

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

**Ing. Michal Balla**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**Digitálne dvojča udalostného výrobného procesu so zameraním na človeka**

na získanie akademického titulu: doktor (“philosophiae doctor”, v skratke “PhD.”)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore: Kybernetika

Forma štúdia: denná

**Miesto a dátum:** Bratislava 26.1.2026

**Dizertačná práca bola vypracovaná na:**

Ústav automobilovej mechatroniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Ilkovičova 3, 841 04

**Predkladateľ:** Ing. Michal Balla  
Ústav automobilovej mechatroniky  
FEI STU BA, Ilkovičová 3, 841 04 Bratislava

**Školiteľ:** doc. Ing. Oto Haffner, PhD.  
Ústav automobilovej mechatroniky  
FEI STU BA, Ilkovičová 3, 841 04 Bratislava

**Oponenti:** doc. Ing. Martin Juhás, PhD.  
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky  
MTF STU  
Ulica Jána Bottu 2781/25, 91724 Trnava

prof. Ing. Štefan Kozák, PhD.  
Ústav aplikovanej informatiky  
FI PEVŠ  
Tematínska 10, 851 05 Bratislava

**Autoreferát bol dňa:** .....  
(dátum rozoslania)

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa:** .....

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave Ilkovičova 3, 841 04, v miest-  
nosti .....

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

# SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program:	Mechatronické systémy
Autor:	Ing. Michal Balla
Písomná práca k dizertačnej skúške:	Human-centric digitálne dvojčá porované inteligentnými technológiami
Vedúci záverečnej práce:	doc. Ing. Oto Haffner, PhD.
Miesto a rok predloženia práce:	Bratislava 2026

Pri nástupe priemyselnej revolúcie Industry 4.0 sa objavili technológie, ktoré výrazne ovplyvnili oblasť výroby. Napriek tomu, že niektoré z nich nezaznamenali široké uznanie v bežnej populácii, ich prínos pre podnikanie bol významný. Medzi takéto technológie patrí aj koncept digitálnych dvojčiat, ktorý pomohol firmám zefektívniť pracovné procesy, znížiť náklady a optimalizovať výrobu. Aktuálne však stojíme na prahu ďalšej priemyselnej revolúcie – Industry 5.0, ktorá prináša nové výzvy a mení paradigmu od nahradzovania ľudskej práce strojmi k zdôrazneniu kooperácie medzi človekom a strojom. Táto práca sa zameriava na technológiu digitálnych dvojčiat zameraných na človeka. Predstavíme definíciu digitálnych dvojčiat a ich komponenty, preskúmame technológie nevyhnutné pre ich vývoj a podrobne opíšeme ciele vytvárania digitálnych dvojčiat s orientáciou na človeka.

Kľúčové slová: Unity, PLC, digitálne dvojčá, HCDDT, Industry 5.0

# ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Programme:	Mechatronic Systems
Author:	Ing.Michal Balla
Thesis:	Human-Centric Digital Twin of an Event-Driven Manufacturing Process
Supervisor:	doc. Ing. Oto Haffner, PhD.
Place and year of submission:	Bratislava 2026

With the rise of the Industry 4.0 revolution, technology has emerged, that have had a profound impact on manufacturing. Although some of the have not seen widespread acceptance in the general population, their contribution to business has been significant. Such technologies include the concept of of digital twins, which has helped companies to improve the efficiency of work processes, reduce costs and optimise production. However, we are currently on the threshold of the next industrial revolution - Industry 5.0, which brings new challenges and shifting the paradigm from replacing human labour with machines to emphasising cooperation between man and machine. This thesis focuses on Human-centric digital twin technology. We introduce the definition of digital twins and their components, review the technology necessary for their development, and describe in detail the goals of creating digital human-centric twins.

Keywords: Unity, PLC, digital twin, HCDDT, Industry 5.0

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Súčasný stav v oblasti digitálnych dvojčiat</b>	<b>3</b>
1.1 Aplikácie digitálneho dvojčata alebo digitálneho tieňa v robotických aplikáciách . . . . .	3
1.2 Aplikácie digitálnych dvojčiat s použitím VR/AR . . . . .	4
1.3 Aplikácie použitia digitálneho dvojčata vo výrobných procesoch s použitím PLC . . . . .	5
1.4 Nevýrobné aplikácie digitálneho dvojčata . . . . .	7
1.5 Aplikácie digitálnych dvojčiat s výučbovými modelmi od spoločnosti Fischertechnik . . . . .	8
1.6 Práce zamerané na HCDT . . . . .	9
1.7 Sumarizácia súčasného stavu . . . . .	10
<b>2 Konceptný návrh riešenia</b>	<b>12</b>
2.1 Funkcionálne a nefunkcionálne požiadavky . . . . .	13
<b>3 Použité technológie</b>	<b>15</b>
3.1 Riadiaci systém PLC S7-1500 a výukové zariadenie Multi Processing Oven	15
3.1.1 PLC S7 - 1500 . . . . .	15
3.1.2 Výukové zariadenie Multi Processing Oven od spoločnosti Fischer-technik . . . . .	15
3.1.3 TIA Portal . . . . .	16
3.2 CoDeSys a UA Expert . . . . .	16
3.3 Asset Administration Shell . . . . .	17
3.4 OPC UA . . . . .	17
3.4.1 Komunikačné rozhranie digitálneho dvojčata . . . . .	18
3.4.2 OPC UA PubSub . . . . .	18
3.4.3 MQTT broker Mosquitto . . . . .	23
3.4.4 MQTT Explorer . . . . .	23
<b>4 Realizácia cieľov práce</b>	<b>24</b>
4.1 Výukový model pece ovládaný zariadením PLC . . . . .	24
4.2 Uvedenie PLC systému do prevádzky a programovanie modelu pece . . . .	24
4.2.1 Softvérové spojzdenie PLC zariadenia . . . . .	24

4.3	Programovanie riadiaceho systému modelu pece . . . . .	25
4.4	Implementácia komunikačného protokolu OPC UA PubSub . . . . .	26
4.4.1	Publisher . . . . .	26
4.4.2	Subscriber . . . . .	26
4.5	Transformácia skriptov OPC UA PubSub do Unity . . . . .	27
4.5.1	Transformácia skriptu . . . . .	27
4.6	Komunikácia PubSub na strane TIA portalu . . . . .	27
4.7	Model multifunkčnej pece v Unity . . . . .	27
4.7.1	Tvorba a konverzia modelu pece . . . . .	28
4.7.2	Usporiadanie hierarchie submodelov . . . . .	28
4.7.3	Modularita modelu pomocou Asset Administration Shell . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Funkcionalita a možnosti aplikácie</b>	<b>30</b>
5.1	Scény . . . . .	30
5.1.1	Základná scéna . . . . .	30
5.1.2	Simulačná scéna . . . . .	30
5.1.3	Scéna v rozšírenej realite . . . . .	31
5.2	Riadenie fyzického modelu prostredníctvom aplikácie . . . . .	31
5.2.1	Riadenie digitálneho dvojčata z PLC zariadenia . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Zhrnutie výsledkov a analýza práce</b>	<b>34</b>
6.1	Zovšeobecnenie metodiky vývoja digitálnych technológií digitálneho dvojčatá zameraného na človeka pre analyzovanú triedu kyberneticko-fyzikálnych systémov . . . . .	35
	<b>Záver</b>	<b>37</b>
	<b>Prínosy práce</b>	<b>39</b>
	<b>Publikačná činnosť</b>	<b>41</b>
	<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>50</b>

# Úvod

Každá z predchádzajúcich priemyselných revolúcií priniesla svetu inovácie, ktoré zefektívnila výrobné procesy, optimalizovali pracovnú silu a dodávateľské reťazce. Avšak cena za vyššiu efektivitu a kvalitu výroby často spočívala v nahrádzaní ľudskej práce strojmí, dopravnými linkami a počítačmi. Hoci stroje môžu pracovné úlohy vykonávať rýchlejšie a efektívnejšie ako človek, chýba im ľudský prístup pri rozhodovaní v kritických situáciách a jemná motorika v náročných prostrediach. Nová revolúcia označovaná ako Industry 5.0 však prináša myšlienku synergie medzi najlepšimi vlastnosťami človeka a stroja. Táto koncepcia vedie k pojmu „operátor 5.0“, kde sa ľudské vnímanie, kognitívne schopnosti a interaktívne zručnosti posilňujú rôznymi podpornými technológiami. Cieľom je tu využiť tieto silné stránky na dosiahnutie udržateľného rozvoja so zameraním na sociálny blahobyt a odolnosť voči nepredvídaným výzvam. S touto koncepciou úzko súvisí aj digitálne dvojča.

Digitálne dvojča je technológia, ktorá nemusí byť tak viditeľná v bežnej populácii ako napríklad všeobecné pojmy digitalizácie a automatizácie alebo konkrétne technológie ako Cloud, IoT a umelá inteligencia. Napriek tomu je pre priemysel a výrobu často kľúčovou technológiou, ktorá šetrí náklady, zvyšuje efektivitu práce a optimalizuje výkon. Práve koncept digitálneho dvojčata zameraného na človeka by mal byť jednou z popredných technológií spájajúcich tieto dva svety. Táto nová technológia, ktorá je dnes ešte stále hlavne v teoretickej rovine alebo v počiatočných fázach pilotných projektov, využíva technológie virtuálnej a zmiešanej reality, herné enginy, rozličné senzory a markery, aby umožnila pracovníkom čo najlepšiu spoluprácu s robotickým náprotivkom.

Hoci digitálne dvojčatá strojov našli široké využitie v priemysle, využitie digitálnych dvojčiat a paralelných spoločností na sociálne výpočty zamerané na človeka je stále rozvíjajúcou sa výskumnou témou. Kľúčovým nedostatkom pozorovaným v súčasnom stave vývoja digitálnych dvojčiat je, že sa takmer výlučne zameriava na fyzické prostriedky kyber-fyzikálnych systémov a nie na ľudské obsluhy. V nadchádzajúcich rokoch môže čoraz ambicióznejší a sofistikovanejší priemysel a špecifické procesy tento nedostatok odstrániť vývojom na človeka zameraným digitálnym dvojčatom tzv. Human-Centric Digital Twin.

Avšak, ako sa často stáva, aj tento v odbornej obci populárny pojem sa občas zneužíva alebo zamieňa, či už ide o zámerne využívanie populárneho slova alebo o nedostatok vedomostí. V našej práci sa pokúsime presne zadefinovať a vymedziť pojmy a rozdiely medzi digitálnym dvojčatom, tieňom a modelom. Podrobnejšie si rozoberieme aj delenie

na komponenty, systémy a procesy. Následne predstavíme nové trendy v tejto oblasti, ako napríklad 5D digitálne dvojča, posúdime súčasný stav a technológie, ktoré sa využívajú. Nakoniec si vymedzíme ciele našej práce, ktorá vychádza z dvoch prípadových štúdií, na ktorých sme pracovali v minulosti a boli zamerané na digitálne dvojčatá a v závere predstavíme stanovené ciele dizertačnej práce a navrhnutú metodiku ich riešenia.

# 1 Súčasný stav v oblasti digitálnych dvojčiat

V tejto časti sa budeme zaoberať prácami zameranými na využitie digitálneho dvojčata najmä (ale nielen) vo výrobných a produkčných procesoch. Rešerš bol zameraný na práce využívajúce také technológie, ako sú digitálne dvojča, Unity, PLC, virtuálna realita/rozšírená realita a human-centric digitálne dvojča.

## 1.1 Aplikácie digitálneho dvojčata alebo digitálneho tieňa v robotických aplikáciách

V tomto článku [9] autori popisujú návrh digitálneho dvojčata určeného na programovanie robotickej bunky. Ako fyzický produkt bol použitý robot FANUC, pričom digitálny model, ktorý replikuje tohto fyzického robota, bol CAD súbor importovaný do herného engine Unity. Pomocou digitálneho dvojčata v kombinácii s virtuálnou realitou bolo možné zaznamenať zrkadlenie trajektórií medzi fyzickým a digitálnym robotom.

V práci [2] predstavujú metódu programovania robotov prostredníctvom virtuálnej reality a digitálnych dvojčiat. Virtuálne prostredie predstavuje digitálne dvojča robotické stanice, ktoré je vytvorené na základe CAD modelov. V rámci VR systému sa zaznamenávajú ľudské pohyby vo virtuálnom prostredí, ktoré následne skutočný robot reprodukuje. Táto metóda je určená na použitie v situáciách, kde je potrebné, aby robot replikoval ľudské pohyby pri vykonávaní komplexných úloh.

V rámci výskumu, ktorý je opísaný v článku [19], sa vyvíja model synchronizácie reálnych a virtuálnych priemyselných robotov. Projekt je realizovaný v hernom engine Unity a bude testovaný prostredníctvom virtuálnej reality a v priestoroch výrobných hál. Primárnym cieľom štúdie je vytvorenie univerzálnych riadiacich algoritmov vo VR, ktoré môžu byť jednoducho modifikované pre široký rozsah priemyselných zariadení. Výskum využíva digitálne dvojča priemyselného robota Motoman GP8, ktorého model bol vyvinutý s dôrazom na jednoduchú rozširiteľnosť na rôzne VR platformy a na ovládanie digitálnych dvojčiat rôznych priemyselných zariadení.

Štúdia [18] prezentuje výsledky experimentu, ktorý porovnáva použitie klasického fyzického ovládacieho panelu určeného na výučbu a rozhranie virtuálnej reality na ovládanie priemyselného robota. Práca s digitálnym dvojčatom umožňuje dva režimy – “pripojený“ a virtuálny. V “pripojenom“ režime sa všetky príkazy duplikujú a odosielajú fyzickému robotovi, čo zabezpečuje synchronizáciu medzi fyzickým a virtuálnym robotom. Vo virtuálnom režime nedochádza k žiadnej komunikácii a všetky akcie sa vykonávajú len v

simulácii. Projekt ponúka aj dva mechanizmy ovládania, kde používateľ môže buď priamo operovať s ramenom robota alebo uložiť viackrokový program na neskoršie vykonanie.

Článok [6] opisuje digitálnu obnovu laboratória kyberfyziky a inteligentnej robotiky, vrátane kľúčových prvkov pre šesťosové priemyselné roboty umožňujúce vykonávanie pohybov PTP, LIN a CIRC. Bolo tiež integrované rozhranie človek-stroj, ktoré umožňuje používateľom vytvárať programy s týmito typmi pohybov. Laboratórium má široké využitie v rámci školení alebo výučby bez nutnosti inštalácie, údržby alebo servisu. Výhodou je neobmedzená kapacita účastníkov, ktorí sa môžu vzdelávať paralelne. Na tvorbu laboratória boli využité programy Unreal Engine 4 a Blender.

## 1.2 Aplikácie digitálnych dvojčiat s použitím VR/AR

Článok [10] sa zaoberá využívaním technológie digitálnych dvojčiat v moderných výrobných podnikoch. Táto technológia umožňuje digitálnu virtualizáciu rôznych častí výrobného procesu, ktoré je možné riadiť pomocou systémov SCADA. V práci sa navrhuje využitie softvéru AVEVA Wonderware na implementáciu digitálnych dvojčiat s cieľom vytvoriť virtuálny obraz skutočného výrobného systému v počiatkovej fáze. Autori diskutujú o dôležitosti dodržiavania pravidiel a vzťahov počas celého životného cyklu výrob

Výskum popisovaný v článku [7] sa zameriava na využitie digitálneho dvojčata a virtuálnej reality na školenie operátorov v rámci Industry 4.0. Na prácu používajú VR model založený na frameworku RealVirtual.io, ktorý simuluje nastavenia továrne a umožňuje pracovníkom ovládať stroje a komunikovať s nimi. Výskum ukázal, že VR a digitálne dvojčata môžu byť efektívne pri školení, najmä pre starších pracovníkov, ktorí môžu mať problém prispôbiť sa novým technológiám. Model bol vylepšovaný na základe spätnej väzby od účastníkov, napríklad v oblasti používateľského rozhrania alebo inštrukcií k úlohám.

Článok [39] popisuje prípadovú štúdiu, v ktorej autori ukazujú metodiku vývoja nízkonákladového softvéru rozšírenej reality (AR) s bohatým obsahom, ktorý využíva proces syntézy tekutého mydla. Metodika pozostáva zo štyroch hlavných modulov: tvorba a zber údajov, integrácia, vývoj medzi platformami a digitálne aktíva. Na integráciu simulácií do AR a následné nasadenie výsledného produktu na mobilné platformy bol použitý herný engine Unity. Štúdia slúži ako návod pre menej skúsených vývojárov pri tvorbe výučbového obsahu.

Digitálne dvojča asistenčného systému, ktoré je založené na báze lasera a určené pre úlohy manuálnej montáže, je prezentované v článku [26]. Dvojča bolo vytvorené pomocou enginu Unity a implementované v rozšírenej realite za použitia Microsoft HoloLens.

Práca ukazuje využitie dvojčata na podporu plánovania, simulácie a školenia zamestnancov. Dvojča je pripojené k cloudu MindSphere a ovládané pomocou gest rúk a hlasu. Cieľom práce je podpora používania digitálnych dvojčiat pri plánovaní, simulácii a školení zamestnancov v oblasti výroby.

V práci [16] autori vyvinuli digitálne prostredie pomocou enginu Unity s cieľom poskytnúť komplexnejšie hodnotenie a vedomosti študentov. Popisujú digitálne učenie, ktoré je založené na hrách vo vzdelávaní a uvádzajú rozdelenie vzdelávacích cieľov. Práca tiež vysvetľuje vývoj herného prostredia a prezentuje výsledky hodnotenia od študentov. Z práce vyplýva, že skúška, ktorá je založená na hrách, môže byť vhodným doplnkom k bežným typom skúšok. Projekt je zameraný na postgraduálnych študentov inžinierstva, ktorí študujú témy z oblasti Priemyslu 4.0.

V článku [1] autori s využitím technológií RealVirtual.io, VR a IoT skúmajú nový prístup k vytvoreniu uzavretého reťazca inžinierskych procesov pre digitálnu továreň. Vyvinuli VR demonštrátor s použitím platformy CONTACT Elements for IoT, webového plánovača výrobných procesov a systému na riadenie výroby (MES) napísaného v jazyku Java. Zvolený prístup zahŕňa aj tvorbu digitálneho dvojčata výrobného procesu. Toto dvojča umožňuje analýzu chýb a neefektívnosti v reálnom čase a simuláciu zmien výrobných linky. Je dôležité zdôrazniť, že demonštrátor je len virtuálnou výrobnou linkou a nezaŕňa žiadnu fyzickú linku.

Ďalšia prípadová štúdia [36] popisuje systém rozšírenej reality, ktorý pristupuje k digitálnemu dvojčatu cez webové služby a zobrazuje informácie v reálnom čase. Architektúra systému obsahuje päť vrstiev: zariadenia, používateľské rozhrania, webové služby, dotazy a úložiská údajov. Štúdia predstavuje vizualizáciu procesu ropnej plošiny na mori, ktorá je súčasťou systému CPS. Aplikácia AR využíva rozpoznávanie obrazu na identifikáciu zariadení a zobrazovanie informácií na rôznych virtuálnych modeloch, pričom digitálne dvojča sa neustále aktualizuje v reálnom čase vďaka webovým službám.

### **1.3 Aplikácie použitia digitálneho dvojčata vo výrobných procesoch s použitím PLC**

Článok [48] opisuje digitálne dvojča, ktoré bolo vytvorené pre experimentálny montážny systém. Tento systém zahŕňa pásový dopravník a automatizovanú linku, ktorá kontroluje kvalitu výroby. 3D model digitálneho dvojčata bol vytvorený v CAD softvéri a importovaný do platformy Tecnomatix, aby bolo možné simulovať všetky procesy. Údaje z montážneho systému zbiera programovateľný logický regulátor, ktorý ich synchronizuje s modelom digitálneho dvojčata a platformou na báze cloudu prostredníctvom OPC servera.

Digitálne dvojčča umožňuje online optimalizáciu procesu montáže bez nutnosti zastavenia výrobnjej linky.

Testovacie prostredie v hernom engine Unity, ktoré je uvádzané do prevádzky pomocou PLC od spoločnosti Siemens, je predmetom práce [29]. V prostredí je simulovaný výrobný proces, a na základe jeho zmien sa mení program PLC. Článok podrobne opisuje vytvorenie dátovej štruktúry a komunikačného modulu na prepojenie simulácie s budúcim optimalizačným algoritmom. Ďalej sa uvádza vytvorenie monitorovacieho systému pre simuláciu a tiež funkčného systému na odosielanie údajov na server. Simulácia je monitorovaná a zaznamenáva všetky kolízie sledovaných prvkov. Autori v práci uvádzajú aj vytvorenie procesného programu pre PLC, prerobení simuláčny program v Unity a nový REST-API server s JSON dátovou štruktúrou.

Článok [17] sa zameriava na vytvorenie virtuálnych príručiek v masovej výrobe automobilového priemyslu. Vývojári vytvorili inštrukčný softvér, ktorý bol prepojený s PLC výrobným zariadením. Riešenie testovali počas troch mesiacov a zaznamenali napríklad zníženie času potrebného na zaškolenie nováčikov.

Článok [11] sa venuje využitiu digitálnych dvojčiat na podporu rozhodovania pri navrhovaní pracovísk a logistiky. Digitálne dvojčča bolo vyvinuté v engine Unity a simulačnom softvéri IPS a testované vo výrobnno-logistickom testovacom zariadení, ktoré zahrnovalo fyzické zariadenia, IoT infraštruktúru a simulačný softvér. Z fyzického prostredia sa v testovacom zariadení nachádzali rôzne prístroje vrátane zariadenia virtuálnej reality (VR), automatizovaného riadeného vozidla (AGV), systému videnia, kolaboratívneho robota, prepravných regálov, materiálu na kompletizáciu, senzorov lokalizačného systému, dverí, výtahu a infraštruktúry pripojenia vrátane smerovačov. Výsledky práce naznačujú, že simulačný model a digitálne dvojčča sa musia prispôbiť konkrétnemu kontextu. Testy a experimenty ukázali možnosti, ako môže prebiehať postupný prechod na digitalizovanú logistiku, čo umožňuje spoločnostiam experimentovať s rôznymi technológiami a nájsť vhodnú úroveň automatizácie podľa špecifických potrieb.

V [40] navrhujú nový typ architektúry pre digitálne dvojččatá. Táto architektúra využíva lokálne dvojččatá produktov a zdrojov na vytvorenie systémových dvojčiat vyššej úrovne. Architektúra tiež zahŕňa fyzickú entitu, komunikačnú vrstvu a virtuálne prostredie. Ako fyzická entita je použitý model továrne od spoločnosti Fischertechnik so senzormi, ktoré dokážu zachytávať údaje o zdrojoch z továrne v reálnom čase. Komunikačná vrstva využíva mikroprocesor Arduino Mega 2560 na prenos údajov medzi fyzickou entitou a virtuálnym prostredím, kde databáza v reálnom čase vytvára digitálny tieň. Výsledkom štúdie bolo, že PLC je nevyhnutnou súčasťou implementácie digitálneho dvojččaťa, pričom

sa jej v súčasnosti nevenuje dostatočná pozornosť vo výskumnej oblasti. Ďalší výskum by sa mal zamerať na prepojenia medzi PLC a digitálnymi dvojčatami, vrátane použitia bezdrôtového pripojenia.

Technológia digitálnych dvojčiat v komerčnej fáze výroby automobilovej výrobnéj linky bola predstavená v štúdiu [27]. Štúdia zistila zvýšenie efektivity výrobnéj linky o 6.01% a zníženie prestojov o 87.56% vďaka používaniu technológie digitálnych dvojčiat. Na zber, prenos, ukladanie a vyhodnocovanie dát autori použili rôzne typy senzorov a softvérov, vrátane enginu Unity. Štúdia poukazuje na veľký potenciál digitálnych dvojčiat v automobilovej výrobe s možnosťami zlepšenia prostredníctvom využitia spolupráce digitálnych dvojčiat s umelej inteligencie.

Článok [15] poukazuje na možnosť trojkrovového návrhu riešenia digitálnych dvojčiat pre optimalizáciu výrobných liniek. Toto riešenie pozostáva z: vytvorenia simulačného modelu na napodobnenie správania v reálnom svete, použitia automatizačného inžinierstva na komunikáciu medzi fyzickým svetom a virtuálnym modelom a integrácie simulácie a automatizácie na realizáciu digitálneho dvojčaťa. Na komunikáciu medzi simulačným modelom a reálnym svetom sa používa kód PLC. Autori v prílohe spomínajú štúdiu, v ktorej bol skúmaný prístup použitý pri optimalizácii smerovania automaticky riadených vozidiel vo výrobnéj linke pre závod na montáž batérií. Riešenie digitálneho dvojčaťa sa používa na overenie rozloženia a optimalizáciu priechodnosti materiálu a ako vyhodnotenie účinnosti automatizačných technológií bez toho, aby sa narušila výroba.

Nedostatok experimentálnych zariadení na školách spolu so zlepšením aktuálne využívanými metódami výučby PLC rieši práca [44]. Zlepšenie vidia napríklad v nástrojoch na 3D modelovanie a následnom vytvorení interaktívnych animácií, ktoré by ukazovali základné programovanie PLC. Program je vytvorený pomocou enginu Unity, slúži ako simulačná platforma pre výučbu a je určený pre Windows. Aplikácia umožňuje používateľom napríklad používanie PLC na ukladanie riadiacich stratégií v reálnom čase na objekty vo virtuálnom prostredí. Aplikácia používa na testovanie PLC S7-300 a komunikuje cez protokoly PROFINET a TCP/IP.

## 1.4 Nevýrobné aplikácie digitálneho dvojčaťa

V práci [43] autori predstavujú experimentálny model 3D virtuálnych semaforov v Unity. V práci sa realizuje funkcia virtuálneho PLC (PLCSIM) spolu s 3D virtuálnym modelom do komunikácie prebiehajúcej v reálnom čase. Na prenos dát bol použitý jazyk C#. Realistickosť 3D modelu je zabezpečená ukazovaním reálnych stavov, čo je vhodná metóda na vývoj 3D virtuálnych experimentov alebo šetrenie peňazí.

Vývoj inteligentného frameworku založeného na technológii digitálnych dvojčiat určeného na analýzu správania vozidiel je predstavený v práci [21]. Framework využíva pre detekciu vozidiel technológiu hlbokého učenia a pre ich sledovanie Kalmanov filter spolu s porovnávaním znakov. Vozidlá sú následne mapované do virtuálnej scény digitálneho dvojčata vytvorenej v Unity, kde sa testuje ich správanie podľa špecifikovaných podmienok detekcie. Údaje o správaní vozidiel môžu byť využité napríklad na rekonštrukciu scény a následnú analýzu. Napriek tomu, že framework úspešne deteguje široké spektrum atypického správania vozidiel, v práci sú uvedené aj obmedzenia, napríklad v dôsledku vzdialenosti kamery, malého počtu vzoriek a podobne.

Štúdia [45] predstavuje prispôsobený adaptívny tempomat (P-ACC) s cieľom ukázať účinnosť navrhovanej simulácie digitálneho dvojčata. Simulácia umožňuje prispôbiť systém ACC potrebám každého vodiča vďaka využitiu cloud computingu. Architektúra pozostáva z dvoch vrstiev: spodná vrstva predstavuje fyzický svet obsahujúci simulované objekty reálneho sveta, zatiaľ čo horná vrstva predstavuje digitálny svet so troma podvrstvami: hernými objektmi Unity, skriptovacím aplikačným programovateľným rozhraním (API) Unity a externými nástrojmi. Štúdia ukazuje, že simulácia je účinná, keďže splňuje ciele prispôbiť tempomat špecifickým potrebám vodičov pomocou cloud computingu. Plánované je aj ďalšie rozšírenie simulácie digitálneho dvojčata, a to integráciou s robotickým operačným systémom (ROS) a realistickými modelmi bezdrôtovej komunikácie, aby sa ďalej zlepšila vernosť simulácie.

Vývoj digitálneho dvojčata pre simuláciu 3D kompenzovaného mostíka v reálnom čase je predstavený v práci [34]. Mostík je umiestnený na plavidle slúžiacom na servis veterných fariem. Simulácia prebieha v engine Unity a je prepojená s riadiacim systémom. Testy preukázali, že simulácia bežiaca na samostatnom vlákne s časom kroku 5  $\mu$ s a latenciou 10 ms je vhodná na testovanie hardvéru. Simulácie tiež umožňujú testovanie a implementáciu 3D kompenzačného riadiaceho systému ako aj testovanie a ladenie systému tlakovej spätnej väzby. Použitie herného enginu na simuláciu hydraulického systému takmer v reálnom čase je nový prístup, ktorý umožňuje vytvárať realistické simulácie a zahrnúť spätnú väzbu z hodnôt hydraulických senzorov.

## **1.5 Aplikácie digitálnych dvojčiat s výučbovými modelmi od spoločnosti Fischertechnik**

Framework na tvorbu inteligentných digitálnych dvojčiat v kontexte internetu digitálnych dvojčiat (IoDT) a preniknutia princípov Industry 4.0 a 5.0 je predstavený v článkoch [20, 23]. Práca navrhuje referenčný model digitálneho dvojčata, ktorý je zosúladený s In-

dustry 4.0, avšak má zapracované aj ciele prichádzajúce s Industry 5.0, a zároveň ukazuje, ako je možné inteligentné digitálne dvojčata realizovať s vlastnosťami typickými pre multi-agentné systémy. Práca prezentuje aj návrh architektúry pre inteligentné digitálne dvojča, ktorý koordinuje výrobné procesy orientované na trh. Tento návrh je testovaný prostredníctvom prototypovej implementácie a overenia konceptu pomocou tréningovej továrne Fischertechnik Industry 4.0.

Táto bakalárska práca [35] sa sústreďuje na analýzu simulačného modelu Fischertechnik 4.0 Training Factory pre Industry 4.0. Model rozvíja digitálne dvojča vytvorené pomocou softvéru Plant Simulation od spoločnosti Siemens. Na analýzu sú vytvorené dva scenáre, jeden ukazujúci počiatočnú fázu a druhý budúcu. V modeli je použitý jazyk C++, ktorý umožňuje aj ďalšie rozšírenia v kontexte Industry 4.0, avšak tie z dôvodu nedostatku skúseností neboli implementované. Softvér Siemens Tecnomatix sa analyzuje prostredníctvom scenárov a na uľahčenie používania oboch nástrojov sú vytvorené dve príručky.

V diplomovej práci [3] sa napríklad venovali vývoju digitálneho dvojčata Industry 4.0 linky od spoločnosti Fischertechnik. Na vytvorenie dvojčata bolo nutné vytvoriť CAD model linky, ktorý bol vytvorený v programe Siemens NX. Bolo tiež nutné definovať potrebné atribúty, ako sú stupne voľnosti a rýchlosť, a pomocou virtuálneho PLC linku uviesť do prevádzky.

V bakalárskej práci [41] autori skúmajú digitálne dvojčata v troch fázach životného cyklu, ktorými sú dizajn produktu, produkcia produktu a servis. V práci tvrdia, že digitálne dvojčata prinášajú najväčší benefit, keď sú využívané počas všetkých fáz životného cyklu produktu.

## 1.6 Práce zamerané na HCDT

Článok [25] prezentuje vývoj HCDT pre operátora vo výrobe, kde je ukázaná mobilná alebo počítačová aplikácia prijímajúca dáta zo strojov vo výrobe. Tieto dáta umožňujú operátorovi vyhodnocovať a pracovať so strojom. Problémom v tvrdení, že ide o HCDT, je absencia 3D/2D modelu stroja a chýbajúca obojstranná komunikácia, pri ktorej by sa dvojča a stroj vzájomne ovplyvňovali.

Podobná nesprávna klasifikácia sa objavuje aj v článku [47] o medicínskom digitálnom dvojčati človeka rozšírenom do podoby HCDT. Tu je digitálne dvojča opísané ako virtuálna replika človeka, obsahujúca zdravotné záznamy a model založený na umelej inteligencii. Keďže tu tiež neprebíha žiadny typ komunikácie, nejedná sa o digitálne dvojča, ale len o digitálny model.

Článok [46] poskytuje prehľad o využívaní digitálnych dvojčiat a rozšírenej reality (AR), zdôrazňujúc ich potenciál zlepšiť výkon v priemyselných systémoch. Avšak autor upozorňuje na nedostatky v existujúcich štúdiách, ako je nedostatočná komplexnosť alebo zameranie sa len na jednotlivé aspekty. Ďalej identifikuje štyri možné smerovania vývoja, vrátane zamerania na ľudský faktor s cieľom dosiahnuť vyššiu úroveň kognitívnych schopností a harmonizovať vzťah medzi človekom a robotom v rámci ľudsky-centrovanej priemyselnej transformácie.

V práci [24] sa skúma prístup k výrobe zameranej na človeka, ktorý je charakteristický pre koncept Industry 5.0. Zdôrazňuje sa potreba zmeny paradigmy od strojovo-centrovanej k ľudsky-centrovanej výrobe. Autori predstavujú kľúčové potreby, koncepty, motivácie, ako aj technológie a výzvy spojené s ľudsky-centrovanou výrobou. Zvlášť sa venujú analýze hierarchie ľudských potrieb v priemyselnom prostredí, poukazujúc na to, že pre plné dosiahnutie tohto prístupu je potrebný ďalší výskum.

## 1.7 Sumarizácia súčasného stavu

Rýchlosť rozvoja a rozsah využitia digitálnych dvojčiat každým rokom narastá, pričom sa odhaduje, že do roku 2026 vzrastie obchod s digitálnymi dvojčatami až o 40% [12]. Napriek tomu táto oblasť digitalizácie stále čelí výzvam. Jednou z nich, ktorá je podstatná pre našu prácu, je stále len začínajúca oblasť digitálneho dvojčata zameraného na človeka (HCDDT). Ako sme videli v tejto kapitole, popularita digitálnych dvojčiat stále rastie a presadzuje sa takmer v každom odvetví. Avšak napriek rastúcemu povedomiu o tomto pojme je jeho použitie často nepresné. Mnohé práce a štúdie opisujú svoje projekty ako digitálne dvojčatá, ale často ide len o simulácie, modely alebo tienenie. To môže byť z dôvodu nedostatočného naštudovania problematiky digitálnych dvojčiat alebo zámerne vyžívanie aktuálne populárneho výrazu v oblasti Industry 4.0. Podobne je to aj s verziou HCDDT, ktorá je v súčasnosti stále prevažne na teoretickej úrovni alebo sa realizujú len pilotné projekty. V našej práci sa chceme zamerať na vývoj digitálneho dvojčata podľa platných definícií, či už ide o model, komunikáciu alebo použité technológie v rámci HCDDT. Naším cieľom je tiež dosiahnuť čo najlepšiu presnosť a synchronizáciu, čo by mali zabezpečiť CAD modely, ktoré, ako sme spomenuli, sú často využívané.

Hoci digitálne dvojčatá strojov našli široké využitie v priemysle, využitie digitálnych dvojčiat a paralelných spoločností na sociálne výpočty zamerané na človeka je stále rozvíjajúcou sa výskumnou témou. Kľúčovým nedostatkom pozorovaným v súčasnom stave vývoja digitálnych dvojčiat je, že sa takmer výlučne zameriava na fyzické prostriedky CPS a nie na ľudské obsluhy. V nadchádzajúcich rokoch môže čoraz ambicióznejší a sofis-

tikovanejší priemysel a špecifické procesy digitálnych dvojčiat tento nedostatok odstrániť vývojom na človeka zameraným digitálnym dvojčatom.

## 2 Konceptný návrh riešenia

Na začiatku je nutne opísať, akým spôsobom bude fungovať naša aplikácia a všetky prepojenia, ktoré bude obsahovať.

Náš projekt bude mať dve hlavné strany: jednu fyzickú, zabezpečenú PLC zariadením a multifunkčným modelom pece, a druhú, ktorá bude aplikácia v tablete obsahujúca digitálne dvojča. Cieľom projektu je zabezpečiť hladkú a flexibilnú komunikáciu medzi týmito dvoma stránkami. Fyzická strana bude zahŕňať PLC zariadenie pripojené k peci, prostredníctvom ktorého bude možné pec naprogramovať a ovládať. Na druhej strane bude naša aplikácia v tablete, ktorá bude obsahovať digitálne dvojča.

Náš projekt neplánuje pracovať len s klasickým digitálnym dvojčatom. V našom prípade budeme vyvíjať digitálne dvojča zamerané na človeka. To znamená, že okrem štandardných funkcií, ako je vzájomné ovplyvňovanie medzi fyzickým a digitálnym dvojčatom, sa budeme snažiť, aby naše dvojča bolo čo najviac užívateľsky priateľné a obsahovalo potrebnú funkcionálnosť spolu s konkrétnymi technológiami. Medzi tieto technológie patrí napríklad:

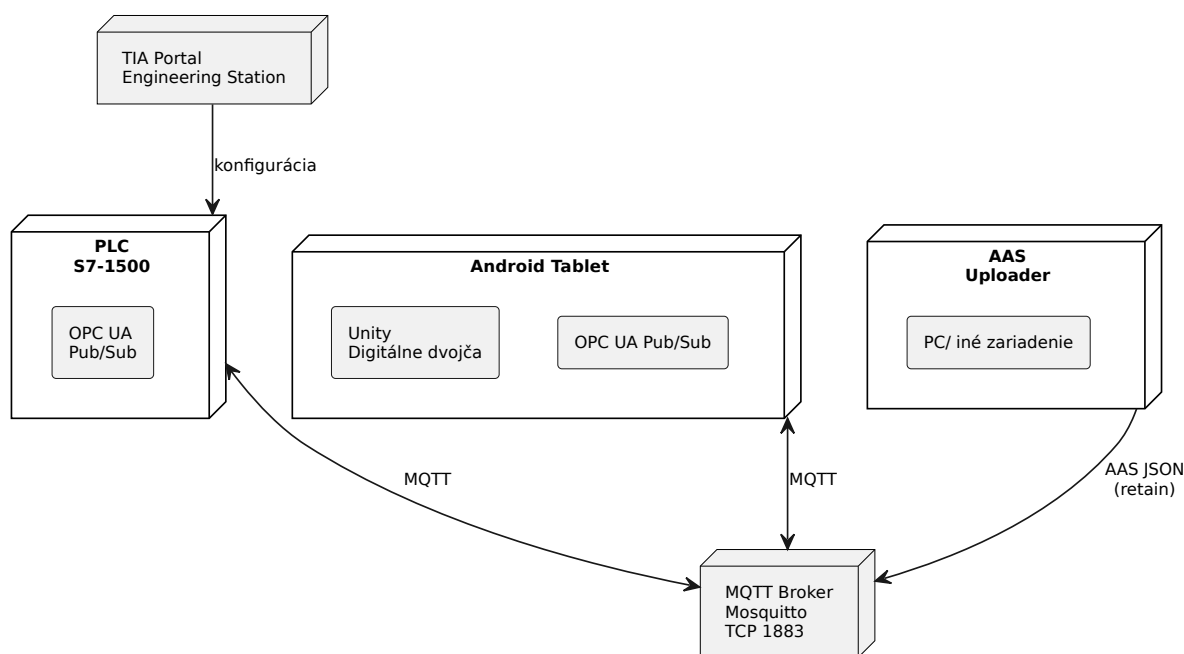
1. Využitie AR
2. Využitie 3D engineu
3. Haptická odozva pri stlačení tlačidla/ komponentu modelu v AR
4. Priame vstupy pomocou ovládacej aplikácie na Tablete a ďalšie

Na prepojenie medzi PLC a aplikáciou použijeme komunikačný protokol **OPC UA PubSub**. Obe strany tejto komunikácie môžu fungovať ako subscriber aj publisher, aby mohli dáta posielat aj prijímať podľa potreby. Na zabezpečenie komunikácie zo vzdialenejších zariadení využijeme MQTT broker, ktorý bude slúžiť ako centralizované riadenie komunikácie. Tento softvér bude slúžiť ako prostredník, na ktorý sa obe strany pripoja a budú z neho prijímať alebo posielat dáta podľa potreby. S cieľom dosiahnuť interoperabilitu aplikácie využijeme štandardy **OPC UA PubSub**. Tento komunikačný protokol zabezpečuje, že správy budú posielané na broker v konkrétnej forme a obsahovať hodnoty v predpísaných dátových typoch.

Ďalšou technológiou, ktorú využijeme, je Asset Administration Shell (AAS). AAS je štruktúrovaný, štandardizovaný zápis aktív, ktorými sú napríklad komponenty digitálneho dvojčata alebo prvky užívateľského rozhrania. Vďaka AAS budeme môcť zapisovať konkrétne prvky z grafického užívateľského rozhrania spolu s ich hodnotami. Tento zápis

uľahčuje komunikáciu medzi rôznymi zariadeniami a aplikáciami tým, že definuje, aké riadiace veličiny (tagy) sú k dispozícii. AAS tiež prispieva k modularite užívateľského rozhrania, pretože za normálnych okolností by boli tieto hodnoty uložené priamo v aplikácii bez možnosti ich meniť. Pomocou AAS budú tieto hodnoty uložené ako textový súbor s možnosťou zmeny externe, keďže prvky grafického rozhrania nebudú uložené priamo v aplikácii, ale ako JSON súbor. Tento formát umožňuje používateľovi pridávať nové tlačidlá alebo meniť hodnoty, ktoré sa následne odosielaajú na broker a odtiaľ do PLC zariadenia. AAS bude mať na brokeri samostatnú tému, odkiaľ bude môcť byť poslaný z akéhokoľvek zariadenia, ktoré má na broker prístup.

### Architektúra digitálneho dvojčata



Obr. 1: Architektúra systému digitálneho dvojčata

## 2.1 Funkcionálne a nefunkcionálne požiadavky

V tejto kapitole si prejdeme aké funkcionálne a nefunkcionálne požiadavky spĺňa respektíve by mala spĺňať naša aplikácia.

### Funkcionálne požiadavky

1. Aplikácia musí umožniť pripojenie k brokeru na základe zadanej IP adresy.
2. Aplikácia musí umožniť načítanie užívateľského rozhrania, ak je k dispozícii.
3. Aplikácia musí zabezpečovať obojsmernú komunikáciu s fyzickým náprotivkom.

4. Aplikácia musí zobrazovať plne funkčné a ovládateľné digitálne dvojča.
5. Aplikácia musí umožniť nastavenie hierarchie riadenia medzi fyzickým a digitálnym dvojčatom.
6. Aplikácia musí umožňovať prepínanie medzi jednotlivými scénami.
7. Aplikácia v AR scéne musí umožňovať zobrazenie a odstránenie modelu na horizontálnych plochách.
8. Aplikácia v AR scéne musí umožňovať interakciu s konkrétnymi časťami modelu.
9. Aplikácia v simulačnej scéne musí umožniť prácu s modelom aj bez prístupu na internet.

### **Nefunkcionálne požiadavky**

1. Pri strate spojenia musí systém zabezpečiť automatické opätovné pripojenie subscibera k MQTT brokeru v krátkom časovom intervale (rádovo stovky milisekúnd).
2. Stavové informácie Asset Administration Shell (AAS) musia zostať dostupné aj po dočasnom odpojení od MQTT brokera.
3. Systém musí podporovať prevádzku v režime master/slave.
4. Systém musí umožňovať pripojenie k ľubovoľnému MQTT brokeru prostredníctvom IP adresy bez nutnosti úpravy aplikačného kódu.
5. Stavové informácie AAS musia byť publikované na samostatnom, jednoznačne definovanom MQTT topicu.

## 3 Použité technológie

V tejto sekcii našej práce sa oboznámime s technológiami, ktoré boli v projekte použité. Technológie budú zoradené od hardvérových, ako je napríklad PLC zariadenie a model pece od spoločnosti Fischertechnik, až po softvérové nástroje, medzi ktoré patria program TIA Portal, broker softvér Mosquitto a ďalšie použité aplikácie. Samostatnú pozornosť venujeme protokolu OPC UA, ktorý tvorí základ komunikačnej časti nášho riešenia.

### 3.1 Riadiaci systém PLC S7-1500 a výukové zariadenie Multi Processing Oven

Ako fyzická predloha nášho digitálneho dvojčata bude slúžiť model multifunkčnej pece od spoločnosti Fischertechnik, ktorý je ovládaný zariadením PLC S7-1500. V nasledujúcich podkapitolách dôvody ich výberu.

#### 3.1.1 PLC S7 - 1500

Ako riadiaca jednotka nášho zariadenia bude slúžiť výkonný programovateľný logický automat Siemens PLC S7-1500. Doteraz sme pracovali najmä s nižšou radou PLC zariadení, konkrétne so sériou S7-1200, ktorá bola plne postačujúca na základné riadenie modelových liniek tejto úrovne. Aj v tomto prípade by pre samotné ovládanie modelu postačovalo zariadenie PLC S7-1200.

V našej práci sme však výber riadiacej jednotky prispôbili požiadavke na podporu komunikačného protokolu OPC UA PubSub. Práve séria S7-1500 poskytuje robustnú a plnohodnotnú implementáciu tohto protokolu. Ako ukážeme v ďalších kapitolách, jeho integrácia do PLC je veľmi jednoduchá a umožňuje bezproblémové zaradenie PubSub komunikácie do už naprogramovaného riadiaceho procesu [37].

#### 3.1.2 Výukové zariadenie Multi Processing Oven od spoločnosti Fischertechnik

Ako fyzická predloha digitálneho dvojčata nám poslúži model viacúčelovej pece od spoločnosti Fischertechnik. Pec je napájaná 24 V zdrojom, obsahuje kompresor pre vákuovú manipuláciu s tovarom a pozostáva z nasledujúcich komponentov:

1. Pec s manipulačnou platformou
2. Vákuový gripper na prenos tovaru
3. Otočný stôl s piestom

4. Píla
5. Dopravný pás.

Medzi kompresorom ovládané prvky patria:

1. Pneumaticky ovládané dvere pece
2. Vrchná časť grippera
3. Piest na otočnom stole.

Prúdová spotreba pece je 1,6 A. Model obsahuje 9 vstupov a 14 výstupov na úrovni 24 V. Okrem toho je pec ovládaná piatimi DC motormi, siedmimi tlačidlami určenými na obmedzenie pohybu platformy, otočného stola a grippera a taktiež využíva dve svetelné brány [8].

### **3.1.3 TIA Portal**

TIA Portal je softvérový nástroj od spoločnosti Siemens, určený na programovanie a automatizáciu priemyselných zariadení. Umožňuje vývoj, konfiguráciu a správu riadiacich jednotiek PLC, zariadení HMI a ďalších komponentov automatizačných systémov. Pri vývoji je možné voliť medzi rôznymi typmi programovacích jazykov, ako sú napríklad ladder logic, funkčné bloky alebo štruktúrovaný text.

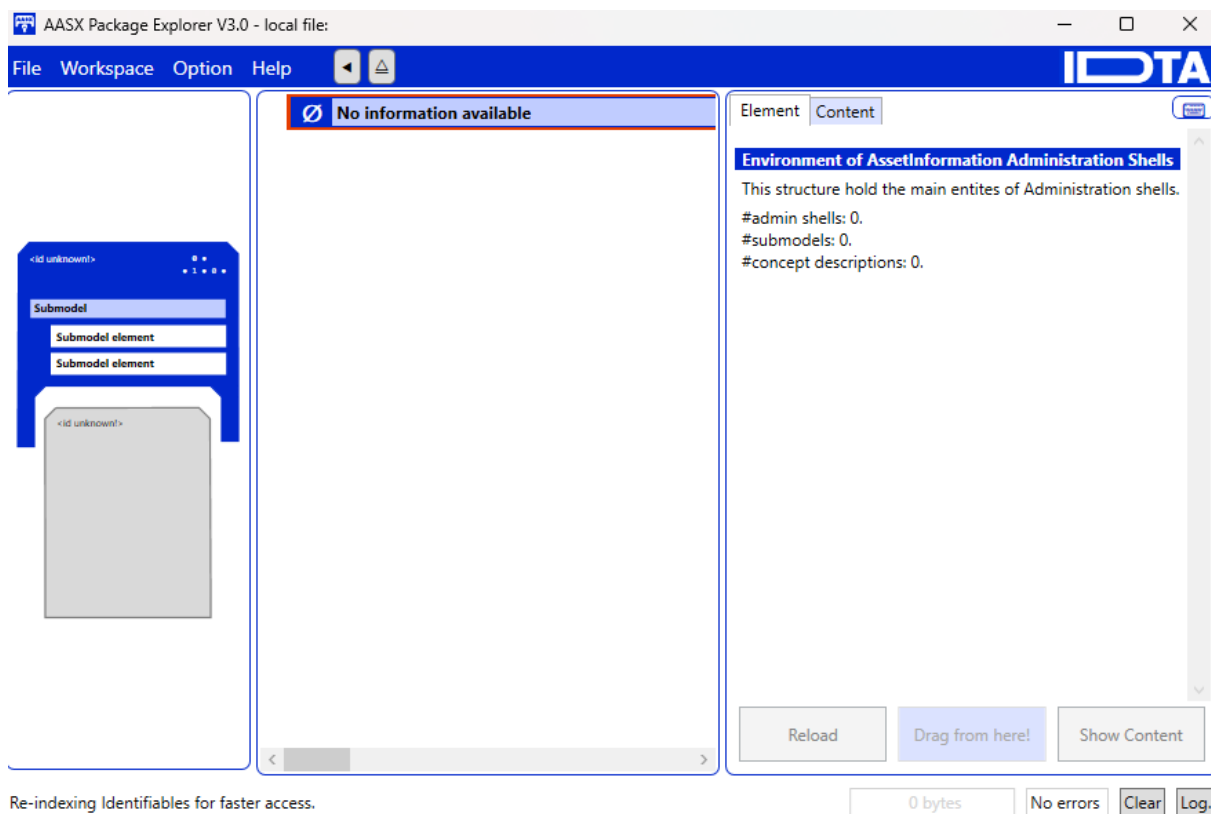
Rovnako ako v našich predchádzajúcich projektoch, aj v tejto práci používame softvér TIA Portal. Okrem klasických úloh, ako je programovanie riadiacej logiky pre model, ho tentokrát využijeme aj na náročnejšie činnosti. Konkrétne zabezpečíme komunikáciu OPC UA PubSub, ktorú riadiaca jednotka PLC S7-1500 plne podporuje [22].

## **3.2 CoDeSys a UA Expert**

Na začiatku našej práce budeme pracovať s programom CoDeSys, aby sme overili funkčnosť základnej PubSub komunikácie. CoDeSys je hardvérovovo nezávislý vývojový nástroj určený na programovanie PLC zariadení. Na rozdiel od softvéru TIA Portal je možné s ním programovať aj PLC iných značiek než len Siemens. Pre nás je však kľúčová jeho funkcia vytvorenia soft PLC, respektíve virtuálneho PLC, spolu s OPC UA serverom, na ktorom sa nachádzajú hodnoty tagov zo soft PLC. Aby sme mohli tieto hodnoty čítať a overiť, že server funguje správne, použijeme softvér UA Expert, ktorý umožňuje pripojenie k serveru a poskytuje aj užívateľské rozhranie [42] [28].

### 3.3 Asset Administration Shell

Asset Administration Shell slúži ako štandardizovaná digitálna reprezentácia aktíva, pričom jeho základným cieľom je zabezpečiť interoperabilitu komponentov v rámci Industry 4.0. V našom prípade môže byť AAS samotné digitálne dvojča, fyzický komponent alebo komponenty používateľského rozhrania, na ktoré sa konkrétne zameriame. AAS je kombinácia aktíva a jeho digitálnej reprezentácie na rôznych úrovniach hierarchie. My sa budeme snažiť využiť AAS na vytvorenie reprezentácie tlačidiel, aby bolo možné ich do aplikácie vkladať modulárne, teda bez pevne stanovených pozícií a bez pevného počtu spolu s príslušnou funkcionalitou. Všetky informácie o tlačidlách by mali byť definované v AAS a následne implementované do používateľského rozhrania v aplikácii. Na tvorbu AAS sme použili softvér AASX Package Explorer (obr.2), ktorý slúži na tvorbu, prezeranie a upravu AAS balíkov [30] [4].



Obr. 2: Uživatelské rozhranie AAS Package Explorer

### 3.4 OPC UA

Pred samotnou definíciou OPC UA je potrebné stručne sa zmieniť o technológii OPC Classic. OPC Classic predstavuje súbor špecifikácií založených na technológiách systému

Microsoft Windows, ktoré slúžili na výmenu údajov medzi softvérovými komponentmi. Hoci bola táto technológia dlhodobo používaná, s postupným vývojom komunikačných a informačných technológií vznikla potreba modernizovať aj samotné OPC špecifikácie. Z tohto dôvodu bola v roku 2008 organizáciou OPC Foundation predstavená nová generácia štandardu – OPC UA.

OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture) je servisne orientovaný, platformovo nezávislý protokol, ktorý zjednocuje funkcionality viacerých pôvodných špecifikácií OPC Classic do jedného spoločného rámca.

Zatiaľ čo v OPC Classic má každá špecifikácia svoj vlastný štandard bez priamej vzájomnej väzby alebo kompatibility, OPC UA poskytuje jednotný, zabezpečený a multipatformový rámec. V OPC UA nezáleží na konkrétnej štruktúre prijatých dát, pretože služby sú navrhnuté tak, aby boli oddelené od informačných modelov. Vďaka tejto abstrakcii je možné dáta čítať, zapisovať a prehliadať bez potreby dopĺňania ďalších špecifických rozhraní alebo protokolov pre rôzne typy zariadení [33].

### **3.4.1 Komunikačné rozhranie digitálneho dvojčata**

Aby mohol model pece komunikovať prostredníctvom PLC so svojim digitálnym dvojčatom, bolo potrebné zvoliť vhodný komunikačný protokol. V rámci nášho projektu sme sa rozhodli použiť komunikáciu založenú na princípe publish–subscribe (PubSub). Architektúry, ako je klient–server alebo PubSub, patria dnes medzi bežne využívané komunikačné modely v priemyselných aj informačných systémoch.

V našej práci však nebudeme implementovať iba všeobecný model typu publisher/subscriber, ale jeho priemyselnú nadstavbu definovanú štandardom OPC UA. Keďže komunikujeme so zariadením PLC, je potrebné zabezpečiť interoperabilitu, robustnosť a jednoznačnú definíciu prenosovej dátovej štruktúry. Z tohto dôvodu sa zameriame na implementáciu OPC UA PubSub, ktorý kombinuje výhody PubSub modelu s požiadavkami priemyselnej komunikácie, ako sú štandardizované formáty správ alebo spoľahlivá integrácia rôznych systémov.

Aké požiadavky musí spĺňať PubSub komunikácia, aby mohla byť považovaná za OPC UA PubSub si opíšeme v nasledujúcej kapitole.

### **3.4.2 OPC UA PubSub**

V modeli PubSub máme prvok publishera, teda odosielača, ktorý má definovaný dataset. Tento dataset obsahuje napríklad premenné, ktorých hodnoty sa odosielajú vo forme správ ako napríklad DataSetMessages alebo NetworkMessages. Tieto správy obsahujú aktuálny stav premenných a sú odosielané buď v momente, keď dôjde k ich zmene,

alebo podľa konfigurovaného publikačného režimu, napríklad v cyklických intervaloch. Dáta sú následne distribuované priamo po sieti, alebo prostredníctvom sprostredkovateľa (middleware). Subscriber si z prijatých správ vyberie tie údaje, ktoré sú pre jeho účely relevantné.

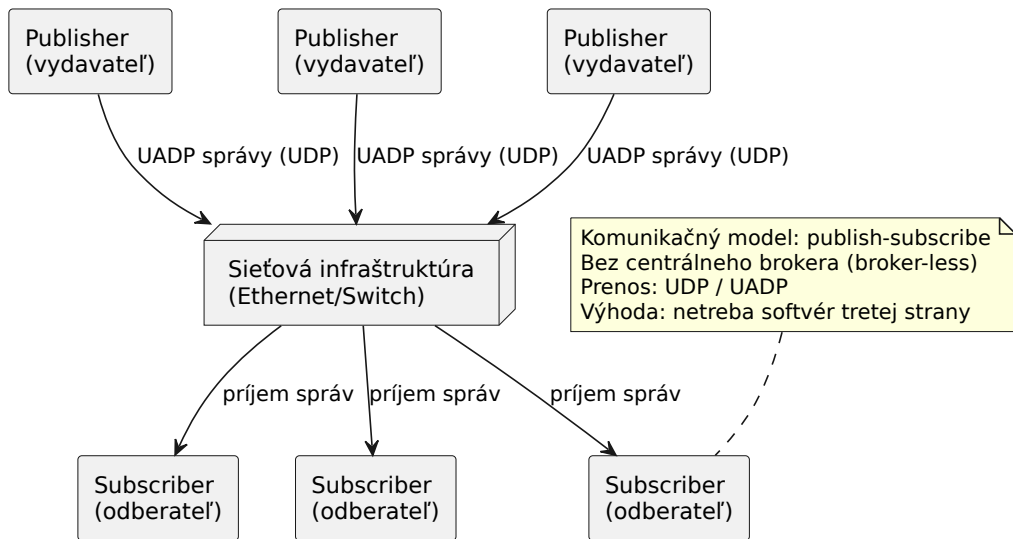
Aby sme pochopili rozdiel medzi jednotlivými prístupmi, je potrebné si ich najprv stručne vysvetliť. Na začiatku PubSub komunikácie vystupuje publisher, ktorý publikuje dáta. Tieto dáta sú odosielané na tzv. middleware, ku ktorému sa môže pripojiť jeden, ale aj viaceró subscriberov. Tí si následne vyberajú len tie údaje, ktoré sú pre nich relevantné, bez potreby ich potvrdzovania alebo spätnej väzby publisherovi. Špecifikácia OPC UA PubSub nedefinuje konkrétnu podobu tohto prostredníka, definuje však dva možné spôsoby jeho realizácie a to s brokerom alebo bez brokera.

Prvý spôsob, tzv. bezbrokerový variant, sa spolieha na sieťovú infraštruktúru, ako sú smerovače, switche a podobne (obr.3). Tento prístup využíva kombináciu transportného protokolu UDP a formátu správ UADP. Keďže nevyžaduje žiadne externé brokerové aplikácie, komunikuje priamo v rámci siete a umožňuje dosahovať nízku latenciu.

Druhým prístupom je využitie brokera ako sprostredkovateľa pri odosielaní a prijímaní dát (obr. 4). Broker môže byť umiestnený v cloude alebo na akomkoľvek zariadení dostupnom v sieti. Publisher aj subscriber potom komunikujú prostredníctvom protokolu, akým je napríklad protokol MQTT. MQTT je ľahký aplikačný protokol, ktorý je nenáročný na pamäť aj hardvérové zdroje, je otvorený na používanie a podporuje asynchrónnu komunikáciu, čo znamená, že zariadenia nemusia čakať na odpoveď ani byť neustále pripojené. Medzi výhody tohto riešenia patrí jednoduchý prístup z rôznych zariadení, možnosť pripojenia veľkého množstva publisherov aj subscriberov a flexibilita pri rozširovaní systému [13].

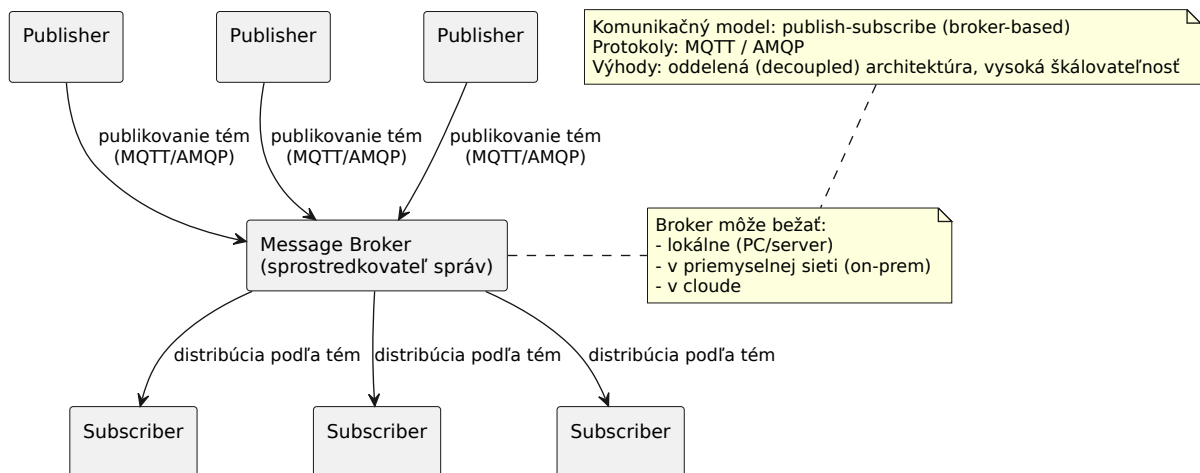
**Formát správ** v OPC UA PubSub je jedným z ukazovateľov, či komunikácia prebieha v štandarde OPC UA alebo nie. OPC UA jasne definuje, čo by mala odosielaná správa obsahovať, respektíve ako by mala vyzeráť. Formát správy, ktorý budeme využívať sa nazýva **NetworkMessage** s **JsonDataSetMessage** a jeho obsah môžeme vidieť v tabulke 1. **JsonDataSetMessage** sa nachádza vo vnútri poľa messages a taktiež má svoj konkrétny formát a povinne súčasti. Všetky náležitosti tohoto formátu môžeme vidieť v tabulke (2)[31].

### OPC UA PubSub - základný princíp (bez brokera)



Obr. 3: OPC UA PubSub bez brokera

### OPC UA PubSub - model s brokerom (MQTT/AMQP)



Obr. 4: OPC UA PubSub s brokerom

Názov	Typ	Popis
MessageId	String	Globálny jedinečný identifikátor správy. Táto hodnota je povinná.
MessageType	String	Táto hodnota musí byť „ua-data“. Táto hodnota je povinná.
PublisherId	String	Jedinečný identifikátor vydavateľa. Identifikuje zdroj správy. Táto hodnota je voliteľná.
DataSetClassId	String	DataSetClassId asociované s DataSets v NetworkMessage. Táto hodnota je voliteľná.
Messages	*	JSON pole JSON DataSetMessages. Táto hodnota je povinná.

Tabuľka 1: Forma NetworkMessage [31]

Názov	Typ	Popis
DataSetWriterId	String	Identifikátor pre DataSetWriter, ktorý vytvoril DataSetMessage. Táto hodnota je povinná. Je jedinečná v rámci rozsahu Publisher.
SequenceNumber	UInt32	Prísne monotónne rastúce poradové číslo pridelené DataSetMessage pomocou DataSetWriter. Táto hodnota je voliteľná. Prítomnosť hodnoty závisí od nastavenia v JsonDataSetMessageContentMask.
MetaDataVersion	ConfigurationVersionDataType	Verzia DataSetMetaData, ktorá opisuje obsah Payload. Táto hodnota je voliteľná. Prítomnosť hodnoty závisí od nastavenia v JsonDataSetMessageContentMask.
Timestamp	DateTime	Časové označenie, ktoré sa vzťahuje na všetky hodnoty obsiahnuté v DataSetMessage. Táto hodnota je voliteľná. Prítomnosť hodnoty závisí od nastavenia v JsonDataSetMessageContentMask.
Status	StatusCode	Kód stavu, ktorý sa vzťahuje na všetky hodnoty obsiahnuté v DataSetMessage. Táto hodnota je voliteľná. Prítomnosť hodnoty závisí od nastavenia v JsonDataSetMessageContentMask.
Payload	Objekt	Objekt JSON obsahujúci páry názov-hodnota špecifikované pomocou PublishedDataSet. Formát hodnoty závisí od dátového typu poľa a príznakov špecifikovaných pomocou DataSetMessageContentMask.

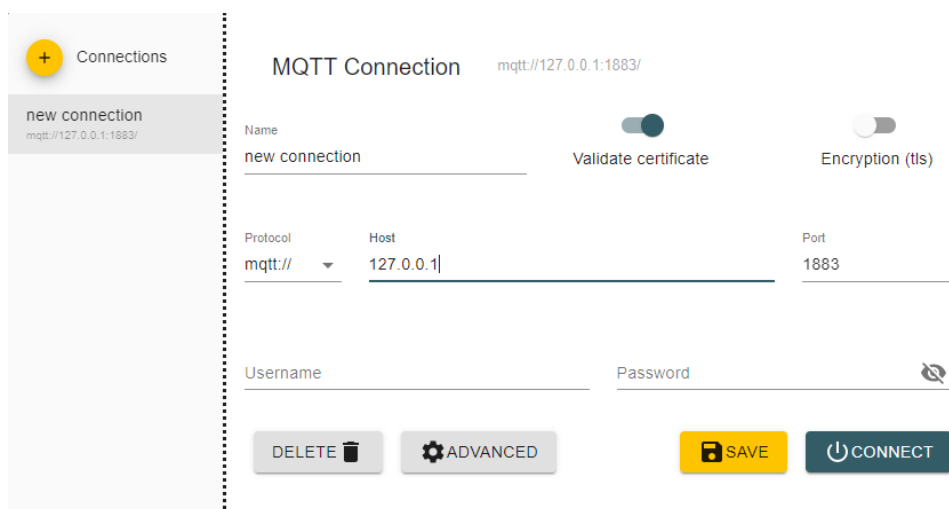
Tabulka 2: Forma JsonDataSetMessage [31]

### 3.4.3 MQTT broker Mosquitto

Komunikácia v modeli OPC UA PubSub môže byť realizovaná viacerými spôsobmi, medzi ktoré patria napríklad prenos cez UDP/UADP, MQTT či ďalšie mechanizmy. V našej práci sme sa rozhodli využiť komunikáciu prostredníctvom aplikačného protokolu MQTT. Tento protokol je určený na prenos a výmenu dát na väčšie vzdialenosti, najmä v prípadoch, keď je požadovaná nízka režíjnosť implementácie a dostupná šírka pásma je obmedzená. Keďže v našej práci potrebujeme pristupovať k dátam aj z externého zariadenia – konkrétne z tabletu, ktorý bude vystupovať ako subscriber a publisher zároveň, rozhodli sme sa použiť spôsob s brokerom. Ako broker sme zvolili MQTT broker *Mosquitto*. Tento broker od spoločnosti Eclipse je open-source softvér, vhodný aj pre zariadenia s nižším výkonom. Funguje na zariadeniach so systémami Windows, macOS alebo Raspberry Pi. Medzi jeho obmedzenia patria napríklad limitované možnosti integrácie nástrojov na spracovanie dát, ako je MySQL, obmedzená podpora cloudových riešení, akými sú Azure či Google Cloud, a taktiež nižšia úroveň zabezpečenia [14] [5].

### 3.4.4 MQTT Explorer

Mosquitto broker je iba softvér, ktorý dáta prijíma a sprostredkúva; sám o sebe neumožňuje ich zobrazovanie. Na tento účel sme používali aplikáciu MQTT Explorer (obr.5). Táto aplikácia umožňuje pripojenie k rôznym brokerom, či už dostupným na internete alebo v lokálnej sieti, poskytuje možnosť zobrazovať iba vybrané alebo všetky topicy (miesta, na ktoré sa ukladajú správy) a podporuje aj zabezpečené pripojenie.



Obr. 5: Úvodná obrazovka softvéru MQTT Explorer

## 4 Realizácia cieľov práce

V predchádzajúcej kapitole sme si predstavili technológie, ktoré v nasej práci budeme používať. V nasledujúcich kapitolách sa budeme venovať konkrétnym realizáciám cieľov, a to v chronologickom poradí. Úvodná časť bude zameraná na hardvérovú stránku práce, v rámci ktorej opisujeme zostrojenie fyzickej podoby digitálneho dvojčata – od uvedenia PLC do prevádzky, cez zapojenie linky, až po ich vzájomné prepojenie. Následne sa sústredíme na softvérovú časť práce, kde podrobne popíšeme programovanie linky, prácu s protokolom OPC UA PubSub a napokon aj samotné vytvorenie digitálneho dvojčata.

### 4.1 Výukový model pece ovládaný zariadením PLC

Samotné PLC sa skladá zo štyroch základných častí: zdroja, riadiacej jednotky CPU a modulov vstupov a výstupov (obr.6 vľavo). V prvom kroku bolo potrebné tieto komponenty zostaviť a vzájomne prepojiť. Najjednoduchším úkonom bolo vloženie pamäťovej karty do jednotky CPU. Tá slúži na rozšírenie pamäťovej kapacity, ukladanie programu PLC a ďalšie systémové funkcie.

Následne bolo potrebné vložiť ovládacie konzoly (obr.6 vpravo) do príslušných puzdier pre vstupy a výstupy. Jednotlivé vstupy, respektíve piny v konzolách, sú očíslované a umožňujú prepojenie signálov z linky na príslušné vstupné a výstupné kanály PLC. Vloženie konzol je veľmi jednoduché – stačí pritlačiť správnu konzolu do zodpovedajúceho puzdra. Konzoly aj puzdrá sú zreteľne označené, takže riziko ich nesprávneho umiestnenia je minimálne. Samotné puzdrá vstupov a výstupov sú pritom vzájomne prepojené zo zadnej strany.

### 4.2 Uvedenie PLC systému do prevádzky a programovanie modelu pece

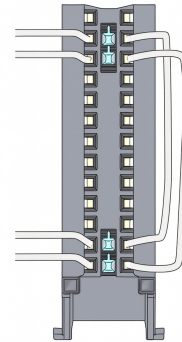
Tým, že sme PLC zapojili, bolo zariadenie oživené po hardvérovej stránke, avšak rovnako je potrebné zabezpečiť jeho uvedenie do prevádzky aj po softvérovej stránke. Tento proces bol realizovaný v prostredí TIA Portal.

#### 4.2.1 Softvérové spojzdenie PLC zariadenia

PLC zariadenie sme pripojili k počítaču pomocou ethernetového kábla. V prvom kroku bolo potrebné vytvoriť nový projekt so správnym označením použitej CPU. Identifikačné číslo CPU bolo uvedené na hornej časti PLC zariadenia nad displejom – **6ES7511-1AL03-0AB0**. Keďže sme pracovali v prostredí TIA Portal V17, tento typ CPU sa v zozname dostupných zariadení nezobrazoval, a preto bolo nevyhnutné nájsť spôsob, ako



(a) PLC S7-1500



(b) Nákres vstupnej/ výstupnej konzoly

Obr. 6: PLC S7-1500 s nákresom konzoly

ho správne nakonfigurovať.

Na stránkach spoločnosti ([38]) Siemens sme zistili, že uvedený model CPU je v TIA Portal V17 kompatibilný so staršou verziou označenou ako **6ES7511-1AK02-0AB0**. Po zvolení tejto ekvivalentnej verzie bolo možné vytvoriť funkčný projekt a pokračovať v ďalšej konfigurácii.

### 4.3 Programovanie riadiaceho systému modelu pece

Doteraz sme vždy naše projekty programovali primárne v grafickom jazyku Ladder Logic. Tento variant je vhodný najmä pri začiatkoch programovania PLC, a to pre svoju prehľadnosť pri menších modeloch, ako aj pre možnosť okamžite sledovať tok signálu, spúšťanie jednotlivých prvkov a podobne. Tentokrát sme však chceli využiť Structured Text vo funkčných blokoch. Tento prístup je založený na klasickom písanom programovaní, ktoré sa svojou štruktúrou podobá jazyku C. Pri väčších modeloch býva Ladder Logic menej prehľadný a zložitejší na vyhľadávanie chýb. Structured Text si vie programátor rozdeliť do funkčných blokov podľa potreby, čím sa zabezpečí prehľadnejší kód, jednoduchšie hľadanie chýb a ľahšia úprava alebo prepísanie funkcií.

## 4.4 Implementácia komunikačného protokolu OPC UA PubSub

Po uvedení modelu do prevádzky je potrebné venovať sa komunikačnej stránke našej práce, konkrétne implementácii komunikačného protokolu OPC UA PubSub. V tejto kapitole najprv predstavíme softvérové nástroje použité pri implementácii a následne opíšeme postupy, ktorými sme realizovali uvedenie komunikácie do prevádzky najprv na strane publishera a následne na strane subscribera. Aby sme zabezpečili, že náš kód spĺňa štandardy OPC UA, príkladový kód sme zobrali priamo z Githubu OPC Foundation a to konkrétne open-source projekt UA-IIoT-StarterKit, ktorý poskytuje referenčné príklady integrácie OPC UA PubSub [32].

### 4.4.1 Publisher

Ako prvý bol upravený skript *publisher*. Na začiatok bolo potrebné nainštalovať broker Mosquitto a nástroj MQTT Explorer na kontrolu a prijímanie správ na brokeri. Keďže broker nemá žiadne používateľské rozhranie, ktoré by zobrazovalo jeho stav, kontrolovali sme ho v operačnom systéme Windows v sekcii *Services*, kde je pri bežiackej službe uvedený stav *Running*.

Ako prvý krok v kóde publishera sme v konfiguračnom súbore prepísali IP adresu na lokálnu adresu OPC UA servera. V sekcii *Connections* sa nachádzal predpripravený server, ktorému sme upravili IP adresu a nastavili uzly premenných, ktoré bude publisher čítať. Rovnako sa tu nachádza aj téma (topic), na ktorú sa budú tieto hodnoty odosielať na broker – tú sme ponechali v predvolenom stave, teda *"Topic/Your/Path"*.

Konfiguračný súbor umožňoval definovať viacero brokerov, no keďže sme potrebovali iba jeden, všetky ostatné sme ignorovali. V triede *Program* bolo navyše potrebné nastaviť názvy brokera a servera tak, aby zodpovedali položkám v konfiguračnom súbore. V tomto bode sa už publisher vedel úspešne pripojiť k OPC UA serveru, a po vypnutí TLS zabezpečenia sa vedel pripojiť na broker.

### 4.4.2 Subscriber

Po uvedení publishera do prevádzky bol proces oživenia subscribera veľmi podobný. V konfiguračnom súbore sme nastavili správny broker s názvom *localhost* a IP adresou 127.0.0.1. V triede *Program* sme následne určili, ktorý broker si má skript pri spustení zvoliť. Rovnako sme vypli TLS zabezpečenie a správnu funkčnosť subscribera sme overili pripojením na broker.

## 4.5 Transformácia skriptov OPC UA PubSub do Unity

V tomto bode sú oba skripty publisher aj subscriber plne funkčné v prostredí CoDeSys a celá komunikácia v reťazci *CoDeSys - publisher - broker - subscriber* pracuje správne. Nasledujúcou úlohou je transformovať tieto skripty tak, aby bolo možné ich spustiť v hernom engine Unity. V tejto kapitole sa budeme venovať postupu tejto transformácie.

### 4.5.1 Transformácia skriptu

V prvom rade je potrebné ozrejmiť, že celý program publishera aj subscribera bol naprogramovaný v C# 10 a .NET 6.0. Z tohto dôvodu nie je možné vytvorené .dll súbory jednoducho importovať do Unity. Bolo preto nutné prerobiť oba skripty do verzie .NET Standard 2.0 a použiť jazyk C# 8.0, s ktorými Unity dokáže pracovať (výpis ??).

Na začiatok bolo potrebné upraviť v súbore .csproj položky **TargetFramework** na .NET Standard 2.0, **LangVersion** na 8.0 a **OutputType** na Library, keďže .NET Standard vytvára knižnice a pôvodný projekt bol nastavený na tvorbu spustiteľného EXE súboru. V prípade, že program tieto hodnoty automaticky neupraví, je možné kliknúť pravým tlačidlom myši v **Solution Explorer** na projekt *UaMqttPublisher* alebo *UaMqttSubscriber*, zvoliť *Properties* a v sekcii *Application* → *General* nastaviť cieľový framework na .NET Standard 2.0.

## 4.6 Komunikácia PubSub na strane TIA portalu

V tejto kapitole budeme pokračovať v sprevádzkovaní OPC UA PubSub, avšak presunieme sa do programu TIA Portal a teda priamo do PLC zariadenia.

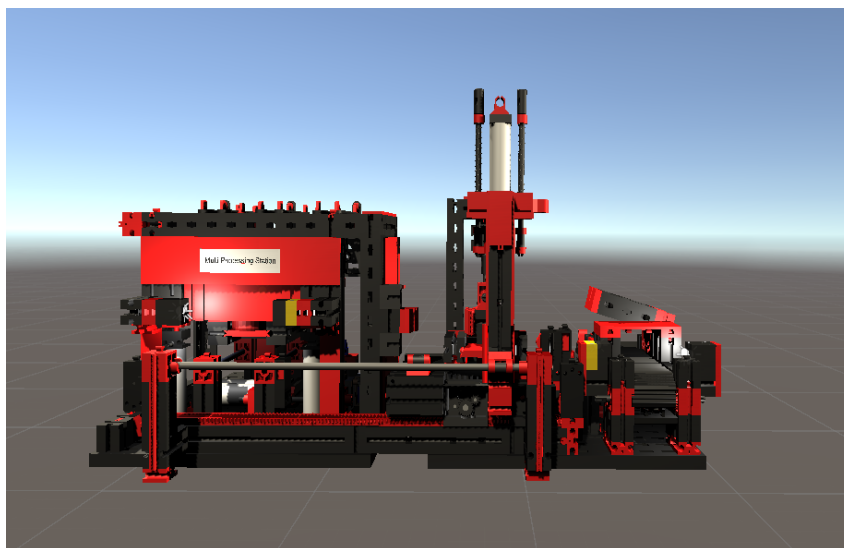
Prístup k OPC UA PubSub je v tomto prípade jednoduchší, keďže PLC Siemens S7-1500 tento protokol natívne podporuje. Vďaka tomu je možné potrebnú knižnicu stiahnuť priamo zo stránky spoločnosti Siemens. Po stiahnutí je nutné súbor dekomprimovať, v pravom menu zvoliť *Libraries - Global libraries - Open global libraries* a načítať PubSub knižnicu. Po jej načítaní sa sprístupnia funkčné bloky, ktoré môžeme pridať do projektu.

## 4.7 Model multifunkčnej pece v Unity

Po uvedení komunikačnej stránky našej práce do prevádzky sa v tejto kapitole budeme venovať tvorbe samotného digitálneho dvojčata z pohľadu modelu. Ako prvé si budeme musieť importovať model do Unity, následne budeme musieť upraviť celú jeho štruktúru a hierarchiu a taktiež ho uvedieme do prevádzky.

### 4.7.1 Tvorba a konverzia modelu pece

Náš model sme dostali ako CAD súbor priamo od spoločnosti Fischertechnik. Aj keď tento formát zabezpečuje vysokú presnosť, bežné softvéry, ktoré nie sú na to špecializované, nevedia s týmto formátom pracovať. Z tohto dôvodu sme použili plugin Datasmith v softvéri Unreal Engine. V tomto softvéri sme konvertovali súbor CAD do formátu FBX a takto upravenú linku sme mohli následne importovať do enginu Unity (obr. 7).



Obr. 7: Virtuálny model pece

### 4.7.2 Usporiadanie hierarchie submodelov

Po importovaní modelu bolo možné vidieť, že jeho submodely (menšie modely, z ktorých sa skladá) nie sú usporiadané do logických celkov. Objekty nemajú následnosť, nie sú usporiadané podľa im prislúchajúceho nadradeného celku, nie sú rozdelené na dynamické a statické. Toto rozdelenie sme museli robiť ručne, aby sme mohli pracovať s modelom pece rovnako ako s reálnou pecou.

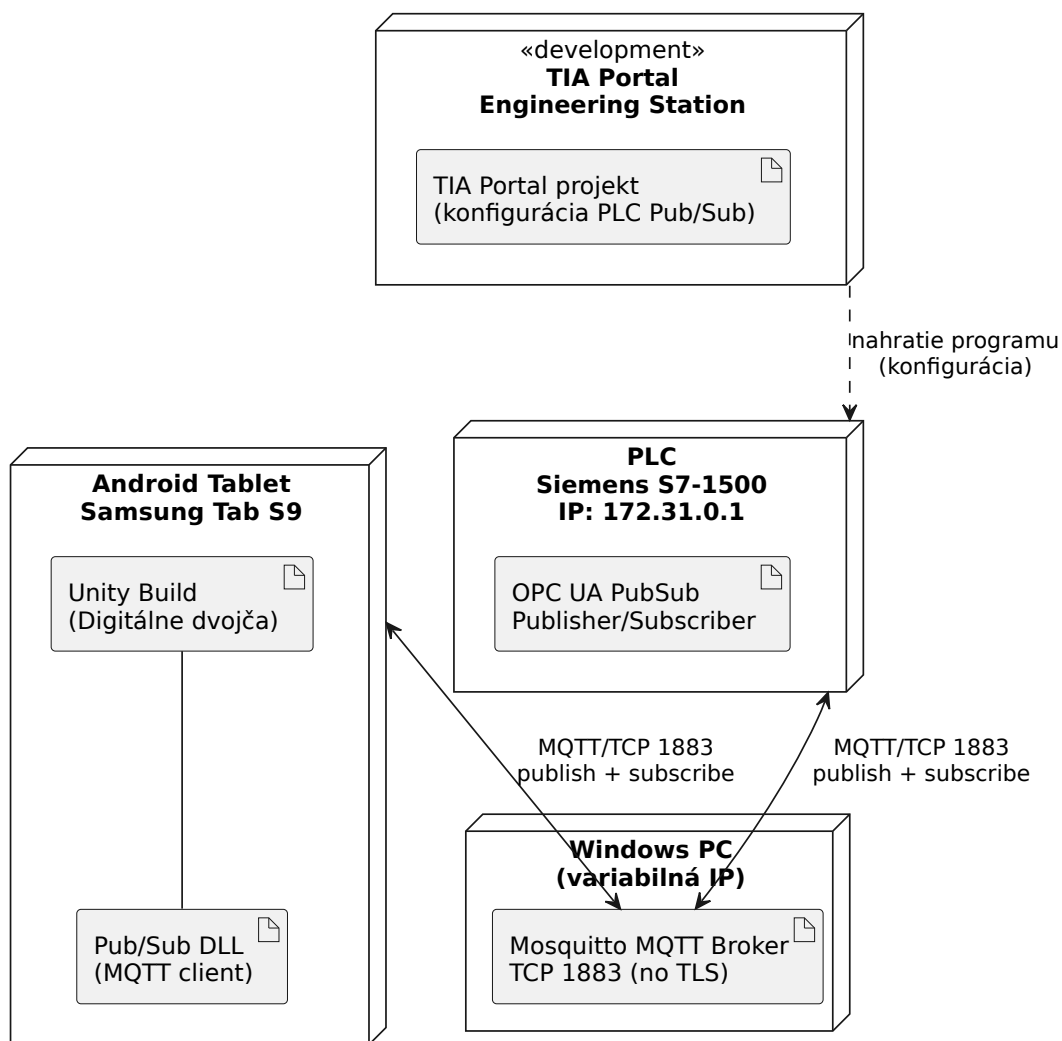
### 4.7.3 Modularita modelu pomocou Asset Administration Shell

Jedným z prínosov našej aplikácie bude jej modulárne používateľské rozhranie a ovládanie. Mnoho aplikácií má svoje používateľské rozhranie a ovládacie prvky zabudované priamo v kóde, čím nie je možné ich meniť pre externého používateľa. V našej práci sme zvolili iný prístup. Používateľské rozhranie, ktoré bude v našom prípade tvoriť tlačidlá ovládajúce digitálne dvojča, bude mať svoju funkcionality definovanú v externom JSON dokumente vytvorenom podľa štandardov AAS. Tento JSON súbor bude možné poslať na broker pomocou klasického publisher-a z akéhokoľvek zariadenia. Z brokera ho bude

možné stiahnuť pomocou zabudovaného subscribera priamo z aplikácie.

Funkčnosť tlačidla je zabezpečená tým, že ID tlačidla z AAS sa zhoduje s príslušným tagom v programe TIA Portal. Po stlačení sa teda odošle na broker dvojica „ID + hodnota“ (z AAS, vždy *true*). Ak chceme proces vypnúť, pri ďalšom stlačení sa odosiela opačná hodnota. Okrem odosielania hodnôt sa v aplikácii dynamicky mení aj vizuálny stav tlačidiel. Pri aktívnom stave je tlačidlo zobrazené zelenou farbou, pri neaktívnom červenou. Zobrazenie celej navrhnutej architektúry je uvedené na obrázku 8.

### Deployment diagram - Architektúra systému digitálneho dvojčata



Obr. 8: Architektúra systému digitálneho dvojčata

## 5 Funkcionalita a možnosti aplikácie

V predchádzajúcej kapitole sme si opísali pozadie fungovania našej aplikácie. V tejto kapitole sa zameriame na to, akým spôsobom je možné k aplikácii pristupovať, ako sa dajú jednotlivé scény využiť a čo všetko aplikácia používateľovi ponúka.

### 5.1 Scény

V našej aplikácii sa nenachádza iba jedna základná scéna. Každú scénu sme sa snažili navrhnuť tak, aby zapadala do celkového kontextu aplikácie a mala svoje konkrétne využitie. V tejto kapitole si prejdeme každú scénu, uvedieme jej špecifiká a to, čím je unikátna.

#### 5.1.1 Základná scéna

Základné fungovanie nášho digitálneho dvojčata sme už opísali, je však dôležité zdôrazniť aj rozloženie prvkov v základnej scéne. Úvodná scéna je „hlavná“ a obsahuje samotné digitálne dvojča. Celý proces riadenia a komunikácie prebieha práve v tejto scéne. Scéna sa skladá z dvoch ovládacích panelov a jedného textového panelu. Na pravom ovládacom paneli sa nachádzajú dynamicky generované tlačidlá, na spodnom paneli sú statické tlačidlá potrebné na základné oživenie aplikácie. Medzi tieto tlačidlá patrí napríklad zmena scény, tlačidlo na vytvorenie ovládacích tlačidiel, tlačidlo na určenie hierarchie digitálneho dvojčata a textové polia určené na pripojenie k brokeru. Zaujímavosťou tejto scény je, že funguje ako digitálne dvojča aj „sama pre seba“ – subscriber priamo prijíma dáta odosielané publisherom v rámci tej istej aplikácie. Všetky zmeny, ktoré sme vykonávali, sa tak automaticky prejavili rovnako, ako keby bolo pripojené PLC. Vďaka tomu bolo možné s aplikáciou pracovať kdekoľvek, bez potreby prenosu celej fyzickej sústavy.

#### 5.1.2 Simulačná scéna

Simulačná scéna funguje podobne ako základná scéna digitálneho dvojčata, avšak s tým rozdielom, že nevyžaduje pripojenie k brokeru. Je určená pre používateľov, ktorí sa chcú zaškoliť v danej problematike, zistiť, ako fungujú jednotlivé komponenty a ako vyzerá celý proces riadenia, a to bez toho, aby zasahovali do riadenia fyzickej pece. Aj my sme počas väčšiny vývoja najprv všetky zmeny testovali v simulačnej scéne a až následne ich aplikovali v scéne s digitálnym dvojčatom. Scéna sa skladá z dvoch panelov – ovládacieho panelu s pripravenými kontrolnými tlačidlami a textového panelu, na ktorý sa vypisujú informácie. V ľavom hornom rohu sa nachádzajú tri tlačidlá určené na zmenu alebo opätovné načítanie scény.

### 5.1.3 Scéna v rozšírenej realite

Poslednou scénou je scéna v rozšírenej realite (AR scéna). K tejto scéne sme pristupovali so snahou, aby bola čo najviac interaktívna. V prvom kroku je potrebné nasmerovať kameru tabletu tak, aby snímala čo najviac horizontálnych plôch. Ak sú tieto plochy správne detegované, zobrazí sa červený povrch, ktorý ich prekryje a označí miesta, kde je možné pec zobrazíť v reálnom prostredí. Po zobrazení modelu sú na linke zvýraznené konkrétne časti, na ktoré je možné kliknúť a uviesť ich do aktívneho stavu. Týmto spôsobom je jednoduchšie zapamätať si, kde sa jednotlivé časti nachádzajú, a lepšie sa oboznámiť s funkciou pece. AR scéna sa skladá z jedného panelu v ľavej časti aplikácie, v ktorom sa nachádza textový panel, tlačidlo na zmazanie linky a textové polia na pripojenie k brokeru.

## 5.2 Riadenie fyzického modelu prostredníctvom aplikácie

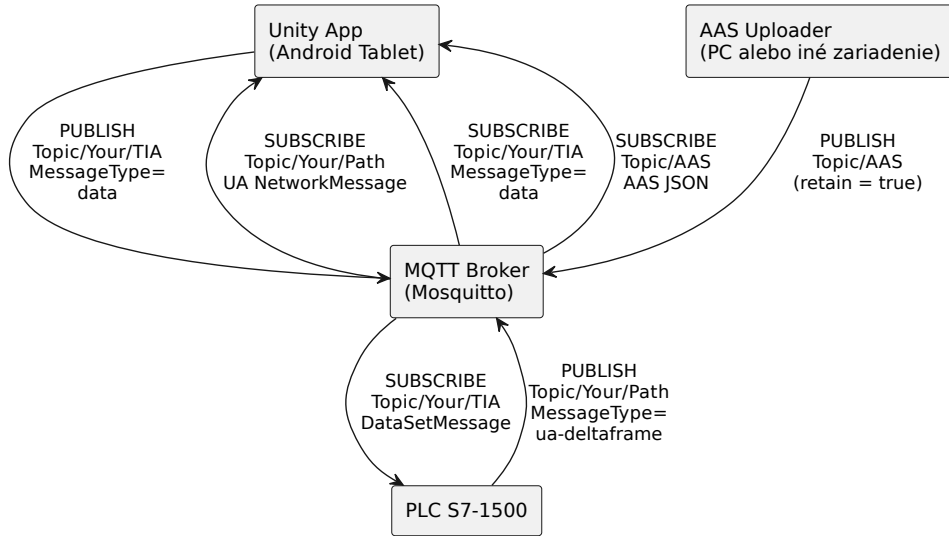
Keďže sme si opísali princíp fungovania tlačidiel a pohybu jednotlivých typov dynamických objektov, môžeme pristúpiť k vysvetleniu spôsobu ich riadenia v rámci navrhnutého systému. Základný princíp sme už naznačili, interakcia s tlačidlom vedie k odoslaniu jeho identifikátora a hodnoty na MQTT broker. Rovnakým spôsobom je možné z prostredia TIA Portal publikovať identifikátory a hodnoty vybraných PLC tagov.

Pri použití jediného MQTT topicu by však dochádzalo ku konfliktom medzi rôznymi typmi správ. Z tohto dôvodu bol zvolený prístup využívajúci viacero samostatných topicov, pričom jednotlivé dáta sú publikované podľa ich významu a pôvodu. Na pôvodný topic *Topic/Your/Path* publikuje dáta publisher z prostredia TIA Portal. Topic *Topic/Your/TIA* je určený pre dáta digitálneho dvojčata, pričom na tento topic je pripojený výhradne subscriber v prostredí Unity. Posledný topic *Topic/AAS* slúži výlučne na ukladanie JSON reprezentácie tlačidiel definovaných v Asset Administration Shell. Mapa používania tém je zobrazená na obrázku 9.

### 5.2.1 Riadenie digitálneho dvojčata z PLC zariadenia

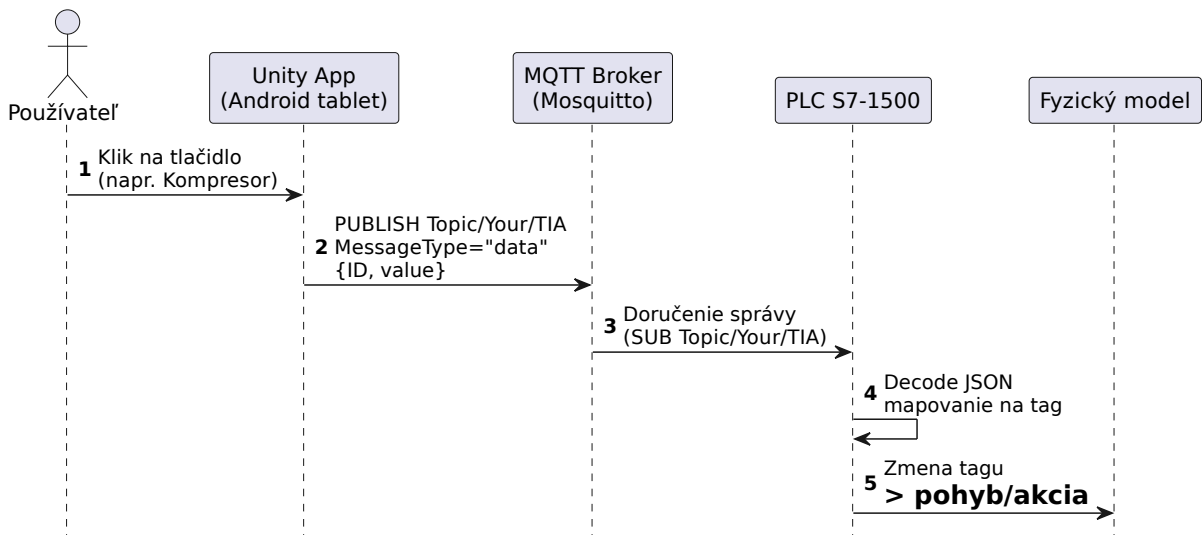
Rovnako sa zameriame aj na stranu programu TIA Portal. V tomto prípade sú správy publikované na topic *Topic/Your/Path*, čím sa predchádza konfliktom so správami odosielanými z prostredia Unity. Po prijatí správy brokerom a následne subscriberom vyhodnocujeme, aký tag prišiel a akú má hodnotu. Napríklad ak chceme zapnúť pás, očakávame tag s názvom *Dopravník* a hodnotou *true*. Ak tieto hodnoty prídu, máme pripravenú premennú typu *JToken*, v prípade dopravného pásu je to premenná **Pas**, do ktorej danú

### Mapovanie MQTT topicov a formátov správ



Obr. 9: Mapovanie MQTT topicov a správ

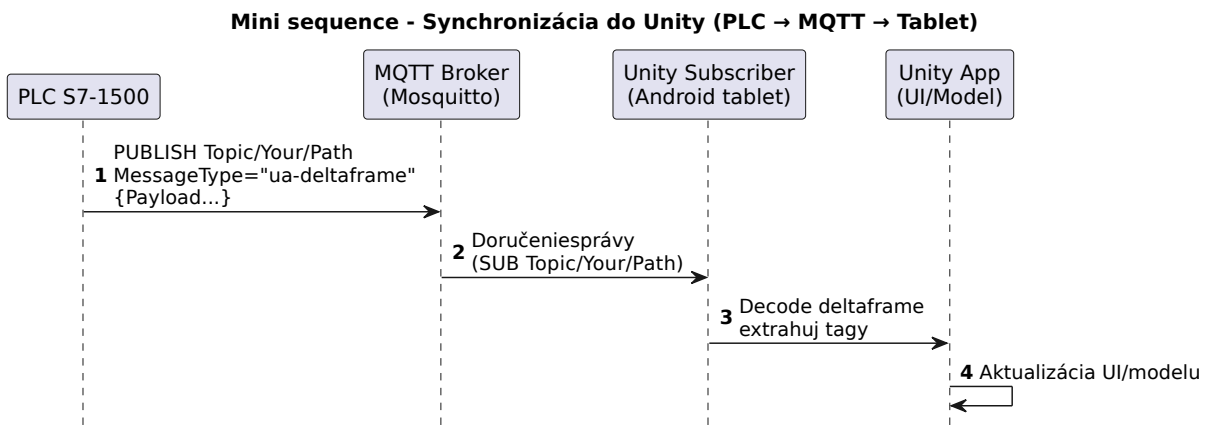
### Sekvenčný diagram - Ovládanie z Unity (Tablet → MQTT → PLC)



Obr. 10: Ovládanie fyzického modelu cez tablet

hodnotu uložíme. Následne jednoduchou *if* podmienkou kontrolujeme jej pravdivostnú hodnotu a spúšťame alebo vypíname pás. celý proces odoslania a spracovania správy je znázornený na sekvenčnom diagrame uvedenom na obrázku 11.

Okrem manuálneho zastavovania používame aj tzv. *stoppery*. Tieto objekty sú, rovnako ako hardvérové tlačidlá pri fyzickej linke, umiestnené na konci dráhy každého objektu. V prípade, že objekt dôjde na koniec svojej dráhy, odošle sa na broker opäť tag s hodnotou *false*, aby sa daný pohyb zastavil.



Obr. 11: Sekvenčný diagram - synchronizácia z TIA portalu do Unity

## 6 Zhrnutie výsledkov a analýza práce

Naša aplikácia funguje ako plnohodnotné digitálne dvojča. Základné tri definície, ktorými sú fyzická entita, digitálny model a ich vzájomná komunikácia, boli splnené pomocou multifunkčnej pece od spoločnosti Fischertechnik, CAD modelu tejto pece konvertovaného na FBX model a OPC UA PubSub komunikácie, ktorá prebieha medzi nimi. Taktiež, časové parametre modelu a fyzickej entity boli nastavené tak, aby jednotlivé komponenty boli zosúladené čo najpresnejšie. Vďaka časovému zosúladeniu a možnosti subscribera v aplikácii čítať všetky topiky, aplikácia ponúka možnosť byť producentom aj konzumentom dát súčasne, čo vytvára podmienky pre prácu na fyzickej entite bez nutnosti jej pripojenia alebo celkovej dostupnosti.

Ak sa pozrieme na posledné dve definície z 5D digitálneho dvojčata, ktorými sú dátový model a servisná entita, aj tieto body sú v našej práci splnené. Ako servisný model nám slúži samotná komunikačná infraštruktúra OPC UA PubSub, spolu so zapojením middleware softvéru brokera. Na základe tejto architektúry je možné do systému posilať potrebné servisné položky aj z iných zariadení, ktoré sú schopné odosielať dáta na broker, z ktorého budú následne stiahnuté do určeného prostredia.

Pokiaľ ide o dátový model, túto službu nám zabezpečuje Asset Administration Shell (AAS), ktorý slúži na uchovávanie dát o používateľskom prostredí. Vďaka retention flag je prítomný vždy na brokeri, pokiaľ sa nevypne, a aj po reštartovaní brokera je jednoduché ho znovu odoslať. AAS zabezpečuje modulárne prostredie, ktoré si používateľ môže jednoducho prispôbovať podľa potreby, vždy však s dôrazom na to, či sa v PLC zariadení nachádzajú potrebné informácie, konkrétne kontrolné tagy.

Ak sa pozrieme na našu prácu z pohľadu HCDDT (Human-Centered Digital Twin), opäť sme sa snažili do našej práce zakomponovať čo najviac prvkov, aby bola splnená definícia a zároveň aby to bolo pre užívateľa čo najkomfortnejšie. Medzi HCDDT prvky vieme zaradiť:

1. **Simulačnú schému** – slúži ako vstupná brána pre používateľa, ktorý systém nepozná, aby sa s ním oboznámil. Pri práci v tejto scéne nehrozí žiadne znehodnotenie fyzického modelu, prípadne žiadna ujma na zdraví.
2. **Scénu v rozšírenej realite** – rozšírená realita je sama o sebe prvok pre HCDDT, avšak naša scéna ponúka aj interaktívnu prácu s modelom, počas ktorej je používateľ schopný priamo interagovať s konkrétnymi časťami a zároveň sa tak oboznamovať s tým, kde sa jednotlivé komponenty nachádzajú.

3. **Základnú scénu**, ktorá ponúka modulárne vyhotovenie tlačidiel, pričom tlačidlá ponúkajú haptickú odozvu, čo je jeden z prvkov HCDDT. Ďalej je tu verný 3D model fyzickej entity a textový výpis pre lepšiu orientáciu používateľa.

Na základe vymenovaných faktov môžeme zhodnotiť, že sa nám podarilo vytvoriť aplikáciu plnohodnotného 5D digitálneho dvojčata zameraného na človeka, s veľkým potenciálom pre jeho rozšírenie do budúcnosti. Aplikácia dokáže používateľovi uľahčiť proces učenia sa práce s fyzickými strojmi, linkami a inými priemyselnými zariadeniami, pričom zároveň zlepšuje porozumenie celkovému systému. Zvyšuje bezpečnosť pri práci pre používateľa, ako aj pre samotný stroj, keďže znižuje riziko poškodenia.

## **6.1 Zovšeobecnenie metodiky vývoja digitálnych technológií digitálneho dvojčata zameraného na človeka pre analyzovanú triedu kyberneticko-fyzikálnych systémov**

Vývoj našej aplikácie prebiehal na modeli udalostného systému pece. Udalostný proces v takomto systéme vždy reaguje na konkrétne udalosti, teda zmeny, ktoré môžu byť vyvolané napríklad senzormi, ako sú svetelné brány alebo stoppery. Tieto procesy vyžadujú rýchlu odozvu, pretože sú vždy naviazané na ďalšie úlohy a ich oneskorenie môže ovplyvniť chod celého systému. Z tohto dôvodu je náš projekt postavený na technológiách digitálneho dvojčata, Asset Administration Shell (AAS) a OPC UA PubSub.

Pomocou technológie digitálnych dvojčiat zameraných na človeka môže pracovník sledovať aktuálny vizuálny stav zariadenia bez toho, aby bol fyzicky prítomný. Kvalita digitálneho dvojčata je pritom priamo úmerná komplexnosti fyzickej entity. Náš model pece predstavoval menšiu verziu zariadenia s obmedzenými funkciami a senzormi. Avšak doplnením komponentov, ako sú tlakové snímače alebo enkódery, by sa kvalita digitálneho dvojčata výrazne zvýšila. Vďaka enkóderom by bolo možné presne sledovať polohu zariadení a priamo ju mapovať na digitálne prototypy. Tlakové snímače by umožnili presnejšie určovanie polohy tovaru, čím by sa vytvorilo digitálne dvojča založené na fyzikálnych parametroch. Vo všeobecnosti je nevyhnutné, aby vývojár takejto aplikácie mal dostatočné znalosti o prenášanom zdrojovom zariadení, aby mohol vytvoriť digitálne dvojča čo najpresnejšie. Dôležitou súčasťou aplikácie je aj simulačné schéma, ktorá umožňuje bezpečné zaučenie pracovníka mimo fyzickej entity. Tento prístup minimalizuje riziko poškodenia zariadenia alebo materiálu a zvyšuje bezpečnosť a efektivitu školenia.

Ako komunikačnú technológiu sme použili OPC UA PubSub. Tento protokol zabezpečuje rýchlu komunikáciu a interoperabilitu medzi aplikáciou a PLC zariadeniami s

využitím middleware softvéru brokera. Broker zhromažďuje všetky potrebné informácie na jednom mieste a pri použití cloudového riešenia nezáleží na vzdialenosti od fyzického zariadenia. Používateľ môže monitorovať a ovládať zariadenia z druhej strany výrobnéj haly alebo dokonca z domu, samozrejme za cenu mierne vyššej časovej odozvy.

Technológia Asset Administration Shell umožňuje prácu s používateľským rozhraním a tým aj s funkcionalitou aplikácie. Spojenie technológie brokera, OPC UA PubSub a AAS umožňuje uchovávať rozhrania na rôznych topikoch brokera, a v prípade ich výpadku ich odoslať z rôznych zariadení v priemyselnej budove alebo mimo nej, pričom ich je možné okamžite stiahnuť priamo do aplikácie podľa potreby.

Vo všeobecnosti, aj ak by digitálny model nebol dostupný, je možné akékoľvek udalostné výrobné zariadenie obsluhované správne nastaveným PLC s podporou OPC UA PubSub minimálne ovládať pomocou tlačidiel. Stačí definovať tlačidlá v AAS, zobrazíť ich prostredníctvom aplikácie a používateľ je schopný poslať potrebné správy na ovládanie zariadenia. Týmto prístupom je pracovník ústrednou súčasťou interakcie so systémom, čo zvyšuje bezpečnosť a efektívnosť a zároveň plne zodpovedá konceptu digitálneho dvojčata zameraného na človeka.

# Záver

V našej práci sme poskytli komplexný prehľad vývoja technológie digitálnych dvojčiat v priemysle. Prešli sme cestu od analógových začiatkov až po súčasné verzie zameraných na človeka. Cieľom bolo objasniť a definovať čo najviac aspektov súvisiacich s pojmom digitálnych dvojčiat. V kapitole o súčasnom stave sme podrobne preskúmali rozsiahly súbor literatúry, zahŕňajúci články, štúdie a vedecké práce, aby sme poskytli komplexný prehľad o danej problematike. Dôraz sme kládli na identifikáciu a poukázanie na časté nesprávne pochopenie alebo zneužívanie kľúčového pojmu v rámci tejto oblasti.

Následne sme uviedli technológie určené na vývoj digitálnych dvojčiat, opísali sme tie dostupné priemerným používateľom, ako aj viacúčelové softvéri pre tvorbu konkrétnych projektov. Podstatná časť našej práce bola venovaná definovaniu terminológie v oblasti počítačovej grafiky, ktorá je nevyhnutná pre vytvorenie presných CAD modelov a ich efektívnu konverziu do prakticky využiteľnej formy. Okrem toho sme sa venovali detailnému skúmaniu a porovnávaniu dvoch často používaných konverzných technológií, čo nám umožnilo poskytnúť hlbší pohľad na ich funkčnosť a efektivitu v kontexte využitia v praxi.

V praktickej časti tejto práce bolo od základov navrhnuté a implementované digitálne dvojča v hernom engine Unity pre zariadenia fungujúce na operačnom systéme Android. V úvodnej fáze bol vytvorený fyzický model multifunkčnej pece, ktorý slúžil ako predloha pre následnú tvorbu jej digitálneho dvojčaťa. Následne sa podarilo sprevádzkovať komunikáciu OPC UA PubSub v prostredí Unity a zabezpečiť odosielanie aj prijímanie správ medzi digitálnym dvojčaťom a prostredím TIA Portal.

V záverečnej fáze práce bol do prevádzky uvedený samotný digitálny model, ktorý predstavuje virtuálnu duplicitu fyzického modelu multifunkčnej pece.

Ak vychádzame z delenia digitálnych dvojčiat podľa konceptu päťrozmerného digitálneho dvojčaťa, možno konštatovať, že navrhnuté riešenie spĺňa jeho základné charakteristiky. Digitálne dvojča pozostáva z fyzickej a digitálnej entity, ktoré sú schopné obojsmernej komunikácie, čím je splnená podmienka existencie minimálne trojrozmerného digitálneho dvojčaťa.

Servisná entita je v tomto prípade realizovaná prostredníctvom komunikačnej infraštruktúry založenej na OPC UA PubSub s využitím brokera, ktorý zabezpečuje distribúciu dát a služieb medzi fyzickou a virtuálnou entitou.

Ako dátový model je využitý koncept Asset Administration Shell (AAS), ktorý poskytuje formálnu reprezentáciu prvkov GUI aj ich väzieb na aplikačnú logiku. AAS v tomto ponímaní neplní úlohu iba „konfiguračného zoznamu“, ale predstavuje referenčný model

konfigurácie: v rámci jeho submodelov sú špecifikované jednotlivé ovládacie prvky (napr. tlačidlá), ich parametre, identifikátory a predovšetkým sémantika vykonávanej funkcie.

Takto definované prvky a ich funkcie sú následne publikované prostredníctvom brokera vo forme správ, ktoré môžu konzistentne odoberať digitálny aj fyzický model. Výsledkom je architektúra, v ktorej sa konfigurácia používateľského rozhrania decentralizuje od konkrétnej implementácie klienta. Rôzne typy GUI môžu dynamicky rekonštruovať rozhranie z AAS a mapovať ovládacie prvky na príslušné funkcie bez potreby duplicitného nastavovania alebo zásahov do kódu.

Zvolený prístup týmto spôsobom prirodzene podporuje modularitu a opätovnú použiteľnosť napríklad v rôznych variantoch rozhraní alebo rozšírenia funkcionality. Zmeny v GUI je možné realizovať primárne úpravou AAS (resp. jeho submodelov), pričom komunikačný mechanizmus cez broker zabezpečí distribúciu zmien ku všetkým relevantným odberateľom.

Splnenie definície Human-Centered Digital Twin (HCDDT) predstavuje jednu z najpodstatnejších častí tejto práce. Ak vychádzame z definícií a technologických požiadaviek na HCDDT uvedených v teoretickej časti práce, je možné konštatovať, že navrhnuté riešenie tieto kritériá spĺňa. Digitálne dvojča umožňuje prijímanie priamych vstupov od používateľa prostredníctvom tabletu, využíva haptickú odozvu a zároveň obsahuje scénu s rozšírenou realitou, ktorá podporuje prirodzenú interakciu používateľa so systémom.

Na základe uvedených skutočností je možné výsledok tejto práce označiť za päťozmerné digitálne dvojča zamerané na človeka, ktoré kladie dôraz na interakciu používateľa, ergonomické ovládanie a integráciu digitálneho dvojčata do reálneho prostredia.

# Prínosy práce

## Komplexná analýza a vymedzenie pojmov v oblasti HCDT

- Práca prináša podrobný prehľad súčasného stavu modelovania a digitalizácie so zameraním na koncept Human-Centric Digital Twin (HCDT) v kontexte Industry 4.0 a 5.0. Prínosom je najmä identifikácia a kritické poukázanie na časté nesprávne interpretácie pojmu digitálne dvojča v odbornej literatúre, kde sa často zamieňa za jednoduchú simuláciu alebo digitálny tieň.

## Metodika vývoja 5D digitálneho dvojčaťa pre Industry 5.0

- Autor navrhol a overil metodiku pre vývoj päťrozmerného digitálneho dvojčaťa (5D DT), ktoré rozširuje tradičný Grievesov model o dimenzie dátového modelu a servisnej entity. Táto metodika umožňuje hlbšiu integráciu a synchronizáciu medzi fyzickým a virtuálnym svetom.

## Návrh a implementácia modulárneho Human-Centric HMI s využitím Asset Administration Shell (AAS)

- Tento prínos **predstavuje nosný inovačný pilier dizertačnej práce**, ktorý integruje moderné interakčné vzory s princípmi interoperability v prostredí Industry 5.0. Práca prináša originálne riešenie, v ktorom používateľské rozhranie (HMI) nie je pevne definované v kóde riadiaceho systému, ale je budované modulárne pomocou štandardu AAS. Využitím externých konfiguračných modelov (formát JSON) je možné dynamicky meniť ovládacie prvky a vizualizáciu v reálnom čase bez nutnosti zásahu do zdrojového kódu aplikácie. V spojení s využitím zmiešanej reality (MR) na mobilných zariadeniach (tablet) tento prístup umožňuje operátorovi pristupovať k dátam v prirodzenom kontexte jeho práce, čo radikálne zvyšuje flexibilitu, personalizáciu a celkovú efektivitu interakcie človeka s digitálnym dvojčaťom.

## Implementácia komunikačného rozhrania na báze OPC UA PubSub medzi fyzickou riadiacou vrstvou a virtuálnym prostredím digitálneho dvojčaťa

- Tento prínos spočíva v návrhu a realizácii nízkolatenčného, plne obojsmerného dátového mosta, ktorý zabezpečuje synchronnú výmenu údajov medzi priemyselným riadiacim subsystémom a simulačno-vizualizačným jadrom digitálneho dvojčaťa. Využitím komunikačného modelu Publisher-Subscriber v rámci protokolu OPC UA

PubSub sa podarilo dosiahnuť efektívnu udalostami riadenú komunikáciu, kde fyzická riadiaca entita v reálnom čase publikuje deterministické prevádzkové dáta, zatiaľ čo virtuálna entita slúži ako aktívne riadiace rozhranie umožňujúce operátorovi spätne vysielat príkazy a konfiguračné parametre do reálneho procesu.

### **Zovšeobecnenie metodiky pre širšiu triedu systémov**

- Navrhnutá metodika bola úspešne overená na modeli udalostného výrobného procesu (multifunkčná pec). Výsledky práce však majú všeobecný charakter a sú aplikovateľné na širšiu triedu kyberneticko-fyzikálnych systémov v priemysle.

# Publikačná činnosť

## ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 BALLA, Michal - HAFFNER, Oto - KUČERA, Erik - CIGÁNEK, Ján. Educational case studies: creating a digital twin of the production line in TIA portal, Unity, and Game4Automation framework. In *Sensors*. Vol. 23, iss. 10 (2023), Art. no. 4977 [35] s. ISSN 1424-3210 (2023: 3.4 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.786 - SJR, Q1 - SJR Best Q, 0.611 - AIS, Q2 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/s23104977 ; SCOPUS: 2-s2.0-85160644922 ; WOS: 000996775500001 ; CC: 000996775500001. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V3 Ohlasy:

1. [1] BERVELL, Brandford - OWUYAW, Kenneth Ebow - ARMAH, Justice Kofi - MIREKU, Dickson Okoree - ASANTE, Alexander - SOMUAH, Beatrice Asante. Modelling distance education students' satisfaction and continuous use intention of students' portal: An importance-performance map analysis. In: *Information Development*, 2023, In press. ISSN 0266-6669., Registrované v: SCOPUS, WOS Ohlas: zahraničný
2. [1] ALIMAM, Hassan - MAZZUTO, Giovanni - TOZZI, Nicola - EMANUELE CIARAPICA, Filippo - BEVILACQUA, Maurizio. The resurrection of digital triplet: A cognitive pillar of human-machine integration at the dawn of industry 5.0. In: *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences*, 2023, vol. 35, no. 10, art. no. 101846, ISSN 1319-1578., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
3. [1] YI, Hang - LIN, Ruliang - SONG, Hongru - LI, Chao - LIN, Xintong. Experimental study of cryptographic algorithm based on digital twin technology side channel leakage intelligent measurement and assessment. In: *REVIEWS OF ADHESION AND ADHESIVES*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 856-880. ISSN 2168-0965., Registrované v: WOS Ohlas: zahraničný
4. [2] Mujallid, A. T. Digital Twin Between Reality and Future: A Systematic Review of Using Digital Twin and a Future Vision for Employing it in Teaching and Learning, *Journal of Scientific Research in Education*, 24(10), pp. 204-225. doi: 10.21608/jsre.2023.239203.1606 Ohlas: zahraničný
5. [2] H.G.C.R. Laksiri, S.D.R. Lakmal, P.G.S.R. Wijetunga, M.M.R. Rashmika, N.U.S. Kumara, G.M.K. Perera, M.M.S.M. Mapa. DESIGN AND DEVELOPMENT OF

A CONVEYOR BELT SYSTEM WITH A SORTING ROBOTIC ARM AND ITS VIRTUAL REALITY INTERFACE. In International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024, Vol. 1, Iss.6, pp. 631-634. ISSN 2582-5208. Ohlas: zahraničný

6. [1] UCAR, Aysegul - KARAKOSE, Mehmet - KIRIMCA, Necim. Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends. In: APPLIED SCIENCES-BASEL, 2024, vol. 14, no. 2, art. no. 898. ISSN 2076-3417., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
7. [1] WANG, Haoran - YANG, Zuoqing - ZHANG, Quan - SUN, Qilei - LIM, Enggee. A Digital Twin Platform Integrating Process Parameter Simulation Solution for Intelligent Manufacturing. In: Electronics (Switzerland), 2024, vol. 13, no. 4, art. no. 802. ISSN 2079-9292., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
8. [1] ANDRUSYSHYN, Vladyslav - ANDRUSYSHYN, Ivan - ŽIDEK, Kamil - IVANOV, Vitalii - PITEL, Ján - TROJAN, Jozef. Creating a Digital Twin of the ABB YuMi Robot to Improve the Human-Robot Interaction Experience. In: Proceedings of the 2024 25th International Carpathian Control Conference, ICCO 2024, 2024, pp. 1-4. ISBN 979-8-3503-5069-2., Registrované v: SCOPUS, WOS Ohlas: zahraničný
9. [1] PEREZ, Sergio Sandoval - LOPEZ, Juan Miguel Gonzalez - PELAYO, Manuel Brambila - SOLIS, Jesus Ezequiel Molinar. Teaching three-phase half-wave power electronic rectifier with gamified augmented reality support. In: ALEXANDRIA ENGINEERING JOURNAL, 2024, vol. 99, pp. 335-346. ISSN 1110-0168., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
10. [1] KHAMKAR, Akshay Dattaprasad - PATIL, Sudhir Madhav. Digital Twin in Fluid Power: Review-Uses and Outlook. In: International Research Journal of Multidisciplinary Scope, 2024, vol. 5, no. 3, pp. 79-96. ISSN 2582-631X., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
11. [1] KILINC-ATA, Nurcan - ATA, Ridvan. The Place and Role of Digital Twin Applications: Directions for Energy and Education Sector. In: Transforming Industry using Digital Twin Technology, 2024, pp. 45-57. ISBN 978-303158523-4., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
12. [1] LIU, Wenhui - LV, Yihan - WANG, Qian - SUN, Bo - HAN, Dongchen. A Systematic Review of the Digital Twin Technology in Buildings, Landscape and

- Urban Environment from 2018 to 2024. In: Buildings, 2024, vol. 14, no. 11, art. no. 3475. ISSN 2075-5309., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
13. [1] RIESENER, Michael - SCHUKAT, Esben - CURIEL-RAMIREZ, Luis A. - SCHÄFER, Niklas - VALDEZ-HERAS, Ariana. Development of a VR-Based Digital Factory Planning Platform for Dynamic 3D Layout Editing. In: Procedia CIRP, CMS 2024, 2024, vol. 130, pp. 419-426. ISSN 2212-8271., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  14. [1] MOHANTY, Anita - MOHAPATRA, Ambarish G. - MOHANTY, Subrat Kumar - MAHALIK, Nitaigour Premchand - ANAND, A. Jose. Leveraging digital twins for optimal automation and smart decision-making in Industry 4.0: Revolutionizing automation and efficiency. In: Handbook of Industrial and Business Applications with Digital Twins, 2024, pp. 221-242. ISBN 978-104026675-5., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  15. [1] JEON, Eugene - KIM, Yeon Hee - LEE, Gyeong Min. A Study on Semiconductor Device Training Using Digital-Twins and Solid-edge. In: 2024 9th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, ICICM 2024, 2024, pp. 114-118. ISBN 979-833150945-3., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  16. [1] HU, Lingyan - XUE, Haixin - CHENZHUANG, Tianyi - CAO, Meng - YUAN, Chunping - HOU, Huiming. Research of Continuous Thermoplastic Coating Equipment Based on Virtual Simulation. In: 2024 8th International Workshop on Control Engineering and Advanced Algorithms, IWCEAA 2024, 2024, pp. 5-9. ISBN 979-833152888-1., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  17. [1] GARG, Apeksha - VEMARAJU, Sudha. Artificial Intelligence Applications in Predictive Maintenance for Sustainable Logistics. In: 2024 IEEE 4th International Conference on ICT in Business Industry and Government, ICTBIG 2024, 2024, pp. 1-5. ISBN 979-833151898-1., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  18. [1] BERGERON, Bill - HUBBELL, Matthew - MOJICA, Daniel - REUTHER, Albert - ARCAND, William - BESTOR, David - BURRILL, Daniel - BYUN, Chansup - GADEPALLY, Vijay - HOULE, Michael - JANANTHAN, Hayden - JONES, Michael - LUSZCZEK, Piotr - MICHALEAS, Peter - MILECHIN, Lauren - MULLEN, Julie - PROUT, Andrew - ROSA, Antonio - YEE, Charles - KEPNER, Jeremy. Supercomputer 3D Digital Twin for User Focused Real-Time Monitoring. In: 2024

- IEEE High Performance Extreme Computing Conference, HPEC 2024, 2024, pp. 1-8. ISBN 979-835038713-1., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
19. [2] HOLOVASHCHENKO, V.S. - BOSAK, A.V. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnoho protsesu masloekstratsiinoho zavodu. In VII Scientific and Technical Conference of Master's Students named after Professor Vasyl Vynoslavsky, 2024, pp. 61-66. Ohlas: zahraničný
  20. [2] SINGH, Bhupinder - KAUNERT, Christian. Bridging Future via Human-Smart Machine Vision Interfaces: Projecting High Efficiency Manufacturing Activities in 5IR (Industry 5.0). In Deep learning model optimization, deployment and improvement techniques for edge-native applications. 2024, pp. 53-75. ISBN 978-1-0364-0960-9. Ohlas: zahraničný
  21. [2] TANBERK, Senem - TUKEL, Dilek Bilgin - ACAR, Kadir. The Design of a 3D Character Animation System for Digital Twins in the Metaverse. In arXiv:2407.18934, 2024. [15] p. DOI <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.18934>. Ohlas: zahraničný
  22. [1] SINGH, Bhupinder - JERMSITTIPARSERT, Kittisak. Future of smart manufacturing with IoT in industry 5.0. In: Designing Sustainable Internet of Things Solutions for Smart Industries, 2025, pp. 301-320. ISBN 979-8-3693-5498-8., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  23. [1] PUTTEGOWDA, Madhu - BALLUPETE NAGARAJU, Sharath. Artificial intelligence and machine learning in mechanical engineering: Current trends and future prospects. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, vol. 142, art. no. 109910. ISSN 0952-1976., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
  24. [1] STRIFFLER, Nikolai - VOIGT, Tobias. A 3D Approach for the Virtual Commissioning of Processing Plants. In: IEEE ACCESS, 2025, vol. 13, pp. 21190-21209. ISSN 2169-3536., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC Ohlas: zahraničný
  25. [1] XIANG, Zhuowen - TIAN, Caiyan - DAI, Yunpeng - XIANG, Hongyu - HUANG, Lili - LIU, Xinqiao - ZHANG, Youhui. Research and Application of Digital Twin and Simulation Teaching Methodology in DVOR. In: IEEE Access, 2025, in press. ISSN 2169-3536., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
  26. [1] MENDOZA, Alejandro Puga - CHÁVEZ, Jeili Leilani Caballero - MENDOZA, Ricardo Torres. Applications and methodologies of Internet of Things in warehouses

and inventory management: A systematic literature review. In: *Procedia Computer Science*, 2025, Vol. 253, pp. 1236-1245. ISSN 1877-0509., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný

27. [1] SINGH, Bhupinder - KAUNERT, Christian - JERMSITTIPARSERT, Kittisak - CHANDRA, Saurabh - JAIN, Ashima. Future of smart manufacturing as an engine of prosperity: Broadcasting mechanical fault diagnosis and prognosis via IoT in industry 5.0. In: *Sustainable Advanced Manufacturing and Logistics in ASEAN*, 2025, pp. 303-320. ISBN 979-836935352-3., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
28. [1] SINGH, Bhupinder. Unscrambling the Future of Smart Manufacturing and Broadcasting Mechanical Fault Diagnosis and Prognosis via IoT in Industry 5.0. In: *Enhancing Social Sustainability in Manufacturing Supply Chains*, 2025, pp. 303-322. ISBN 979-836939742-8., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
29. [1] KHOKHAR, Maryam. Enhancing Social Sustainability in Manufacturing Supply Chains. In: *Enhancing Social Sustainability in Manufacturing Supply Chains*, 2025, pp. 1-402. ISBN 979-836939742-8., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
30. [1] LIN, Chang Zhe - CHENG, Jui Hung. Exploration of the Effectiveness of Integrating Virtual-Real Technologies in Enhancing the Practical Course of Plastic Injection Mold Design and Development. In: *Lecture Notes in Computer Science*, 2025-01-01, vol. 15767 LNCS, pp. 378-394. ISSN 03029743., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
31. [1] SARRIA, Déborah - DESCHAMPS, Fernando - DIOGO, Ricardo Alexandre. Exploring the Role of Digital Twins and Extended Reality in Manufacturing Engineering Education. In *Lecture Notes in Production Engineering. Part F566*, 2025, pp. 223-234. ISSN 2194-0525., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
32. [1] SINGH, Bhupinder - CHANDRA, Saurabh. Revolutionizing Smart Manufacturing for Industry 5.0: IoT-Driven Mechanical Fault-Predictive Prognosis as a Pillar of Industrial Prosperity. In *Transformative Impact of AI in Supply Chain Management*. 2025, pp. 141-160. ISBN 979-833730925-5, 979-833730923-1., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
33. [1] YU, Jie - HU, Bo. Real-Time Monitoring and Safety Scheduling of Intelligent Elevators Based on Biometric Data Analysis. In *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2025, in press. ISSN 0098-3063.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TCE.2025.3636054.>,

Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný

34. [1] WOO, Donghyun - CHOI, Hyunbin - ESPEJO JR., Ruben D. - KIM, Joongrock - YU, Sunjin. Open-Data-Driven Unity Digital Twin Pipeline: Automatic Terrain and Building Generation with Unity-Native Evaluation. In: Applied sciences-basel, 2025, vol. 15, iss. 21, art. no. 11801. e-ISSN 2076-3417.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111801.>, Registrované v: SCOPUS, WOS, CC  
Ohlas: zahraničný
35. [1] FERRARI, Andrea - MANGANO, Giulio - ZENEZINI, Giovanni. Digital Twin Applications for Intralogistics Processes: A Literature Review. In IFAC PAPER-SONLINE. 2025, Vol. 59, iss. 10, pp. 1630-1635. ISSN 2405-8963.  
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.274.>, Registrované v: SCOPUS, WOS  
Ohlas: zahraničný
36. [1] MANGKALAJAN, Satit - KOODTALANG, Wittaya - SANGSUWAN, Thaksin - WONGSAROJ, Wongsakorn - THONG-UN, Natee. Efficient Cost Hardware-in-the-Loop System for Liquid Process Control Teaching Aligned with ABET Standard. In: Processes, 2025, vol. 14, iss. 1, art. no. 30. e-ISSN 2227-9717.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/pr14010030.>, Registrované v: WOS Ohlas: zahraničný
37. [2] KACZMAREK, Wojciech - BORYS, Szymon. Projekt panelu operatora w celu sterowania torem jezdny roboty kolaboracyjnego GoFa. In: PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2025. Vol. 101, iss. 6, pp. 81-86. ISSN 0033-2097.  
DOI <https://doi.org/10.15199/48.2025.06.14.> Ohlas: zahraničný
38. [2] JUNG, Doyoon - MOON, Heejeong - JEONG, Heeja - KIM, Namho. Design of a Unity-based Digital Twin Control System for Efficient Operation of an Automotive Press Factory. In: Smart Media Journal, 2025. Vol. 14, iss. 5, pp. 60-67. ISSN 2287-1322. DOI <https://doi.org/10.30693/SMJ.2025.14.5.60.> Ohlas: zahraničný
39. [2] NURUZZAMAN, Md. - LIMON, Golam Qibria - CHOWDHURY, Abdur Razzak - MASUD KHAN, M. A. Predictive maintenance in power transformers: A systematic review of AI and IOT applications. In: ASRC Procedia: Global Perspectives in Science and Scholarship, 2025. Vol. 1, iss. 1, pp. 34-47.  
DOI <https://doi.org/10.63125/r72yd809.> Ohlas: zahraničný

40. [2] MITA, Klaountio - GIACHOS, Ioannis - PAPAKITSOS, Evangelos C. - PAPOUTSIDAKIS, Michail - LASKARIS, Nikolaos - DROSOS, Christos. Leveraging Digital Twins for Enhanced PLC Performance and Maintenance in Industrial Automation. In: International Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2025. Vol. 7, pp. 125-135. ISSN 2769-2507.  
DOI <https://doi.org/10.37394/232027.2025.7.13>. Ohlas: zahraničný
41. [2] BOUKAR, Anouar - DIALLO, Thierno M. L. - HAOUAT, Zineb El, PLATEAUX, Regis - PENAS, Olivia - AMEGOUZ, Driss. Digital Twin for Scheduling Management in Manufacturing Systems: Review and Perspectives. In Advances in Integrated Design and Production III. CPI 2024. 2025 LNME, pp. 476–484. DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-032-04742-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-032-04742-7_48). Ohlas: zahraničný
42. [2] PILLA, David Ilvis - ALMEIDA, Miguel Sánchez - NARANJO, Juan Escobar. Integración de IIoT y computación en la nube para la automatización industrial avanzada (Integration of IIoT and cloud computing for advanced industrial automation). In Revista TSE DE. 2025, Vol. 8, iss 1, [28] pp. ISSN 2600-5557.  
DOI <https://doi.org/10.60100/tsede.v8i1.245>. Ohlas: zahraničný
43. [2] MENDOZA, Francisco Javier Esparza - AGUILAR, Jesús Alejandro Quiroz - DIAZ, Anel Jacaranda Torres. Percepción y adaptación de los docentes de ingeniería ante la incorporación de TIAPortal v17 en la enseñanza universitaria (Perception and adaptation of engineering educators to the implementation of TIAPortal v17 in higher education). In Multidisciplinas de la Ingeniería, 2025. Vol. 13, iss. 22, pp. 180-189. ISSN 2395-843X. DOI <https://doi.org/10.29105/mdi.v13i22.350>. Ohlas: zahraničný
44. [2] KOTECHA, Maulik C. - DANDRIDGE, Tikyna M. - REID SMITH, Tahira. Digital Twins in Engineering and Design Education: A Systematized Review. In 2025 ASEE Annual Conference & Exposition, Montreal, Quebec, Canada. 2025, [11] pp. DOI <https://doi.org/10.18260/1-2-56296>. Ohlas: zahraničný
45. [1] LEMOS, Tiago - SEVERINO, Ricardo - DA CRUZ, António M.R. - TEIXEIRA, Patrício - LOPES, Sérgio I. A FIWARE-Based Digital Twin for the Textile Sector: The MTEX NS Use Case. In Lecture Notes in Networks and Systems. 2026, Vol. 1605 LNNS, pp. 202-212. ISSN 2367-3370., Registrované v: SCOPUS Ohlas: zahraničný
46. [1] HU, Wei - OU, Yifu - LIU, Haiyi - NI, Peizhou - CHANG, Cheng. Integrating digital twin technologies for maintenance 4.0 in the building industry: A review and

conceptual framework. In: Building and environment, 2026, vol. 288, art. no. 113997. ISSN 0360-1323, e-ISSN 1873-684X.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113997>., Registrované v: WOS, SCOPUS, CC Ohlas: zahraničný

47. [1] QUESADO, Goncalo - DA CRUZ, Antonio M. R. - PEDROSO, Joao - LOPES, Sergio - MATT, Dt - RAUCH, E - DALLASEGA, P - GUALTIERI, L - DEMARCHI, M. A FIWARE-Based Digital Twin for the Textile & Clothing Sector: The Adalberto Use Case. In: Manufacturing 2030-a perspective to future challenges in industrial production, isiea 2025 and epiem conference 2025, vol 2. [Matt, DT (ed.), Rauch, E. (ed.), Dallasega, P. (ed.), Gualtieri, L. (ed.), DeMarchi, M. (ed.)]. Springer international publishing ag, 2026. ISBN 978-3-032-03721-3, pp. 161-172. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-03722-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-032-03722-0_14)., Registrované v: SCOPUS, WOS Ohlas: zahraničný

#### **AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

AFC01 BALLA, Michal - HAFFNER, Oto - KUČERA, Erik - PAJPACH, Martin. The Synergy of Man and Machine: the New Human-Centric Dimension of Digital Twin. In Cybernetics & Informatics (K&I) 2025 : 32nd International IEEE conference. Mikulov, Czech Republic. February 2-5, 2025. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2025, S. 132-137. ISSN 2767-875X. ISBN 979-8-3315-4181-1. V databáze: DOI: 10.1109/KI64036.2025.10916471 ; SCOPUS: 2-s2.0-105011825199 ; WOS: 001505290600023 ; IEEE: 10916471. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2 Ohlasy:

1. [1] PONCE, Pedro - MALDONADO-ROMO, Javier - ANTHONY, Brian W. - BRADLEY, Russel - MONTESINOS, Luis. A Symbiotic Digital Environment Framework for Industry 4.0 and 5.0: Enhancing Lifecycle Circularity. In: Eng, 2025, vol. 6, iss. 12, art. no. 355. e-ISSN 2673-4117. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6120355>., Registrované v: WOS Ohlas: zahraničný

AFC02 HAFFNER, Oto - FARKAŠOVÁ, Eunika - BALLA, Michal - KUČERA, Erik. Mystery of the Pixel: Educational Game on Basic of Computer Vision. In Cybernetics & Informatics (K&I) 2025 : 32nd International IEEE conference. Mikulov, Czech Republic. February 2-5, 2025. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2025, S. 37-42. ISSN 2767-875X. ISBN 979-8-3315-4181-1.

V databáze: DOI: 10.1109/KI64036.2025.10916445 ; SCOPUS: 2-s2.0-105011826102 ; WOS: 001505290600007 ; IEEE: 10916445. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

## AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

1. AFD01 BALLA, Michal - HAFFNER, Oto. On the Verge of Human-Centric Digital Twin. In ELITECH '24 [elektronický zdroj] : 26th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. May 29, 2024. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2024, [8] s. ISBN 978-80-227-5409-5. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: V2

## BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

1. BEF01 BALLA, Michal - HAFFNER, Oto - KUČERA, Erik - CIGÁNEK, Ján. Creating a digital twin of the production line in TIA portal, unity and game4automation framework. In ELITECH '23 [elektronický zdroj] : 25th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. May 31, 2023. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, [9] s. ISBN 978-80-227-5298-5. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: O2
2. BEF02 BALLA, Michal - HAFFNER, Oto - KUČERA, Erik - CIGÁNEK, Ján. Digital twin of the production line in Tia portal, unity and Game4Automation framework. In AI&VR : 1st International Workshop Artificial Intelligence & Virtual Reality 2023. Bratislava, Slovakia. June 27, 2023. 1. ed. Bratislava : Slovak Chemical Library, 2023, S. 64-77. ISBN 978-80-8208-105-6. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: O2

Štatistika: kategória publikačnej činnosti do 2021		
ADC	Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	2
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	1
BEF	Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)	2
<b>Súčet</b>		<b>6</b>

Štatistika: kategória ohlasov od 2022		
1	Citácia v publikácii registrovaná v citačných indexoch (Zahraničné)	35
2	Citácia v publikácii vrátane citácie v publikácii registrovanej v iných databázach okrem citačných indexov (Zahraničné)	13
<b>Súčet</b>		<b>48</b>

Zdroje metrik: Clarivate, Scopus a Journalmetrics

# Zoznam použitej literatúry

- [1] J Bender et al. „Closed-Loop-Engineering—Enabler for swift reconfiguration in plant engineering“. In: *European Modeling and Simulation Symposium*. 2019. URL: <https://doi.org/10.46354/i3m.2019.emss.021>.
- [2] Andrzej Burghardt et al. „Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins“. In: *Applied Sciences* 10.2 (2020). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app10020486. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/486>.
- [3] *Digital twin for virtual commissioning*. Available online: <https://quality-automation.de/en/digital-twin-of-a-model-for-virtual-commissioning/> (accessed on 23 January 2024).
- [4] Eclipse Foundation. *Eclipse AASX Package Explorer and Server*. Projektová stránka: Eclipse AASX Package Explorer and Server (AASPE/AASX Server). Eclipse Digital Twin. URL: <https://projects.eclipse.org/projects/dt.aaspe> (cit. 25.01.2026).
- [5] EMQX Team. *Mosquitto MQTT Broker: Pros/Cons, Tutorial, and Alternative*. Blog post (MQTT broker comparison and tutorial). EMQX. 21. aug. 2023. URL: <https://www.emqx.com/en/blog/mosquitto-mqtt-broker-pros-cons-tutorial-and-modern-alternatives> (cit. 25.01.2026).
- [6] TI Erdei, R Krakó a G Husi. „Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm“. In: *Appl. Sci.* 12 (2022), s. 8862. URL: <https://doi.org/10.3390/app12178862>.
- [7] M Fallaha, O Korhan a Q Zeeshan. „Virtual reality: A possibility for training operator 4.0“. In: *Industrial Engineering in the Internet-of-Things World*. Cham, Switzerland: Springer, 2022, s. 335–347.
- [8] fischertechnik GmbH. *Multi Working Station with Furnace 24V*. Art.-No. 536632. fischertechnik. URL: <https://www.fischertechnik.de/en/products/industry-and-universities/training-models/536632-multi-working-station-with-furnace-24v> (cit. 25.01.2026).
- [9] Gaurav Garg, Vladimir Kuts a Gholamreza Anbarjafari. „Digital Twin for FANUC Robots: Industrial Robot Programming and Simulation Using Virtual Reality“. In: *Sustainability* 13.18 (2021). ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su131810336. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10336>.
- [10] I Halenar et al. „Virtualization of Production Using Digital Twin Technology“. In: *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. IEEE. 2019, s. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765940>.

- [11] J.B. Hauge et al. „Employing digital twins within production logistics“. In: (15–17 June 2020), s. 1–8. DOI: 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198540. URL: <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198540>.
- [12] *How digital twins could transform the supply chain*. Available online: <https://www.linkedin.com/pulse/how-digital-twins-could-transform-supply-chain-stargo-co> (accessed on 22 January 2024). 2023.
- [13] Industry40tv. *OPC UA PubSub: What it is and How it Works? (OPC UA Over MQTT)*. Video na YouTube. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=eTAK9noFHWE> (cit. 25.01.2026).
- [14] iPC2U s.r.o. *Co je MQTT a k čemu slouží ve IIoT? Popis protokolu MQTT*. Online článok (CZ). iPC2U s.r.o. URL: <https://ipc2u.cz/blogs/news/mqtt-protokol> (cit. 25.01.2026).
- [15] S.M. Jeon a S. Schuesslbauer. „Digital Twin Application for Production Optimization“. In: *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Singapore, 14–17 December 2020, s. 542–545. DOI: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874. URL: <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309874>.
- [16] J Koch, M Gomse a T Schüppstuhl. „Digital game-based examination for sensor placement in context of an Industry 4.0 lecture using the Unity 3D engine—A case study“. In: *Procedia Manuf.* 55 (2021), s. 563–570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.077>.
- [17] JAN KUBR et al. „CONNECTING A VIRTUAL PRODUCTION AND A PLC“. In: *MM Science Journal* 2021.2 (jún 2021), s. 4452–4462. ISSN: 1805-0476. DOI: 10.17973/mmsj.2021\_6\_2021007. URL: [http://dx.doi.org/10.17973/MMSJ.2021\\_6\\_2021007](http://dx.doi.org/10.17973/MMSJ.2021_6_2021007).
- [18] V Kuts et al. „Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool“. In: *Robotics* 11 (2022), s. 113. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics11050113>.
- [19] V Kuts et al. „Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality“. In: *J. Mach. Eng.* 19 (2019), s. 128–144. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.0464>.
- [20] J. Lehmann et al. „The Anatomy of the Internet of Digital Twins: A Symbiosis of Agent and Digital Twin Paradigms Enhancing Resilience (Not Only) in Manufacturing Environments“. In: *Machines* 11 (2023), s. 504. DOI: 10.3390/machines11050504.

- [21]L. Li, Z. Hu a X. Yang. „Intelligent Analysis of Abnormal Vehicle Behavior Based on a Digital Twin“. In: *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)* 26 (2021), s. 587–597. DOI: 10.1007/s12204-021-2348-7.
- [22]Letácio Lins. *The Complete Practical Guide to Siemens Tia Portal Programming*. Online tutorial. SolisPLC. URL: <https://www.solisplc.com/tutorials/a-practical-guide-to-siemens-tia-portal-programming> (cit. 25.01.2026).
- [23]A. Lober et al. „Improving the Engineering Process of Control Systems Based on Digital Twin Specifications“. In: *2022 4th International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM)*. Port Louis, Mauritius, 22–24 November 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/ELECOM54934.2022.9965259.
- [24]Yuqian Lu et al. „Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0“. In: *Journal of Manufacturing Systems* 62 (2022), s. 612–627. ISSN: 0278-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.02.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612522000164>.
- [25]J A de Marchi a E H Baalbergen. „Towards a human-centric Digital Twin architecture for Industry 5.0: Aiding skilled operators with composites production automation“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2526.1 (jún 2023), s. 012047. ISSN: 1742-6596. DOI: 10.1088/1742-6596/2526/1/012047. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2526/1/012047>.
- [26]N Meier et al. „Digital twin support for laser-based assembly assistance“. In: *14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Zv. 99. 2021, s. 460–465. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.066>.
- [27]A.F. Mendi. „A Digital Twin Case Study on Automotive Production Line“. In: *Sensors* 22 (2022), s. 6963. DOI: 10.3390/s22186963. URL: <https://doi.org/10.3390/s22186963>.
- [28]Mitsubishi Electric Europe B.V. *CODESYS*. e-F@ctory Alliance partner page (Slovensko). Mitsubishi Electric. URL: <https://sk.mitsubishielectric.com/fa/solutions/efactory/alliance/partner/codesys> (cit. 25.01.2026).
- [29]J Nosek a J Arm. In: (2022).
- [30]OPC Foundation. *OPC 30270: Industry 4.0 Asset Administration Shell — 4.1 Introduction to the Asset Administration Shell*. Ver. 1.00. OPC UA Companion Specification (I4AAS), section 4.1. OPC Foundation. 15. jún 2021. URL: <https://reference.opcfoundation.org/I4AAS/v100/docs/4.1> (cit. 25.01.2026).
- [31]OPC Foundation. *OPC UA Specification: Core — Part 14: PubSub (Version 1.04)*, Section 7.2.3. Online reference documentation (OPC UA Core, Part 14: PubSub).

- OPC Foundation. URL: <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part14/v104/docs/7.2.3> (cit. 25.01.2026).
- [32]OPC Foundation. *UA-IIoT-StarterKit*. Open-source repozitár (GitHub). OPC Foundation. URL: <https://github.com/OPCFoundation/UA-IIoT-StarterKit> (cit. 25.01.2026).
- [33]PTC. *What is OPC UA? | OPC Unified Architecture (UA)*. Webová stránka (prehľad OPC UA). PTC. URL: <https://www.ptc.com/en/technologies/iiot/industrial-automation/opc/opc-ua> (cit. 25.01.2026).
- [34]H. Sangvik. *Digital Twin of 3d Motion Compensated Gangway Use of Unity Game Engine and TwinCAT PLC Control for Hardware-in-the-Loop Simulation*. 2023. URL: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/handle/11250/2826477>.
- [35]R.L. Sapena. „Industry 4.0 through Fischertechnik and a Digital Twin“. Luzern, Switzerland: Lucerne University of Applied Sciences, 2020.
- [36]G Schroeder et al. „Visualising the digital twin using web services and augmented reality“. In: *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2016, s. 522–527. URL: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2016.7819217>.
- [37]Siemens AG. *OPC UA PubSub with SIMATIC S7-1500 based on MQTT*. Support entry page (Entry ID: 109797826). Siemens Industry Online Support. Nov. 2021. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109797826/opc-ua-pubsub-with-simatic-s7-1500-based-on-mqtt> (cit. 25.01.2026).
- [38]Siemens AG. *Siemens Industry Online Support: PD 1647412*. Product/Download page (PD 1647412). Siemens Industry Online Support. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/pd/1647412?pdti=td&d1=en&lc=en-SK> (cit. 25.01.2026).
- [39]S Solmaz et al. „A practical development of engineering simulation-assisted educational AR environments“. In: *Educ. Chem. Eng.* 35 (2021), s. 81–93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.007>.
- [40]M. Thürer, S.S. Li a T. Qu. „Digital Twin Architecture for Production Logistics: The Critical Role of Programmable Logic Controllers (PLCs)“. In: *Procedia Comput. Sci.* 200 (2022), s. 710–717. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.269>.
- [41]Mai Anh Tuan. *Comparison of different digital twin implementation concepts and implementation concept for a Fischertechnik industry 4.0 demonstrator*. 2021.
- [42]TURCK. *CODESYS*. Produktová/partnerská stránka o CODESYS na portáli TURCK (CZ). TURCK. URL: <https://www.turck.cz/cs/codesys-38909.php> (cit. 25.01.2026).

- [43]H. Wang et al. „Development of three dimensional virtual PLC experiment model based on Unity3D“. In: *Proceedings of the 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS)*. Harbin, China, mar. 2017, s. 1–4. DOI: 10.1109/EIIS.2017.8298660. URL: <https://doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298660>.
- [44]H.j. Wang a Z.f. Wang. „Research on PLC Simulation Teaching Platform Based on Unity“. In: *Proceedings of the 2020 International Conference on Intelligent Design (ICID)*. Xi'an, China, nov. 2020, s. 15–18. DOI: 10.1109/ICID52250.2020.00011. URL: <https://doi.org/10.1109/ICID52250.2020.00011>.
- [45]Z. Wang, K. Han a P. Tiwari. „Digital Twin Simulation of Connected and Automated Vehicles with the Unity Game Engine“. In: *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. Beijing, China, 15 July–15 August 2021, s. 1–4. DOI: 10.1109/DTPI52967.2021.9540074.
- [46]Yue Yin et al. „A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 81 (2023), s. 102515. ISSN: 0736-5845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102515>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584522001971>.
- [47]Jun Zhang a Yonghang Tai. „Secure medical digital twin via human-centric interaction and cyber vulnerability resilience“. In: *Connection Science* 34.1 (dec. 2021), s. 895–910. ISSN: 1360-0494. DOI: 10.1080/09540091.2021.2013443. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/09540091.2021.2013443>.
- [48]K Židek et al. „Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept“. In: *Sustainability* 12 (2020), s. 3658. URL: <https://doi.org/10.3390/su12093658>.