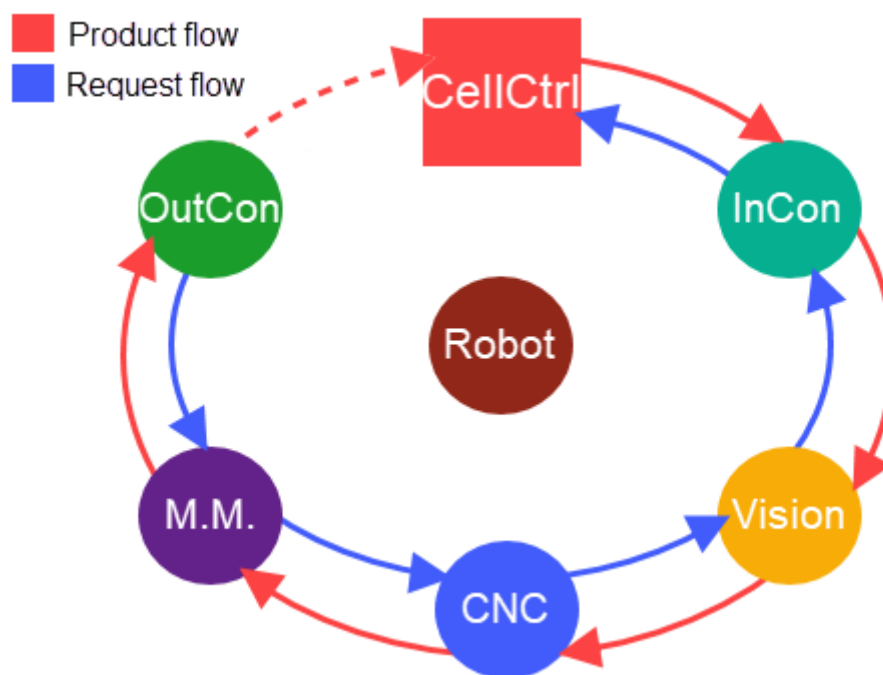
K ovládaniu DD bolo vytvorených niekoľko taskov, rozdelených podľa stanovišť, ktoré ovládajú. Pre vyššiu prehľadnosť boli pridané prázdne zložky pre jednotlivé tasky a následne z toolboxu boli pridané tasky typu ANSI C All in One. V tasku sa nachádza súbor Main, ktorý obsahuje hlavný program a súbory Types a Variables k definovaniu lokálnych dátových štruktúr a premenných.

### 7.3.1 Výrobný proces

Postup výroby v bunke bol pevne daný a bolo nutné zaručiť, aby každý polotovár prešiel všetkými stanovišťami. Najdôležitejšie bolo aby žiadne stanovište neostalo neaktívne počas výroby jedného produktu, ak na výrobu čakali ešte ďalšie polotovary. Z tohto dôvodu boli jednotlivé stanovišťa programované tak, aby boli závislé len na sebe a na predchádzajúcom stanovišti. To znamená, že jedno stanovište vidí len na svoj stav a na stav predchádzajúceho stanovišta.

K dosiahnutiu tejto funkcionality bunky, bola vytvorená štruktúra s názvom ControllStructureType. Štruktúra obsahovala premenné Working, Availible a Finished, ktoré informovali o stave stanovišta. Ďalej obsahovala premenné InMove, OutMove a ClearMove. Premenná InMove zastupovala procedúru, pomocou ktorej robot vložil produkt do daného stanovišta. Pomocou procedúry OutMove robot odstránil produkt z daného stanovišta. Premenná ClearMove sa týkala len vstupného dopravníku a obsahovala procedúru na odstránenie polotovaru z výroby. Poslednou premennou v tejto štruktúre bola premenná s názvom prev. Tá obsahuje pointer

na štruktúru predchádzajúceho stanovišta. Práve podľa tejto premennej bola zaručená informovanosť o stave predchádzajúceho stanovišta.



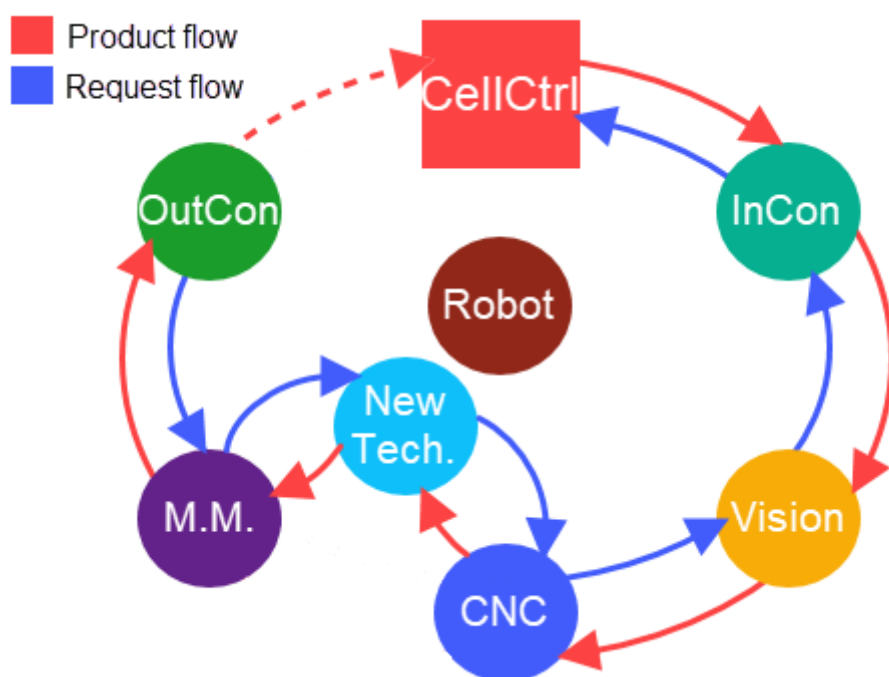
Obr. 34: Naznačenie toku produktov a požiadaviek

Na obrázku č. 34 sú naznačené dva toky, ktoré sú aktívne počas výroby v bunke. Prvým je tok produktov, ktorý je po celú dobu výroby v jednom smere a je nemenný. Druhým a tým hlavným informačným tokom je tok požiadaviek. Ten má opačný smer a začína u výstupného dopravníka. Ak nie je výstupný dopravník plný alebo sa nehýbe, je v stave, kedy je pripravený prijať ďalší produkt. Ak je predchádzajúce stanovište (meracie zariadenie) v stave Available, výstupný dopravník odoberie produkt. Akonáhle je produkt odobraný, meracie zariadenie kontroluje stav CNC a ak je v stave Available, rovnako odoberie produkt. Vďaka tomuto spôsobu môže pracovať každé stanovište nezávisle na nasledujúcom. Do výroby to prináša flexibilitu, odstraňuje prestoje a tým pádom šetrí čas pri výrobe. Tým posledným prvkom v požiadavkovom toku je task s názvom CellCtrl. Tento task komunikuje s vizualizáciou a obsahuje informáciu, koľko produktov má byť vyrobených. Ak už nemá byť v bunke vyrobený žiadny ďalší produkt, CellCtrl už nie je v stave Available a kamerový systém tak nezačne pracovať. To zaručí, že výroba ďalej nepokračuje.

Tok produktov medzi výstupným dopravníkom a CellCtrl je znázornený prerušovane. Je to z toho dôvodu, že medzi týmito dvoma taskmi je predávaná len informácia o dokončených produktoch. CellCtrl po obdržaní informácie o vložení produktu na výstupný dopravník odpočíta produkt z požadovaného počtu produktov na výrobu.

### 7.3.2 Pridanie stanovišta

Prístup, ktorý bol zvolený vyššie umožňuje jednoduché pridanie nového stanovišta do kolobehu výroby. Ak by bolo stanovište pridané napríklad medzi CNC a meracie zariadenia, zmena by nastala len v odkazovaní na predchádzajúce stanovište pomocou dátovej štruktúry `ControllStructureType`. Meracie zariadenie by videlo na stav nového stanovišta a nové stanovište by pracovalo na základe stavov v CNC. V tasku by tak bolo nutné pridať len prvý a druhý stav v stavovom automate, ktorý by kontroloval stav predchádzajúceho stanovišta a nastavoval stav nového stanovišta. Možné je tak pridať už naprogramovanú a fungujúcu technológiu s minimálnymi úpravami. To opäť potvrdzuje flexibilitu výrobnjej bunky.

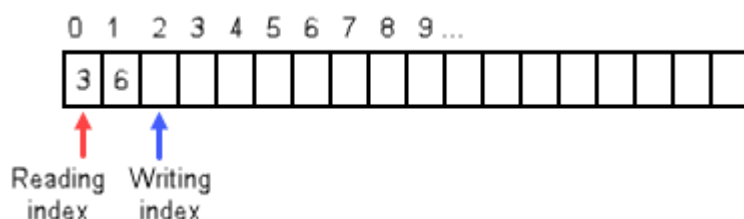


Obr. 35: Úprava kolobehu pri pridaní nového stanovišta

### 7.3.3 Ovládanie robota

Robot sa nachádza v centre výrobnjej bunky a zasahuje do celého výrobného procesu. Rovnako ako bolo dosiahnutej flexibility a samostatnosti jednotlivých stanovišť, bolo nutné zabezpečiť tieto vlastnosti aj pre robota. Ovládanie robota prebieha v samostatnom tasku s názvom `RoboCtrl`, ktorý prijíma príkazy z iných taskov. Ako už bolo spomenuté, jednotlivé stanovišta používajú príkazy `InMove`, `OutMove` a `ClearMove`. Tieto príkazy obsahujú čísla jednotlivých procedúr, ktoré sú priradené ku konkrétnej procedúre v tasku `RoboCtrl`. Jednotlivé stanovišta však zapisujú procedúry nezávisle na iných stanovištiach. Preto bolo nutné vytvoriť buffer, do ktorého mali prístup tasky ovládajúce stanovišta.

Buffer bol vytvorený ako veľmi dlhé prázdne pole. V kontexte práce sa neuvažovalo o pretečení buffru, a preto nebol vytvorený kruhový buffer. Pri realizácii reálnej bunky, je nutné vytvoriť kruhový buffer a zabrániť tak jeho pretečeniu. Do buffru mohli tasky zapisovať čísla procedúr, nezávisle na aktivite robota. K práci s buffrom boli využité dva indexy. Prvým je Writing index, ktorý bol využívaný na zapisovanie do buffru a jeho hodnota bola uložená v globálnej premennej. Writing index bol dostupný z ktoréhokoľvek tasku a vždy po zapísaní procedúry bol inkrementovaný. Tak bolo zabezpečené, že žiadny task nenapíše procedúru na rovnaké miesto v buffri. Druhým indexom bol Reading index. Ako z názvu plynie, bol používaný pre čítanie hodnôt z buffru. Reading index bol používaný len v tasku RoboCtrl a ukazoval vždy na nižší alebo rovnaký člen v buffri ako Writing index. Fakt, že Reading index nebol nikdy väčší ako Writing index, zaručuje vykonanie každej procedúry zapísanej do buffru. Na obrázku č. 36, je znázornený buffer, v ktorom sú zapísané dve procedúry. Writing index ukazuje na ďalší prázdny člen, zatiaľ čo Reading index ukazuje na prvý člen.



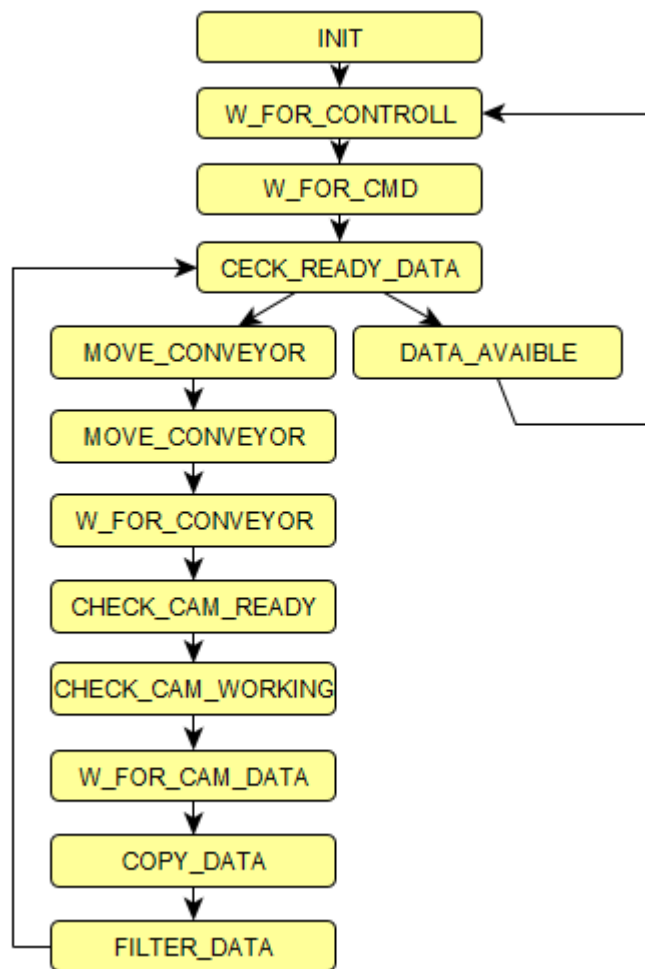
Obr. 36: Príklad zapisovania a čítania procedúr

### 7.3.4 Využitie stavového automatu v taskoch

To, že každé stanovisko je ovládané samostatne pomocou jedného tasku už popísané bolo. Nebolo však vysvetlené ako fungujú jednotlivé tasky v AS. Každý task sa skladá z troch častí, ktorými sú Init, Cyclic a Exit. Časť Init je spustená pri prvom zapnutí tasku, v tomto prípade pri zapnutí PLC. Väčšinou sa v tejto časti nachádzajú deklarácie, ktoré platia počas chodu PLC. Druhá a tá najdôležitejšia časť tasku je Cyclic. Táto časť ovláda jednotlivé úkony stanovišťa pomocou stavového automatu. Časť Exit je spustená ak je tasku ukončený.

Ako príklad aplikovania stavového automatu konkrétneho stanovišťa, bol vybraný kamerový systém. Jednotlivé stavy v tasku ovládajúcom kamerový systém sú zobrazené na obrázku č. 37. Na začiatku kamerový systém kontroluje či má nejaké dostupné dáta, a ak nie, je spustený vstupný dopravník a snímanie kamerovým systémom. Po nasnímaní polotovarov sa najdôležitejšia časť odohráva v stavoch VISION\_COPY\_DATA a VISION\_FILTER\_DATA. V týchto stavoch PLC komunikuje s DD, kedy si predávajú informácie o počte a pozíciach polotovarov

na dopravníku. V stave `VISION_FILTER_DATA`, sú vyfiltrované polotovary na základe dosahov robota. Po filtrovaní sa opäť skontroluje dostupnosť dát, a ak sú dáta dostupné (snímanie a filtrovanie prebehlo úspešne), prejde stavový automat do stavu `VISION_DATA_AVAILABLE`. CNC reaguje na tento stav a pokračuje vo výrobe.



Obr. 37: Príklad zapisovania a čítania procedúr

Jednotlivé stavy v stavovom automate majú číselné hodnoty. Vo väčšine prípadov sa tak jednotlivé stavy značia číslami. AS umožňuje vytvoriť štruktúry stavov, ktoré sú popísané slovne ale stále majú číselné hodnoty. Vytvorí sa vložením *Enumeration Type*, a každá vložená premenná do *Enumeration Type* je rovná jednému stavu. Číslovanie je automaticky od prvého pridaného člena. Zvykom je používať veľké písmená v názvoch jednotlivých stavov.

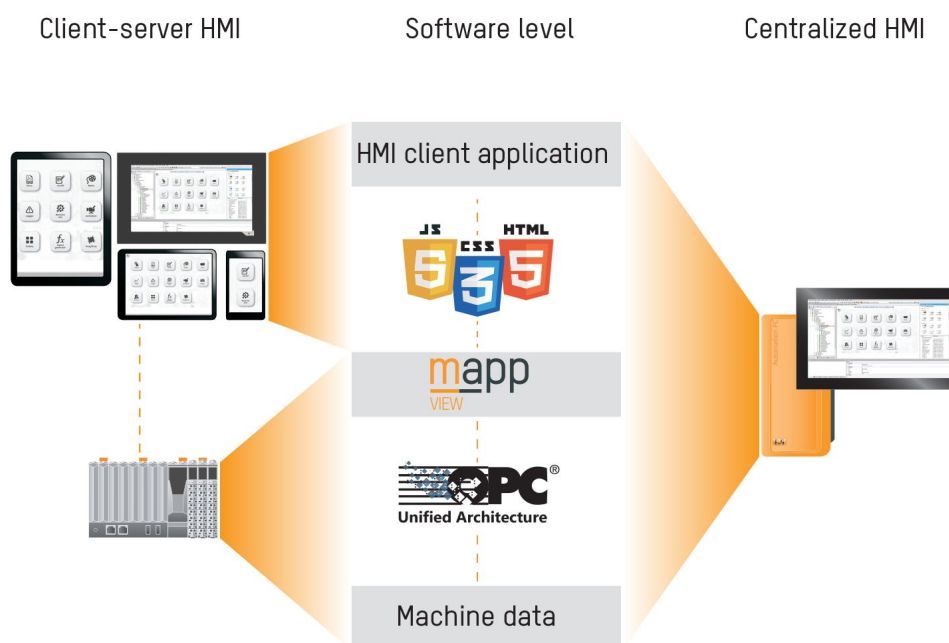
## 7.4 Uživatelské vizualizačné rozhranie

Výrobná bunka je ovládaná pomocou taskov, ktoré medzi sebou komunikujú. Tasky sa však nachádzajú v CPU PLC a tým pádom k nim obsluha výrobnéj bunky nemá prístup. K tomu aby obsluha mohla ovládať výrobnú bunku bolo vytvorené užívateľské vizualizačné rozhranie. Vizualizačné rozhranie má prístup k premenným, ktoré sú povolené na komunikáciu cez OPC UA. Týmto spôsobom je možné ovládať výrobu v bunke. K vytvoreniu vizualizácie bola použitá technológia mappView.

V ďalšej časti bude popísaná samotná technológia mappView, príprava prostredia v AS, štruktúra vizualizačného rozhrania a bližšie popísaná časť vizualizácie, ktorá informuje o aktivite stanovišť.

### 7.4.1 mappView

*MappView* je technológia spadajúca do rodiny mappTechnology. Pomocou tejto technológie je možné vytvoriť výkonné webové aplikácie HMI (*Human Machine Interface*), ktoré sú využívané operátormi pri práci so strojmi. Technológia poskytuje širokú škálu predpripravených nástrojov, ktoré uľahčujú a zrýchľujú samotný vývoj aplikácií. Keďže sa jedná o webovú aplikáciu, *mappView* využíva kombináciu skriptovacieho jazyka JS (*JavaScript*), CSS (*Cascading Style Sheets*) a HTML (*hypertext markup language*). [39]

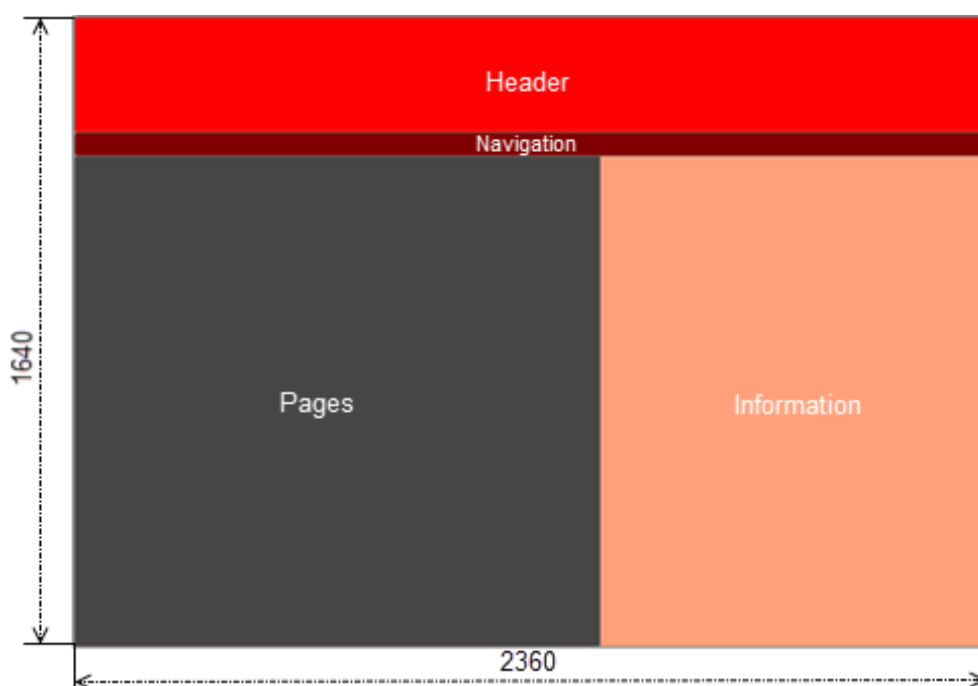


Obr. 38: Prepojenie viacerých HMI pomocou mappView [39]

### 7.4.2 Příprava na tvorbu vizualizácie

K vytvoreniu HMI pomocou *mappView*, je potrebné vykonať niekoľko prípravných krokov. Práca s technológiou pribieha v *Configuration View*, kde sa nastavujú prepojenia jednotlivých tlačidiel, premenných a taktiež konfigurácia celej vizualizácie. V časti *Logical View*, sa pracuje s grafickou časťou vizualizácie, tzn. pridávajú sa tu tlačidlá, widgety, nastavujú farby, mapujú premenné z OPC UA, atď.

Prvým krokom bola inštalácia balíčku *mappView Technology*. Po inštalácii bol vytvorený návrh jednotlivých stránok, ktorý je zobrazený na obrázku č. 39. Tento návrh zodpovedal rozloženiu každej stránky, ktorá bola pridaná do vizualizácie.



Obr. 39: Rozloženie stránok vo vizualizácií

V rozložení stránky figurujú časti Header, Navigation a Information, ktoré sú pre každú stránku rovnaké. Časť Pages odpovedá jednotlivým stránkam, prostredníctvom ktorých je možné ovládať jednotlivé stanovištia.



### 7.4.3 Návrh vizualizácie

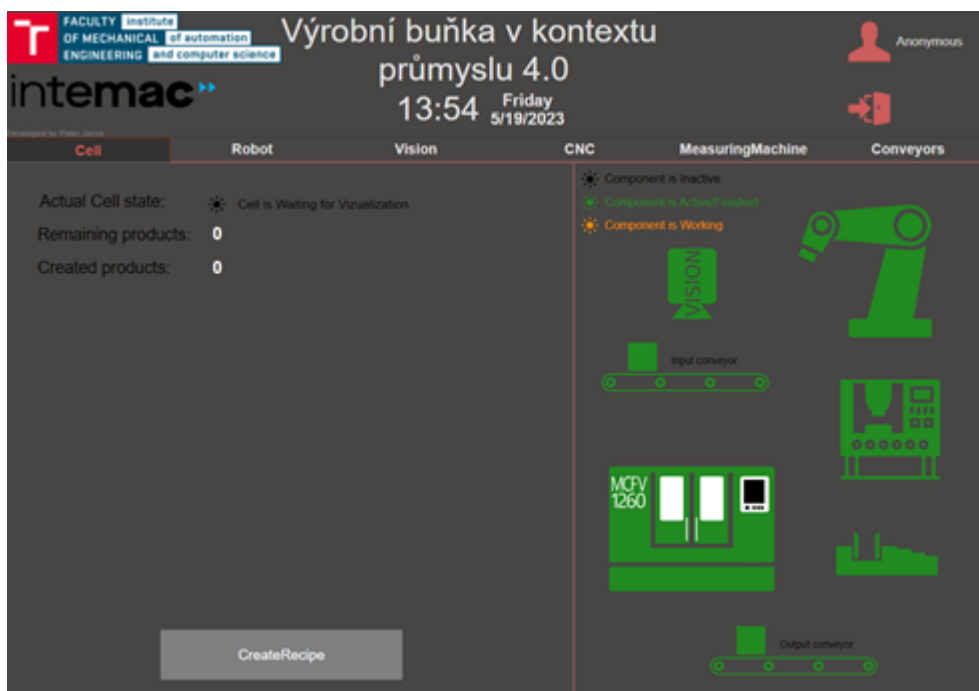
Na stránke sú vždy zobrazené hlavné informácie o chode daného stanovišta. V tabuľke č. 1, je vypísaný prehľad stránok, ktoré figurujú vo vizualizácii.

Tab. 1: Stručný popis stránok obsiahnutých vo vizualizácii

Názov stránky	Popis stránky
Cell	hlavná stránka vizualizácie, umožňuje vytvoriť objednávku k výrobe, zobrazuje stav bunky ako celku
Robot	stránka informujúca o stave robota a grippru, možnosť nastavovať override robota
Vision	Vision stránka obsahuje informácie o aktuálnom stave kamerového systému zobrazuje taktiež pozície polotovarov
CNC	na tejto stránke je operátor informovaný o aktuálnom stave CNC a zveráku
Measuring Machine	zobrazuje základné údaje o stave meracieho zariadenia a stola na uchopovanie produktov
Conveyors	táto stránka poskytuje informácie o rýchlosti dopravníkov a stave senzorov

K prepínaniu medzi stránkami slúžia tlačidlá v časti Navigation. Tlačidlá majú obdobné mená ako jednotlivé stránky. V časti Header je obsiahnuté logo univerzity, spoločnosti Intemac Solutions s.r.o. a prihlasovacie okno, ktoré sa zobrazí po stlačení prihlasovacieho obrázku. Prihlasovanie sa využíva hlavne k prideleniu právomocí pri práci s vizualizáciou. Operátor väčšinou nemá prístup ku všetkým funkciám, ktoré vizualizácia obsahuje. Kvôli prezentačným účelom však v rámci tejto práce boli zobrazené všetky funkcie vizualizácie bez potreby prihlasovania. V časti Information, sú zobrazené jednotlivé stanovišťa pomocou vektorových obrázkov. Táto časť slúži k zobrazeniu, ktoré stanovište aktuálne pracuje alebo je pripravené k práci.

Vizualizáciu je možné zobraziť na zariadeniach s operačným systémom, ktorý umožňuje používanie webových prehliadačov. Spoločnosť B&R disponuje širokou škálou ovládacích panelov, ktoré sú dotykové a obsahujú niekoľko HW tlačidiel. Na obrázku č. 40, je znázornená dokončená vizualizácia, zobrazená v prehliadači Google Chrome.



Obr. 40: Hlavná stránka vizualizácie

## 7.5 Zhrnutie postupu v B&R Automation Studiu

V tejto kapitole bol opísaný postup pri tvorbe programu na ovládanie DD v softvéri B&R Automation Studio. Postup sa môže líšiť v závislosti od simulačného softvéru, s ktorým je riadiaci systém využívaný. Nasleduje zhrnutie postupu do jednotlivých krokov.

1. Vytvorenie projektu s požadovaným PLC.
2. Doplnenie HW konfigurácie a knižníc.
3. Vytvorenie dátových štruktúr a premenných.
4. Pridanie a naprogramovanie taskov ovládajúcich jednotlivé stanovišťa.
5. Povolenie premenných na OPC UA, za účelom komunikácie so simulačným prostredím a HMI.
6. Vytvorenie užívateľského vizualizačného rozhrania.

Po vytvorení programu k ovládaniu DD, nasleduje testovanie programu. Výsledky testov, zhodnotenie výhod a nevýhod je popísané v nasledujúcej kapitole.

## 8 ZHODNOTENIE A DISKUSIA

Po vytvorení simulačného modelu a programu na ovládanie robota, bolo DD podrobené testovaniu. Testovaná bola hlavne rôznorodá výroba, kedy sa nevyrábali len produkty jedného typu. DD preukázalo funkčnosť a potvrdilo prínos veľkého množstva informácií o výrobe, možnosti úpravy a optimalizácie výroby bez zásahu do reálnej bunky. V tejto kapitole sú zvýraznené výhody a nevýhody používania softvérov ABB RobotStudio a B&R Automation Studio k tvorbe DD.

### 8.1 Simulačný softvér ABB RobotStudio

#### 8.1.1 Výhody

##### Jednoduché programovanie

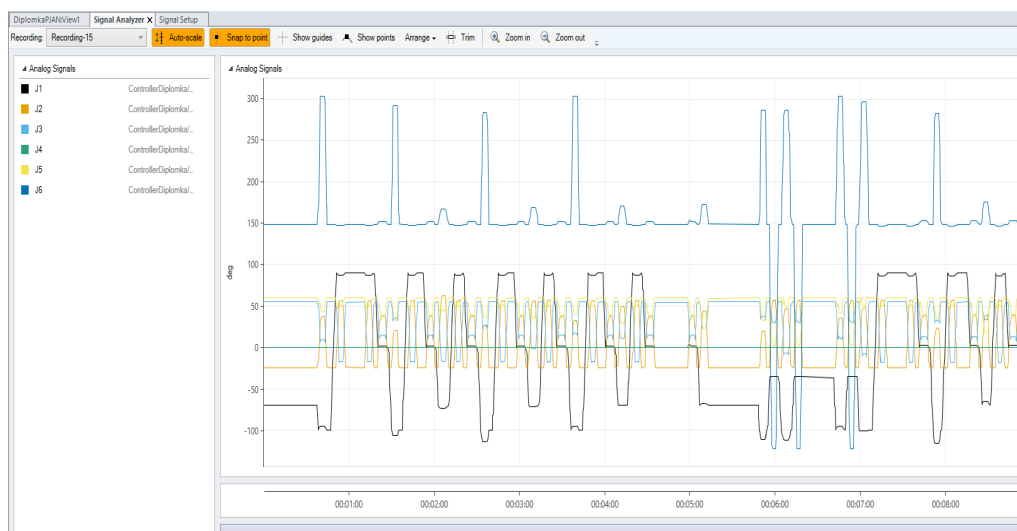
Najväčšou výhodou, ktorú prináša softvér RS je jednoduché programovanie robotov ABB. Je to výborný nástroj na kontrolu a optimalizáciu programov robota. Nie je zvykom, že softvér určený na offline programovanie, poskytuje takú širokú škálu nástrojov na simuláciu ako ABB RobotStudio. Pridanie 3D modelov do prostredia stanice umožňuje programátorovi skontrolovať programy v takmer identickom prostredí do akého bude robot nasadený. Možnosť využiť SMC k vytvoreniu logiky bunky je taktiež veľkou výhodou a približuje procesy v simulácii realite. V neposlednom rade, možnosť tvorby vlastných SMC umožňuje vytvoriť zložité SMC, ktoré dokážu simulovať zložitejšie technológie ako je napríklad kamerový systém.

##### Jednoduchá tvorba mechanizmov

Ďalším veľkým plusom je spôsob akým sú tvorené kinematické väzby 3D modelov. Nástroj na tvorbu mechanizmov prináša až 4 rôzne druhy mechanizmov. Postup vytvorenia mechanizmu je prehľadný, jednoduchý a intuitívny. Prácu s mechanizmom uľahčujú SMC, pomocou ktorých je možné mechanizmy ovládať počas simulácie. Dôležité je len vytvoriť požadované pozície mimo simuláciu.

##### Signal Analyzer

Pomocou tohto nástroja je možné sledovať signály z kontroléru robota a zo *Station Logic*. Signály sú počas simulácie nahrávané. Záznam signálov umožňuje jednoducho dohľadať chyby vzniknuté pri simulácii a urýchliť tak optimalizáciu výroby. Na ďalšom obrázku sú znázornené signály z jednotlivých kĺbov robota. Signály boli zachytené počas 8 minútovej činnosti robota vo výrobnjej bunke.



Obr. 41: Signály z jednotlivých kláv robota v nástroji *Signal Analyzer*

### 8.1.2 Nevýhody

#### Importovanie 3D modelov

Jednou z hlavných nevýhod, ktoré ovplyvnili čas potrebný na tvorbu DD, bola absencia step konvertoru v základnej licencií. Step konvertor je využívaný pri importe modelov z CAD softvérov a umožňuje import .step súborov. Pri importe 3D modelov v tomto formáte ostane zachovaná väčšina štruktúry, ktorá bola vytvorená v CAD softvéri. Štruktúrou sa v tomto prípade myslí strom zostavy s jednotlivými podzostavami a komponentmi. Pri absencii step konvertoru, boli modely importované vo formáte .sat. Modely po importe stratili pôvodnú štruktúru a model bol pridaný do RS len ako *part* pozostávajúci z veľkého množstva *body*. Nasledovalo tak rozčlenenie na skupiny. Rozčlenenie bolo dôležité hlavne v prípade, že model mal obsahovať kinematické väzby. V tvorbe mechanizmu bolo totižto nutné definovať pohyblivé a nepohyblivé časti modelu.

#### Práca s pohyblivými objektmi počas simulácie

Vo všeobecnosti vlastnosti objektov v RS môžu byť z hľadiska kinematiky nastavené ako neaktívne, fixné, kinematické a dynamické. Práve možnosť nastavenia vlastností modelu ako kinematické bola využitá pri pohybe polotovarov na dopravníku. Problémom bolo, že po zastavení dopravníku a odobratií polotovaru pomocou grippru, musel byť polotovar pri vložení do zveráku neaktívny. Ak by ostal kinematický, museli by byť všetky objekty v bunke upravované a ich vlastnosti by museli korešpondovať s reálnym svetom. Implementácia týchto nastavení by bola časovo náročná a negarantovala by úspešný výsledok. Preto sú vzťahy medzi materiálmi v simulácií ignorované. Z tohto dôvodu bolo dosiahnuté, že kinematické vlastností polotovarov a produktov sa počas simulácie menili.

## SMC OPC UA klient

Vďaka tomuto SMC je možné využívať komunikáciu medzi RS a AS pomocou komunikačného protokolu OPC UA. SMC však prináša aj obmedzenie spojené s prenosom premenných dátového typu string. Premenné tohto typu by mali obsahovať názov programu, ktorý má CNC vykonať. V tomto prípade bola vykonaná zmena, kedy boli názvy programov nahradené číselným označením. Číselné označenie bolo odosielané do RS ako premenná typu int.

## 8.2 Riadiaci softvér B&R Automation Studio

### 8.2.1 Výhody

#### ROBOTemplate

Možnosť využitia knižnice ROBOTemplate prináša zrýchlenie ovládania robota z prostredia PLC. Táto knižnica umožňuje ovládať až štyri robotické ramená v jeden moment. Možnosti, ktoré knižnica prináša, zjednodušujú programovanie robota. V práci bola využitá funkcionálna navigovať robota do bodu, ktorý bol relatívne (voči nástroju) vzdialený od fixne naučeného bodu. To prinieslo vysokú flexibilitu a odstránilo potrebu, aby všetky body v ktorých robot pracuje, boli naučené pred spustením simulácie. Robot tak môže využiť informáciu o veľkosti polotovaru a vložiť polotovar správne do zveráku, pričom robot pozná len stredovú pozíciu zveráku.

#### Vizualizácia

Ďalšou výhodou softvéru AS, je tvorba užívateľského vizualizačného rozhrania. Pomocou technológie *mappView* je možné jednoducho a intuitívne tvoriť flexibilné HMI. Predpripravené nástroje, ktoré táto technológia ponúka, opäť šetria čas a uľahčujú tvorbu HMI. Keďže sa vizualizácia zobrazuje vo webovom prehliadači, nie je nutné používať ďalší softvér k zobrazeniu. Vizualizácia je dostupná z každého zariadenia, v ktorom je možné využívať webový prehliadač.

#### mappTechnology

Okrem *mappView* poskytuje rodina softvérov *mappTechnology* aj ďalšie technológie. Jednou z nich je napríklad *mappMotion*. Táto technológia zjednodušuje prácu s pohybom externých osí (*mappAxis*), s pohybom osí v CNC (*mappCNC*), s ovládaním robotických ramien (*mappRobotics*) a s vývojom aplikácií pre systém *ACOPOStrack* pomocou (*mappTrack*). V prípade, že by DD bolo v budúcnosti aplikované na reálnu bunku, práve pomocou *mappAxis* by bol ovládaný napríklad zverák v CNC. Technológiu *mappRobotics* v práci nahrádza platforma ROBOTemplate.

## 8.2.2 Nevýhody

### Simulácia vstupov a výstupov

Jednou z hlavných a pre funkčnosť pravdepodobne jediných nevýhod je simulácia vstupov a výstupov. Konkrétne simulácia vstupných a výstupných kariet, ktoré sú pridané do HW konfigurácie projektu. Ak sú karty používané v reálnej výrobe, je nutné namapovať premenné na vstupy a výstupy kariet. Do týchto premenných budú zapisované signály prichádzajúce na vstupné a výstupné karty. Pri spustení simulačného PLC pomocou *ARSim*, sú používané rovnaké tasky s rovnakými premennými. Premenné, sú vždy prepisované hodnotami, ktoré prichádzajú na vstupné a výstupné karty. Týmto hodnotami sú len 0, pretože pri simulácií nie sú používané reálne vstupy a výstupy z reálnych zariadení. Tým pádom nie je možné využívať rovnaké premenné v simulácií ako pri chode reálnej bunky.

V AS je obsiahnutá akási forma simulácie vstupných a výstupných kariet pomocou nástroja *SimulationDevice*. Tento nástroj však umožňuje simulovať len premenné, ktoré nie sú namapované na reálnych kartách. Tento problém je možné vyriešiť vytvorením proxy štruktúr, ktoré budú obsahovať vždy dve premenné pre jeden vstup alebo výstup. Jedna premenná sa bude týkať reálnych zariadení a bude namapovaná na vstupné alebo výstupné karty a druhá bude používaná pre simulačný softvér. Proxy štruktúra bude rozhodovať, z ktorej premennej bude informácia prijatá a zapísaná do premenných používaných v taskoch. Týmto sa dosiahne, že v taskoch budú vždy figurovať rovnaké premenné, nezávisle na používaní simulácie alebo reálnej bunky. Rozhodovanie bude prebiehať v samostatnom tasku, kde rozhodujúcou podmienkou bude či je v projekte zapnutá simulácia. V práci je vytvorená prázdna štruktúra s názvom *IOHandling*, ktorá by v prípade potreby slúžila ako proxy štruktúra pre vstupy a výstupy. Ovládaná by bola z tasku, ktorý má rovnaký názov.

### Presun projektov medzi verziami AS

Jedna z nevýhod, ktorá priamo neovplyvňuje chod bunky je presun projektov zo starších verzií AS do novších. Samotný presun nie je vyslovene nutný, ale pri dlhodobých projektoch to môže byť problém. Dôvod prečo by mohol byť projekt presunutý do novšej verzie je niekoľko. Môže to byť napríklad kvôli vytvoreniu nových technológií, ktoré nefungujú vo všetkých verziách alebo vylepšeniu už existujúcich nástrojov, ktoré by mohli uľahčiť ovládanie.

### 8.3 Možnosti budúceho rozvoja

Rozvoj v rámci DD výrobnjej bunky sa určite ponúka v smere vytvorenia vlastných SMC. Najväčší prínos by mal nový SMC pre komunikáciu cez OPC UA. Hlavným dôvodom nahradenia aktuálneho SMC je už spomínané obmedzenie pri prenose dátového typu string. Odstránenie tohto obmedzenia by ešte viac priblížilo DD výrobnjej bunky k realite.

Ďalším doplnkom by určite bolo využitie databázy. Zapojenie databázy s jednotlivými objednávkami a s ukladaním už vytvorených objednávok by prinieslo väčší prehľad vo výrobnjej bunke.

Vhodné by bolo zamerať sa na flexibilnejšiu výrobu v DD. Momentálne DD zvláda výrobu len naučených modelov. Najväčšou prekážkou je v tomto smere simulácia CNC. V najideálnejšom prípade, by malo byť CNC v bunke zastúpené samostatným DD. V tomto prípade sa jedná len o black box, kedy je nutné definovať, aké produkty bude CNC vytvárať. Ak by bolo do DD výrobnjej bunky pridané DD samotného CNC, flexibilita výroby by okamžite stúpla.

Určite je nutné uvažovať aj nad inými softvérmi ako len ABB RobotStudio a B&R Automation Studio. Existuje niekoľko aplikácií flexibilných DD s využitím softvérov od spoločnosti Siemens. Nutné je vyzdvihnúť jeden konkrétny SW s názvom SIMIT Simulation. Tento softvér zvláda simuláciu vstupných a výstupných kariet. Nutná je len konfigurácia simulačných premenných a po konfigurácii je možné bez tvorby pomocných štruktúr a taskov využívať rovnaké premenné pri práci s reálnymi zariadeniami ako pri práci v simulačnom prostredí. Práve toto bol najväčší problém pri tvorbe programu na ovládanie DD v kontexte tejto práce.

### 8.4 Zhrnutie

Využitie dvojice softvérov ABB RobotStudio a B&R Automation Studio sa ukázalo ako dostačujúce pre tvorbu DD. V konečnom dôsledku, účelom týchto SW nie je tvorba DD. Fakt, že oba tieto SW majú nedostatky v tvorbe flexibilných DD a niektoré funkcie DD neboli naplno dosiahnuté, nijako neovplyvňuje možnosť tvorby DD pomocou týchto SW. Práve naopak, je nutné vyzdvihnúť vysokú úroveň simulačných nástrojov ktorými tieto SW disponujú. Práve spojenie týchto dvoch spoločností môže v budúcnosti priniesť nové nástroje a technológie pri tvorbe simulačných modelov a digitálnych dvojčiat.





## 9 ZÁVER

V rámci diplomovej práce bolo vytvorené digitálne dvojča fiktívnej výrobnjej bunky. Skúmané boli hlavne možnosti a obmedzenia softvérov ABB RobotStudio a B&R Automation Studio, ktoré boli zvolené k tvorbe digitálneho dvojčata.

Prvým krokom pri tvorbe digitálneho dvojčata bola príprava simulačného prostredia. Príprava prostredia zahŕňala hlavne import 3D objektov výrobnjej bunky, ktoré boli vytvorené a zjednodušené pomocou softvéru Autodesk Inventor 2023. Po implementácii modelov boli v simulačnom softvéri vytvorené kinematické väzby komponentov, s ktorými bolo počas simulácie nutné pohybovať. Ďalším krokom bolo pridanie ABB robota z knižnice simulačného prostredia a napojenie gripuru na robota. Po rozmiestnení naimportovaných 3D modelov bolo nutné vytvoriť logiku bunky, ktorá bude ovládať procesy počas simulácie. Logika bunky bola vytvorená v záložke *Station Logic* pomocou smart komponentov. Najdôležitejším smart komponentom bol OPC UA klient, ktorý zabezpečoval komunikáciu medzi simulačným prostredím a riadiacim softvérom. Po vytvorení logiky bunky nasledovalo programovanie robota, kedy boli jednotlivé činnosti robota rozčlenené do samostatných modulov. V moduloch boli definované procedúry, ktoré obsahovali konkrétne príkazy pre robota. Po naprogramovaní robota bolo simulačné prostredie pripravené na prijímanie príkazov z riadiaceho systému. V prílohe C je zobrazená štruktúra logiky bunky vytvorená pomocou SMC. Jednotlivé projekty v RS a AS sú obsiahnuté v elektronických prílohách.

Ďalej bol vytvorený projekt v softvéri B&R Automation Studio, pomocou ktorého bolo digitálne dvojča výrobnjej bunky ovládané. Pri tvorbe tohto projektu bolo dbané na fakt, že sa môže jednať o reálnu výrobnú bunku, ktorá môže byť v budúcnosti zapojená do výroby. Toto bol hlavný dôvod, prečo bola v projekte vytvorená rozsiahla HW konfigurácia. Okrem priemyselného PC, ktoré by samotné bolo v kontexte práce dostačujúce, HW konfigurácia obsahuje aj safety vstupy a výstupy, digitálne a analógové vstupy a výstupy, servo drive, frekvenčné meniče a panel k ovládaniu grafického rozhrania. Po vytvorení HW konfigurácie nasledovala definícia dátových štruktúr a premenných. Tie boli následne použité v taskoch, ktoré ovládali jednotlivé stanovišťa výrobnjej bunky. K programovaniu bol zvolený jazyk ANSI C. Tasky medzi sebou komunikovali a v každom tasku bol vytvorený stavový automat. Využitá bola taktiež platforma ROBOTemplate, ktorá vo veľkej miere zjednodušila a zrýchlila ovládanie robota z prostredia PLC. Posledným krokom pri tvorbe riadiaceho systému bol návrh a implementácia užívateľského vizualizačného rozhrania. To bolo vytvorené pomocou technológie *mapView*. Snímky z prostredia Automation Studio a z vizualizácie sa nachádzajú v prílohe A a v prílohe B.

Pri tvorbe modelu digitálneho dvojčata sa vyskytlo niekoľko komplikácií. Na strane RobotStudia išlo o náročnú prácu s objektmi, ktoré mali počas simulácie nastavené vlastnosti ako kinematické. To znamená, že ich fyzikálne vlastnosti neboli počas simulácie ignorované a reagovali na kolízie s inými modelmi. Menšou komplikáciou bolo taktiež, že pomocou smart komponentu OPC UA klient nebolo možné poslať dátový typ string. Na strane Automation Studia bola najväčším obmedzením absencia simulácie vstupných a výstupných kariet. Tá by sa prejavila v prípade implementácie DD na reálnu výrobnú bunku. Napriek týmto výzvam bolo vytvorené plne funkčné digitálne dvojča výrobnéj bunky. Práve implementácia digitálneho dvojčata na reálnu bunku sa ukazuje ako možnosť ďalšieho rozvoja diplomovej práce.

## LITERATÚRA

- [1] HASSAN REZA, M. N., AGAMUDAI NAMBI MALARVIZHI, C., JAYASHREE, S. a MOHIUDDIN, M. Industry 4.0–Technological Revolution and Sustainable Firm Performance. In: *2021 Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)* [online]. Máj 2021, s. 1–6 [cit. 23-04-2023]. DOI: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619363.
- [2] GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, zv. 252, s. 119869, [cit. 23-04-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>. ISSN 0959-6526. Dostupné z: [dihttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619347390](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619347390).
- [3] LASI, H., PETER FETTKE, T. F. a HOFFMANN, M. Industry 4.0. *Bus Inf Syst Eng* [online]. 2014, zv. 6, s. 239–242, [cit. 27-04-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-014-0334-4>.
- [4] OKANO, M. T. IOT and Industry 4.0: The Industrial New Revolution. [online]. 2017, s. 75–82, [cit. 28-04-2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Okano-2/publication/319881057\\_IOT\\_and\\_Industry\\_40\\_The\\_Industrial\\_New\\_Revolution/links/59c018a5aca272aff2e20639/IOT-and-Industry-40-The-Industrial-New-Revolution.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Okano-2/publication/319881057_IOT_and_Industry_40_The_Industrial_New_Revolution/links/59c018a5aca272aff2e20639/IOT-and-Industry-40-The-Industrial-New-Revolution.pdf).
- [5] AHELEROFF, S., XU, X., LU, Y., ARISTIZABAL, M., PABLO VELÁSQUEZ, J. et al. IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study. *Advanced Engineering Informatics* [online]. 2020, zv. 43, s. 101043, [cit. 02-05-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101043>. ISSN 1474-0346. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034620300124>.
- [6] YEN, I.-L., ZHANG, S., BASTANI, F. a ZHANG, Y. A Framework for IoT-Based Monitoring and Diagnosis of Manufacturing Systems. In: *2017 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE)* [online]. 2017, s. 1–8 [cit. 28-04-2023]. DOI: 10.1109/SOSE.2017.26.
- [7] BARYENBRUCH, D. *BRINGING INDUSTRY 4.0 COMMUNICATIONS TO AUTOMATION DEVICES* [online]. [cit. 27-04-2023]. Dostupné z: <https://www.rtautomation.com/industry-4-0-communications-to-automation-devices/>.
- [8] SCHLEIPEN, M., GILANI, S.-S., BISCHOFF, T. a PFROMMER, J. OPC UA & Industrie 4.0 - Enabling Technology with High Diversity and Variability. *Procedia CIRP* [online]. 2016, zv. 57, s. 315–320, [cit. 22-04-2023]. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.055>. ISSN 2212-8271. *Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116312094>.
- [9] MATLAB. *Access OPC UA data from MATLAB and Simulink* [online]. [cit. 28-04-2023]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/opc-ua.html>.
- [10] HOPPE, S. *There Is No Industrie 4.0 without OPC UA* [online]. 2017 [cit. 29-04-2023]. Dostupné z: <https://opconnect.opcfoundation.org/2017/06/there-is-no-industrie-4-0-without-opc-ua/>.
- [11] BOWNE, M. *WHAT IS PROFINET? – PROFINET EXPLAINED* [online]. 2021 [cit. 05-05-2023]. Dostupné z: <https://us.profinet.com/profinet-explained/>.
- [12] COLLINS, D. *What is OPC UA and how does it compare with Industrial Ethernet?* [online]. 2020 [cit. 05-05-2023]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-opc-ua-and-how-does-it-compare-with-industrial-ethernet/>.
- [13] ATTARAN, M. a CELIK, B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal* [online]. 2023, zv. 6, s. 100165, [cit. 18-04-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>. ISSN 2772-6622. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277266222300005X>.
- [14] SJAROV, M., LECHLER, T., FUCHS, J., BROSSOG, M., SELMAIER, A. et al. The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* [online]. 2020, sv. 1, s. 1789–1796 [cit. 12-05-2023]. DOI: [10.1109/ETFA46521.2020.9212089](https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212089).
- [15] IEE. *What Is a Digital Twin, Anyway?* [online]. 2022 [cit. 06-05-2023]. Dostupné z: <https://transmitter.ieee.org/what-is-a-digital-twin-anyway/>.
- [16] PIRES, F., CACHADA, A., BARBOSA, J., MOREIRA, A. P. a LEITÃO, P. Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. In: *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* [online]. 2019, sv. 1, s. 721–726 [cit. 14-04-2023]. DOI: [10.1109/INDIN41052.2019.8972134](https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972134).

- [17] PLANK, T. *DIGITAL TWINS: THE 4 TYPES AND THEIR CHARACTERISTICS* [online]. 2019 [cit. 10-05-2023]. Dostupné z: <https://www.tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins>.
- [18] COURSERA. *What Is a Digital Twin? Definition, Types, and Uses* [online]. 2023 [cit. 10-05-2023]. Dostupné z: <https://www.coursera.org/articles/digital-twin>.
- [19] ATTARAN, M. a CELIK, B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal* [online]. 2023, zv. 6, s. 100165, [cit. 03-05-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>. ISSN 2772-6622. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277266222300005X>.
- [20] LIU, M., FANG, S., DONG, H. a XU, C. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2021, zv. 58, s. 346–361, [cit. 04-04-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>. ISSN 0278-6125. Digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301072>.
- [21] CAULFIELD, B. *NVIDIA, BMW Blend Reality, Virtual Worlds to Demonstrate Factory of the Future* [online]. 2021 [cit. 11-05-2023]. Dostupné z: <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/04/13/nvidia-bmw-factory-future/>.
- [22] HUANG, W., ZHANG, Y. a ZENG, W. Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* [online]. 2022, zv. 36, s. 100781, [cit. 04-04-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100781>. ISSN 2210-5379. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210537922001123>.
- [23] ENERGY, G. R. *A BREAKDOWN OF THE DIGITAL WIND FARM* [online]. [cit. 11-05-2023]. Dostupné z: <https://www.ge.com/renewableenergy/stories/meet-the-digital-wind-farm>.
- [24] DAMGRAVE, R. a LUTTERS, E. Synthetic prototype environment for industry 4.0 testbeds. *Procedia CIRP* [online]. 2020, zv. 91, s. 516–521, [cit. 05-04-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.208>. ISSN 2212-8271. Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120308593>.

- [25] INTEMAC. *Zažijte Průmysl 4.0 na vlastní kůži* [online]. [cit. 12-05-2023]. Dostupné z: <https://www.intemac.cz/co-nabizime/test-before-invest/testbed/>.
- [26] CEITEC. *TestBed Průmyslu 4.0* [online]. [cit. 12-05-2023]. Dostupné z: <https://www.ceitec.cz/ricaip/>.
- [27] RICAIP. *TestBed Praha* [online]. [cit. 12-05-2023]. Dostupné z: <https://ricaip.eu/testbed-prague/>.
- [28] TESTBED. *Slovensko má prvý testbed zameraný na Industry 4.0* [online]. [cit. 12-05-2020]. Dostupné z: <https://www.testbed.sk/slovensko-ma-prvy-testbed-zamerany-na-industry-4-0/>.
- [29] AUTOMATION, B. *Automation Studio* [online]. [cit. 14-05-2023]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/software/automation-software/automation-studio/>.
- [30] TU, J. *Siemens: Programming Software Selection Guide* [online]. [cit. 14-05-2023]. Dostupné z: <https://www.awc-inc.com/siemens-programming-software-selection-guide/>.
- [31] ETHERCAT. *PLC and Motion Control Software TwinCAT* [online]. [cit. 14-05-2023]. Dostupné z: <https://www.ethercat.org/en/products/EE89D3E40659427C8D3458706B14AC57.htm>.
- [32] ABB. *RobotStudio Suite* [online]. [cit. 16-05-2023]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>.
- [33] JUEGO. *What is Unity 3D? A Comprehensive Guide to Unity's Features and Uses* [online]. [cit. 16-05-2023]. Dostupné z: <https://www.juegostudio.com/blog/what-is-unity-3d-a-comprehensive-guide-to-unitys-features-and-uses>.
- [34] DEV. *How often have you created a state machine diagram?* [online]. [cit. 16-05-2023]. Dostupné z: <https://dev.to/whoisryosuke/how-often-have-you-created-a-state-machine-diagram-2531>.
- [35] SCHUNK. *EGI 080-PN* [online]. [cit. 18-05-2023]. Dostupné z: <https://schunk.com/in/en/gripping-systems/parallel-gripper/egi/egi-080-pn/p/000000000001474384>.
- [36] GRABCAD. [online]. [cit. 18-05-2023]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library>.

- [37] ABB. *Operating manual RobotStudio* [online]. [cit. 20-05-2023]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/244a8a5c10ef8875c1257b4b0052193c/3HAC032104-001\\_revD\\_en.pdf](https://library.e.abb.com/public/244a8a5c10ef8875c1257b4b0052193c/3HAC032104-001_revD_en.pdf).
- [38] ABB. *RobotStudio SDK* [online]. [cit. 20-05-2023]. Dostupné z: <https://developercenter.robotstudio.com/api/robotstudio/index.html>.
- [39] AUTOMATION, B. *Mapp View* [online]. [cit. 14-05-2023]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/software/mapp-technology/mapp-view/>.





## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

AR	rozšířená realita
AS	Automation Studio
BUS	radiaca zbernica
CPU	centrálna procesorová jednotka
CSS	Cascading Style Sheets
DD	digitálne dvojča
HMI	human machine interface
HTML	hypertext markup language
IOT	internet vecí
JS	JavaScript
MCD	Mechatronic Concept Designer
PLM	riadenie životného cyklu produktu
RS	RobotStudio
SMC	smart components
TB	TestBed
TIA	Totally Integrated Automation
VR	virtuálna realita
XML	eXtensible Markup Language



## ZOZNAM OBRÁZKOV

1	Návrh Priemyslu 4.0 [2] .....	17
2	Digitálna transformácia s využitím IOT [5] .....	19
3	Možnosti výmeny dát jednotlivých komunikačných protokolov [7] ...	19
4	Využitie protokolu OPC UA v priemysle [9] .....	20
5	Spojenie komunikačných protokolov OPC UA a ProfiNet [12] .....	21
6	Fungovanie digitálneho dvojčata [16] .....	24
7	Kategórie digitálneho dvojčata [17] .....	25
8	Úrovne digitálnej reprezentácie [13] .....	26
9	Digitálna továreň BMW [21] .....	28
10	Digitálne dvojča mesta [22] .....	29
11	Adaptívna veterná farma [23] .....	29
12	TestBed Intemac .....	30
13	Náhľad RICAIP TestBedu [26] .....	31
14	Náhľad TestBedu CIIRC ČVUT [27] .....	32
15	TestBed 4.0 [28] .....	32
16	Schéma komunikácie .....	36
17	Príklad stavového automatu pre prihlásenie [34] .....	38
18	Hlavný panel v softvéri ABB RobotStudio .....	39
19	Schéma rozmiestnenia jednotlivých stanovišť .....	40
20	3D model grippru, zveráka a CNC .....	41
21	Náhľad výrobnjej bunky v softvéri ABB RobotStudio .....	42
22	Sprievodca tvorbou mechanizmu .....	43
23	Prvý a druhý krok pri tvorbe mechanizmu .....	44
24	Robot ABB IRB4600_45_205 s gripprom Schunk EGI 080-PN .....	45
25	SMC čiarového senzoru a polohovača mechanizmov .....	46
26	Rozhranie OPC UA SMC .....	47
27	Vytvorené SMC a ich prepojenie .....	48
28	Schéma logiky výrobnjej bunky .....	49
29	Štruktúra tasku robota v DD výrobnjej bunky .....	50
30	Schéma 6 procedúr, ktoré robot vykonáva .....	52
31	Náhľad HW konfigurácie v AS .....	56
32	Dátová štruktúra kamerového systému .....	57
33	Prehľad globálnych premenných a ich dátových typov .....	58
34	Naznačenie toku produktov a požiadaviek .....	59

35	Úprava kolobehu pri pridání nového stanovišta . . . . .	60
36	Príklad zapisovania a čítania procedúr . . . . .	61
37	Príklad zapisovania a čítania procedúr . . . . .	62
38	Prepojenie viacerých HMI pomocou mapView [39] . . . . .	63
39	Rozloženie stránok vo vizualizácii . . . . .	64
40	Hlavná stránka vizualizácie . . . . .	66
41	Signály z jednotlivých kĺbov robota v nástroji <i>Signal Analyzer</i> . . . . .	68

## ZOZNAM PRÍLOH

<b>PRÍLOHA A</b>	<b>Dátové štruktúry a logika riadiaceho systému</b>
<b>PRÍLOHA B</b>	<b>Stránky užívateľského vizualizačného rozhrania</b>
<b>PRÍLOHA C</b>	<b>Štruktúra smart komponentov v digitálnom dvojčati výrobnej bunky</b>

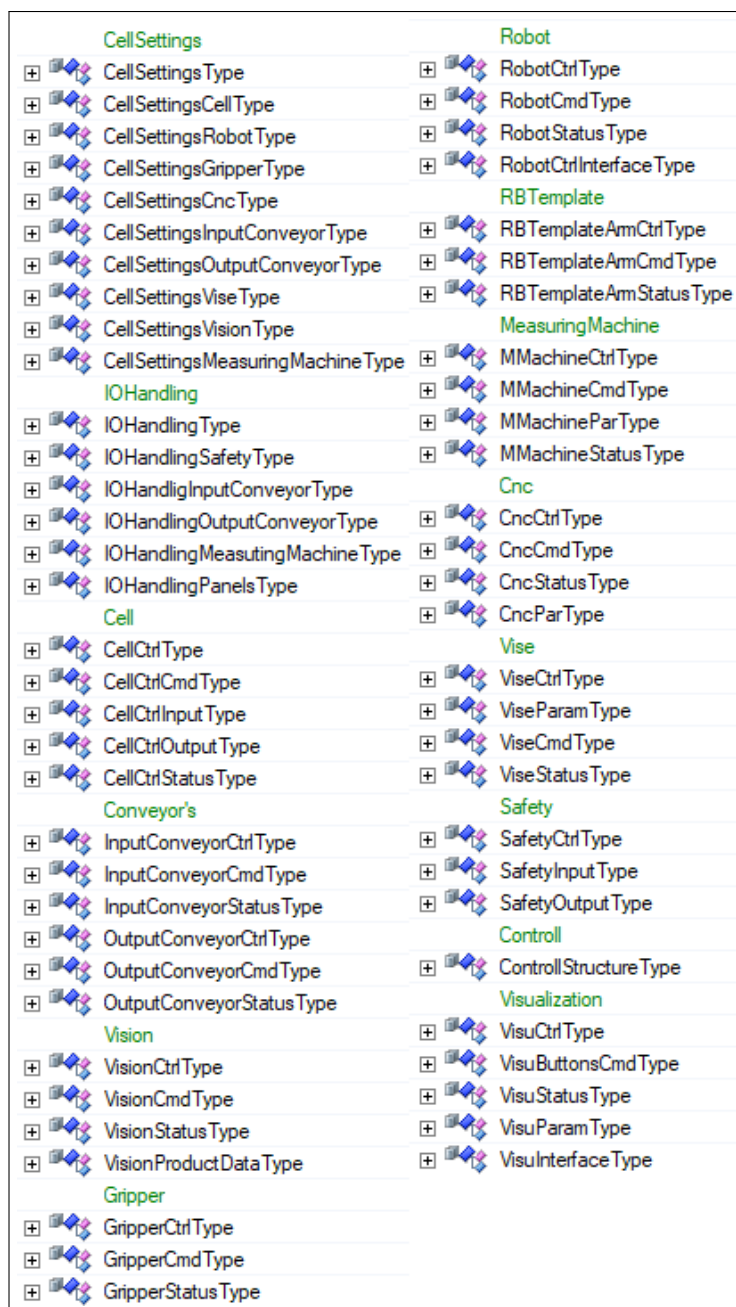
### **Elektronické prílohy:**

Export projektu v softvéri ABB RobotStudio

Export projektu v softvéri B&R Automation Studio



## **A Dátové struktúry a logika riadiaceho systému**

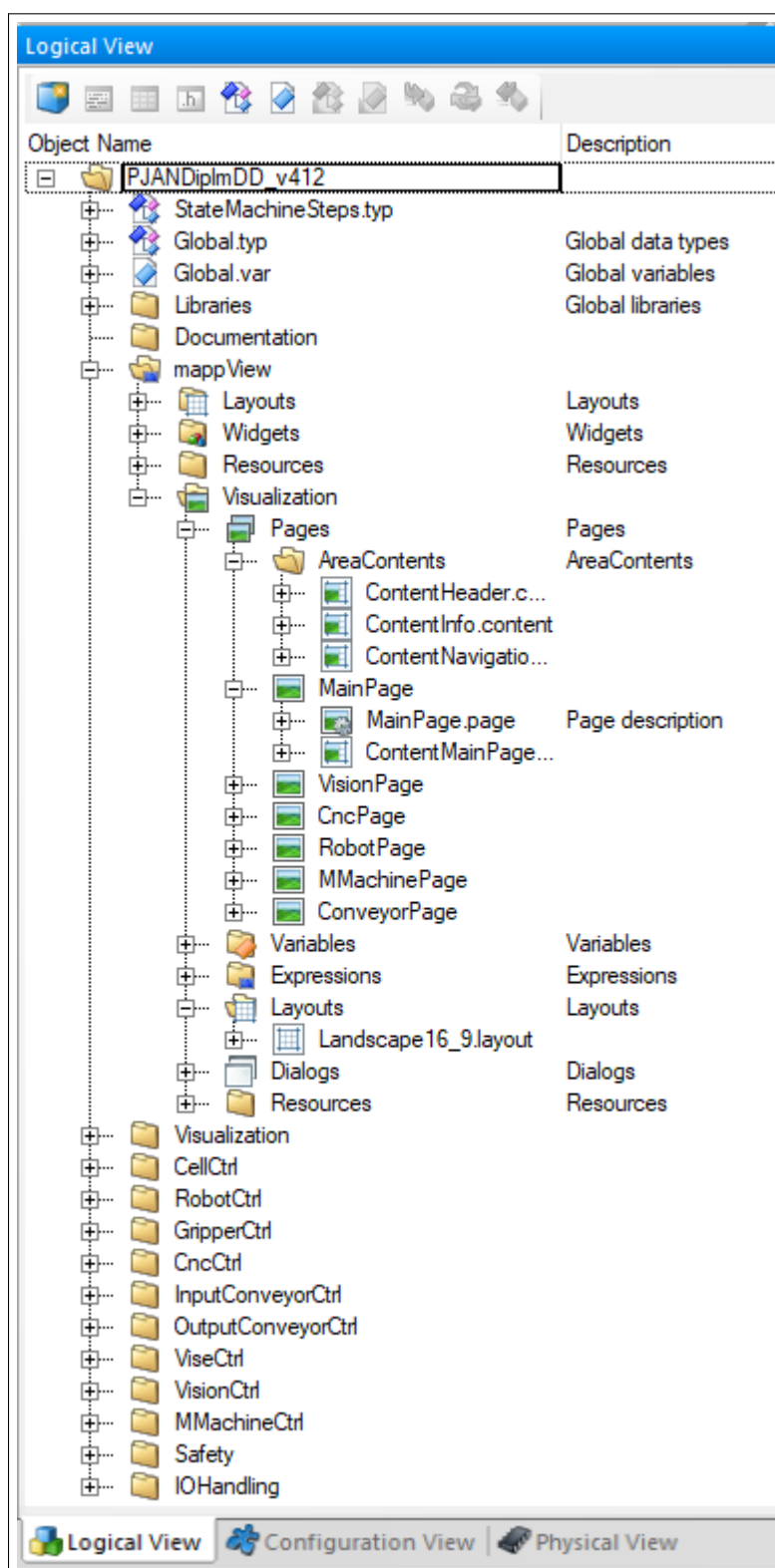


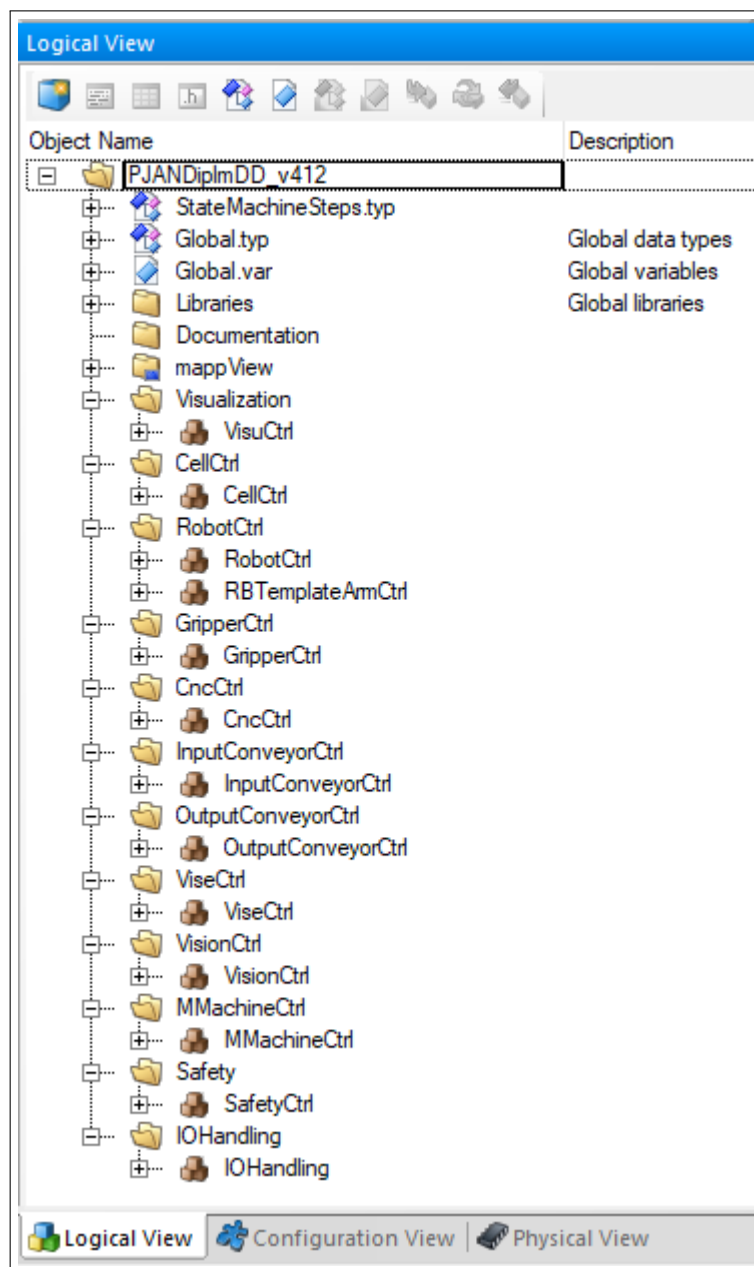
Obr. 1: Stromy datových struktur



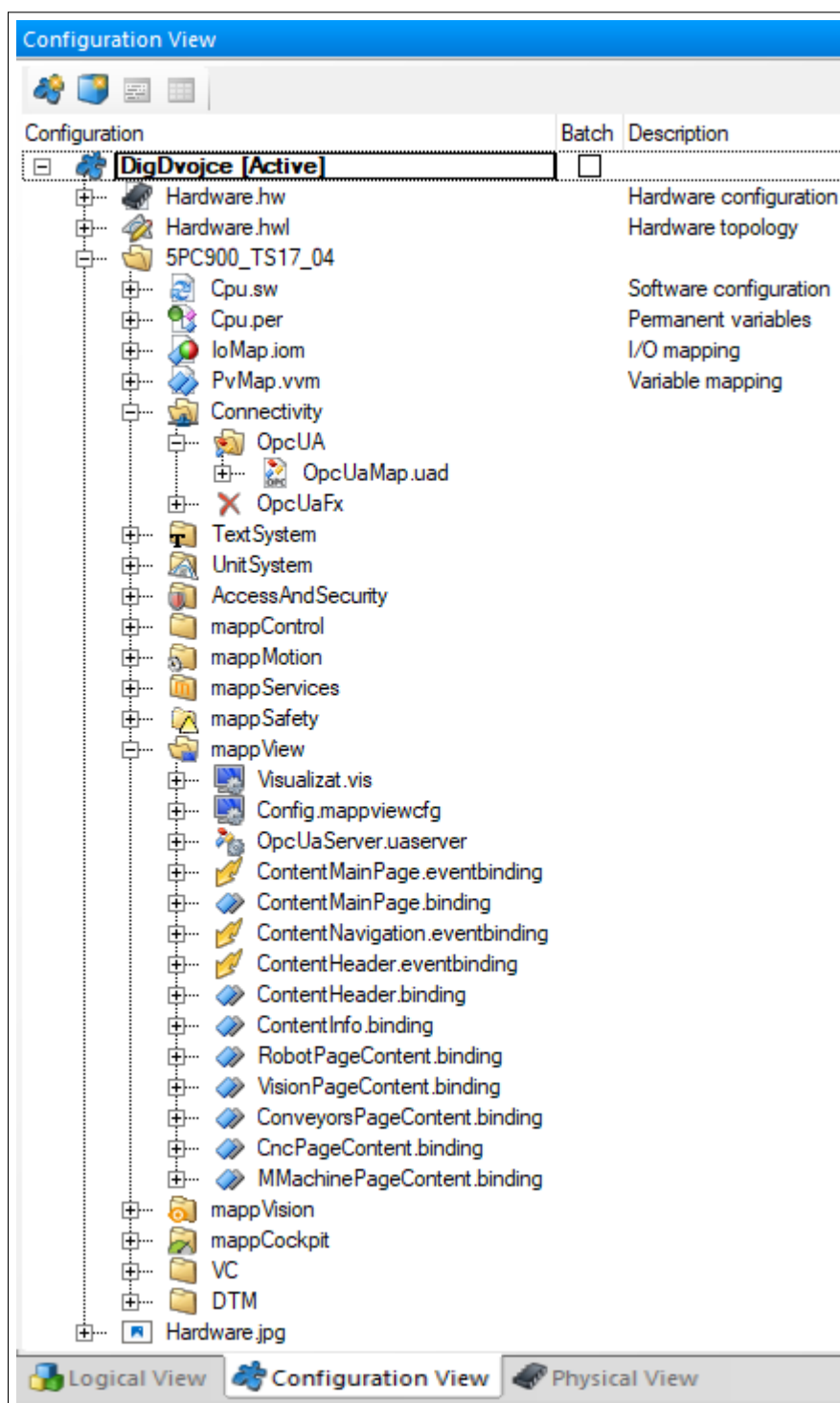
gBufferWriteIndex	DINT
gRobotBuffer	DINT[0..2000]
gArSimUsed	BOOL
Main Ctrl Structures	
gSafetyCtrl	SafetyCtrlType
gCellCtrl	CellCtrlType
gRBTemplateCtrl	RobotCtrlInterfaceType
gRBTemplateArmCtrl	RBTemplateArmCtrlType
gRobotCtrl	RobotCtrlType
gGripperCtrl	GripperCtrlType
gMMachineCtrl	MMachineCtrlType
gCncCtrl	CncCtrlType
gInputConveyorCtrl	InputConveyorCtrlType
gOutputConveyorCtrl	OutputConveyorCtrlType
gViseCtrl	ViseCtrlType
gVisionCtrl	VisionCtrlType
gIOHandling	IOHandlingType
gCellSettings	CellSettingsType
gVisuInterface	VisuInterfaceType
gVisuCtrl	VisuCtrlType
Constants	
VISION_MAX_PRODUCT_MINUS_ONE	USINT
VISION_MAX_PRODUCT	USINT
TestingVariables	
gRoboTemplate	RBTemplateRobotCtrl
gStringOpcua	STRING[32]

Obr. 2: Globálne premenné s dátovými typmi štruktúr

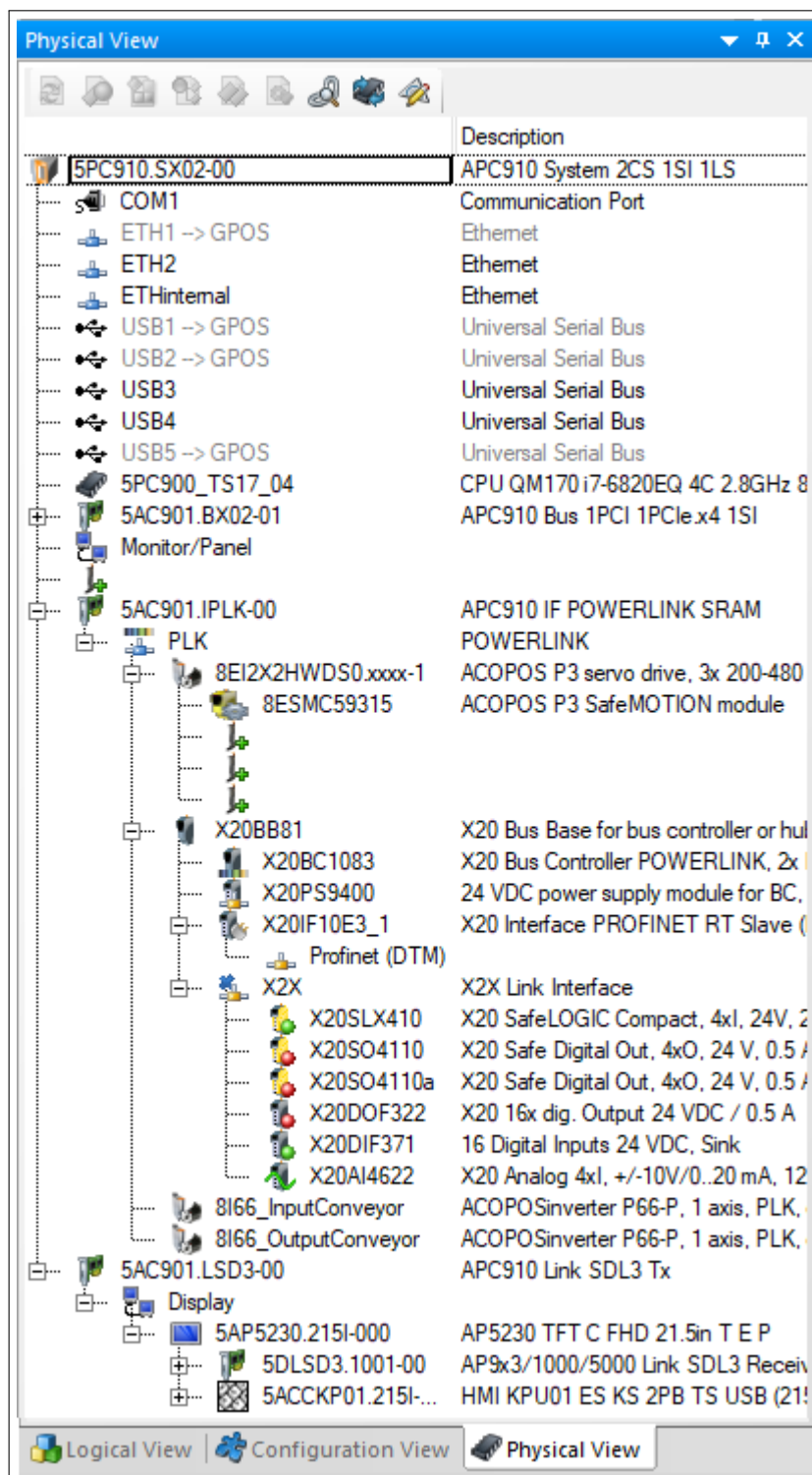
Obr. 3: *Logical View* - Vizualizácia



Obr. 4: *Logical View* - Úlohy jednotlivých stanic, robota a vizualizácie



Obr. 5: *Configuration View* - konfigurácia vizualizácie



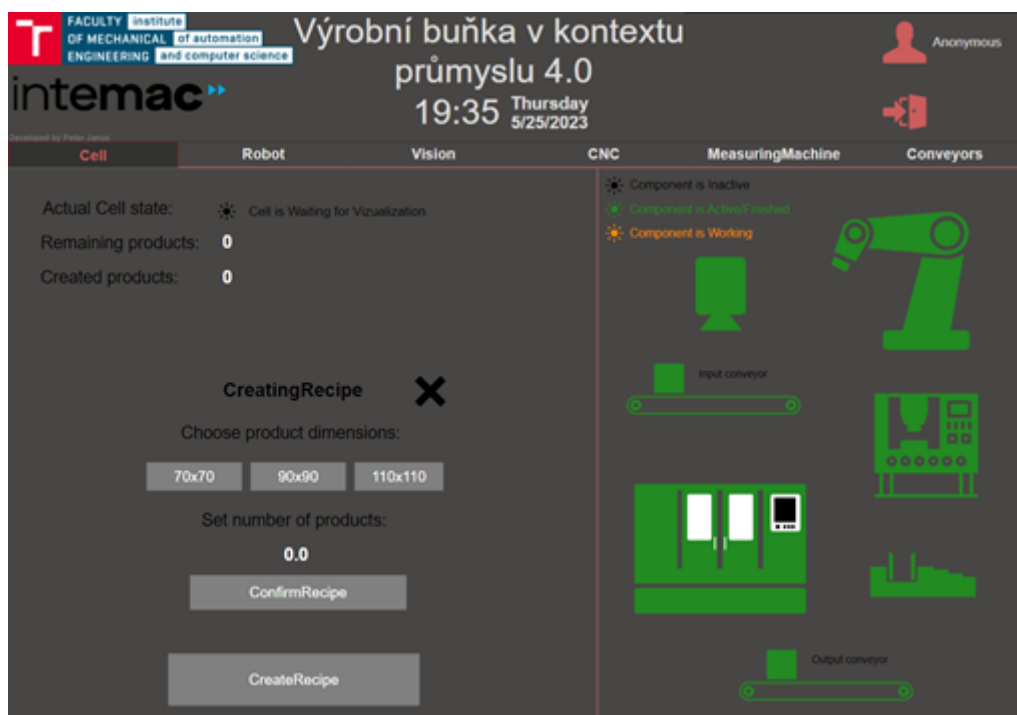
Obr. 6: *Physical View* - HW konfigurácia



## **B Stránky uživatelského vizualizačního rozhraní**

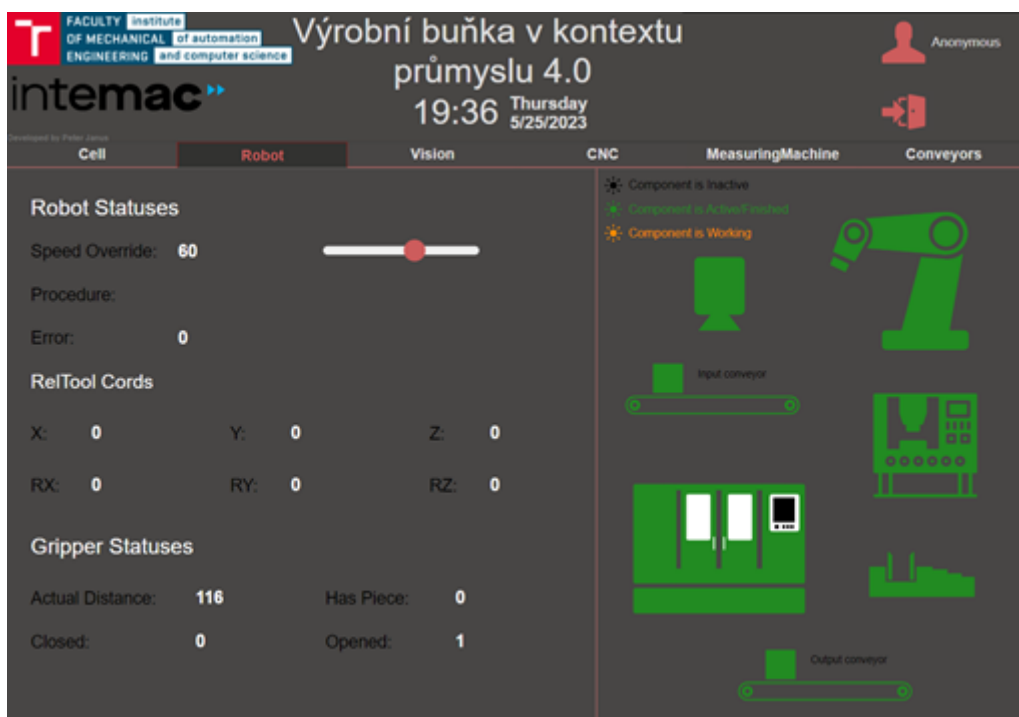


Obr. 1: Hlavná stránka vizualizácie pred zapnutím RobotStudia

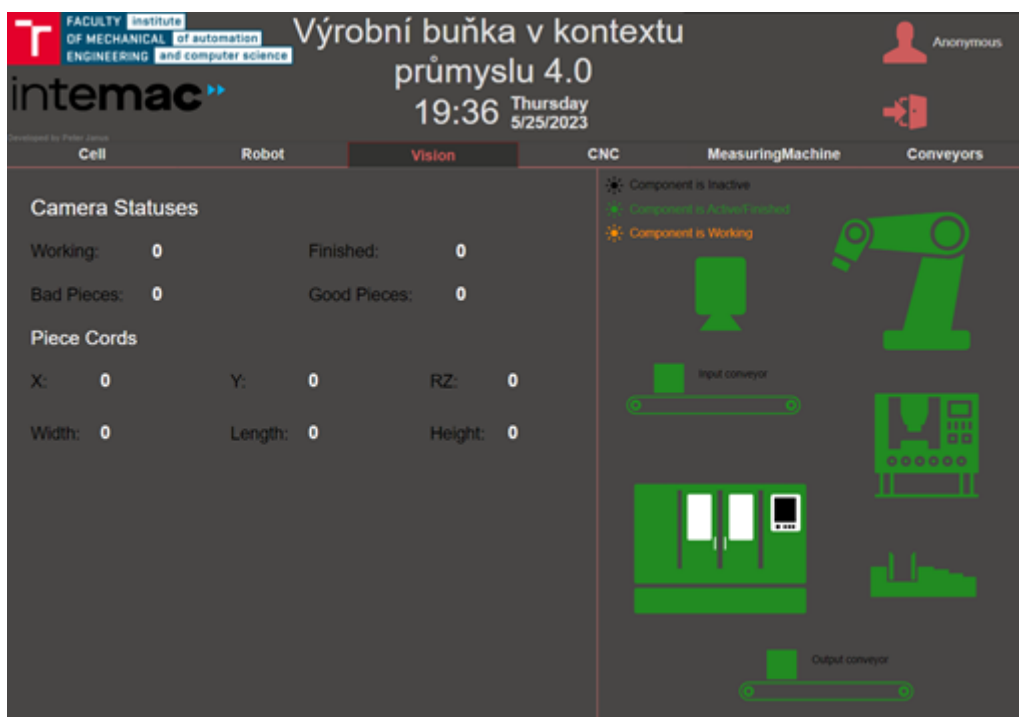


Obr. 2: Hlavná stránka vizualizácie po zapnutí RobotStudia

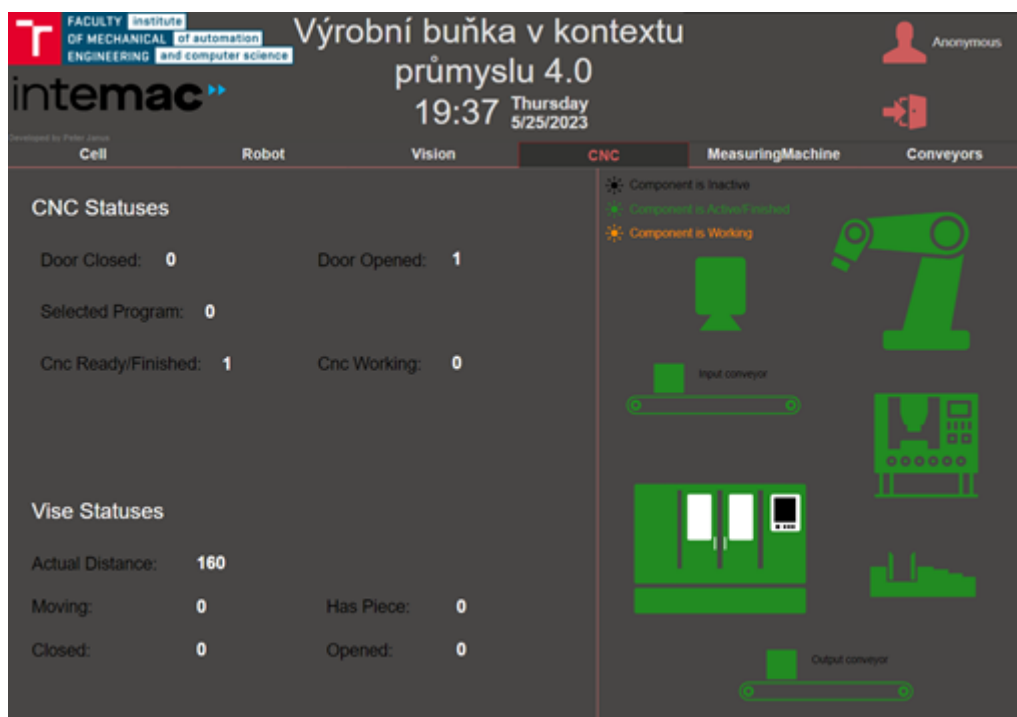




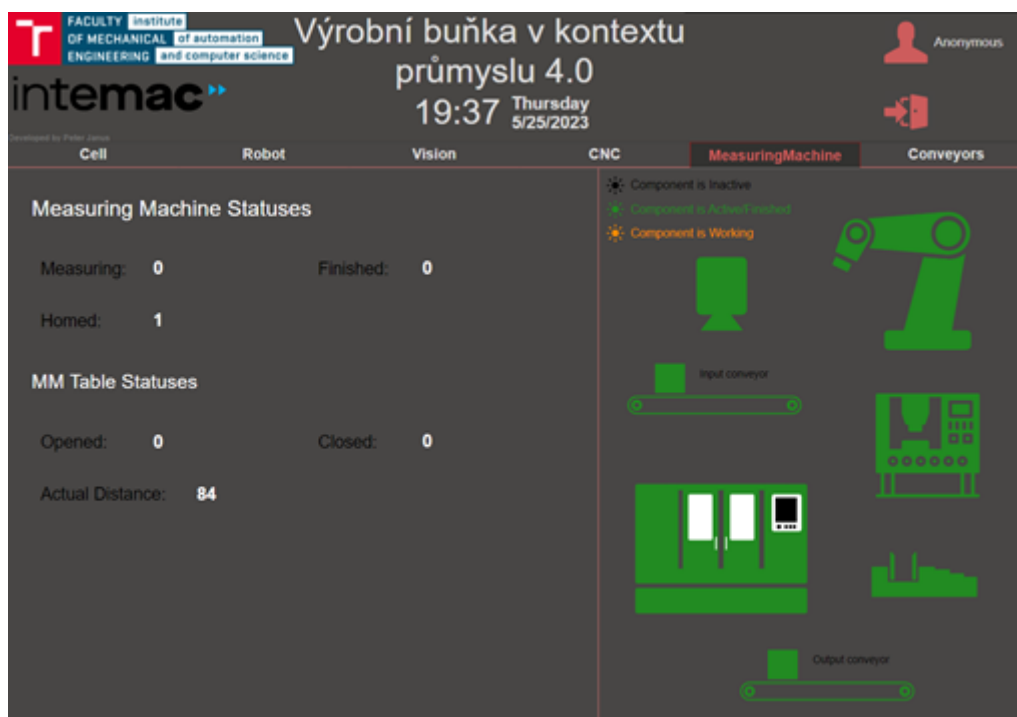
Obr. 3: Stránka robota a gripru



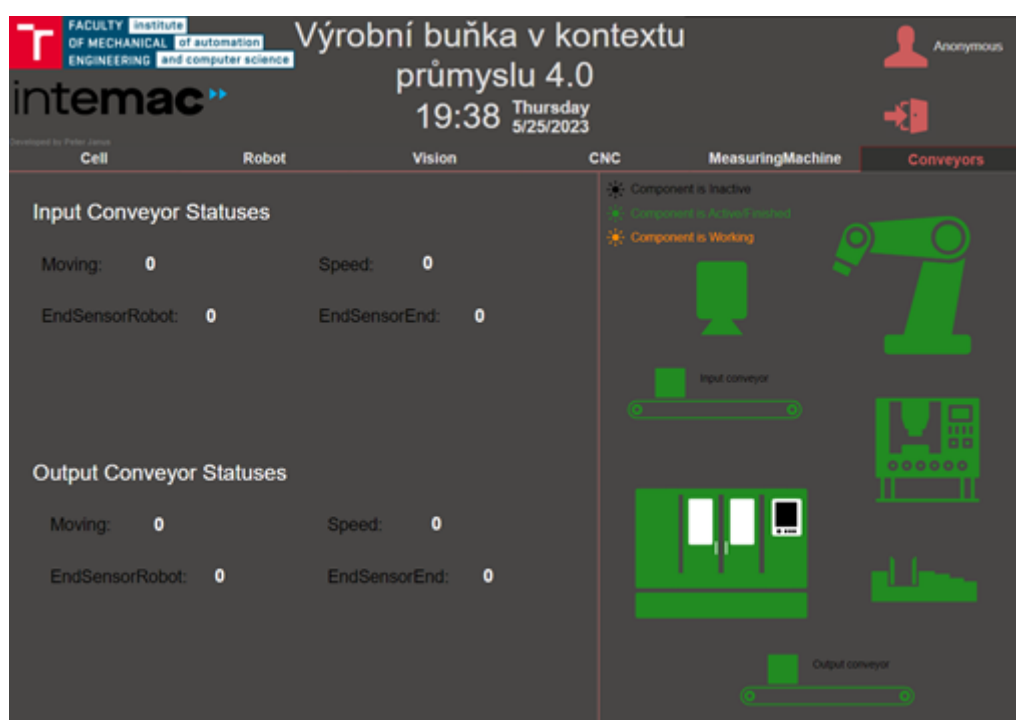
Obr. 4: Informácie o kamerovom systéme



Obr. 5: Informácie o CNC a zveráku



Obr. 6: Stránka meracieho zariadenia

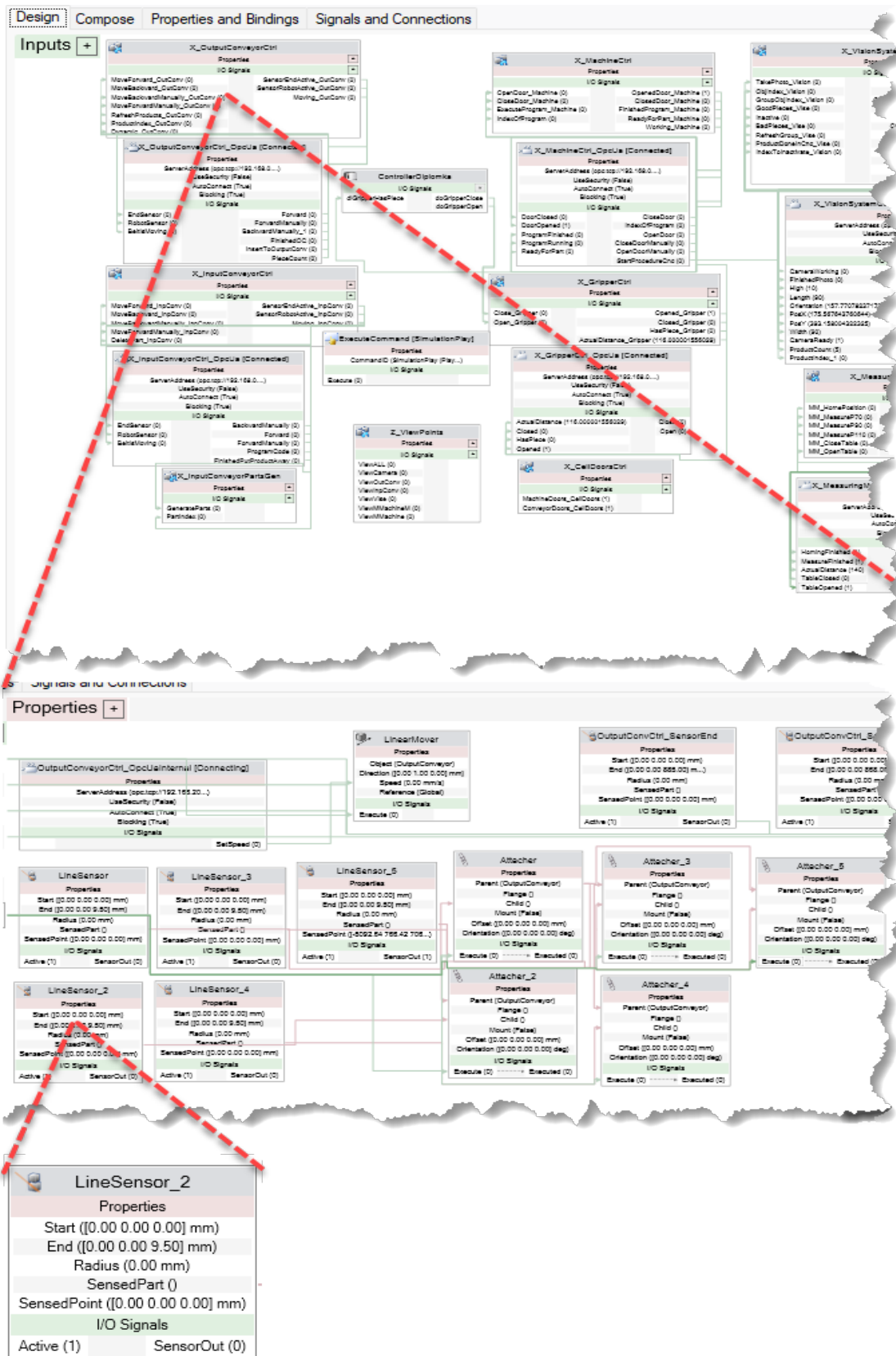


Obr. 7: Informácie o vstupnom a výstupnom dopravníku



## C Štruktúra smart komponentov v digitálnom dvojčati výrobnjej bunky

Táto príloha zobrazuje prepojenie *Smart Components* (ďalej tiež SMC) v *Station Logic*. V hornej časti obrázku sa nachádza najvyššia vrstva štruktúry, ktorá zobrazuje SMC jednotlivých stanovišť a ich OPC UA klienty. V strede je štruktúra SMC konkrétneho stanovišťa a v dolnej časti obrázku je konkrétny SMC, ktorý bolo nutné parametrizovať. V práci sa nachádza zhruba 180 SMC, ktoré bolo nutné parametrizovať.



Obr. 1: Prepojenie SMC v Station Logic