

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Martin Pajpach

Autoreferát dizertačnej práce

Interoperabilné digitálne dvojča pre Industry 4.0

na získanie akademického titulu

„doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe:	Mechatronicke systémy
v študijnom odbore:	kybernetika
forma štúdia:	denná

Miesto a dátum: Bratislava, 21.5.2024

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves

Predkladateľ:

Ing. Martin Pajpach
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves

Školiteľ:

doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves

Oponenti:

Ing. Ivana Budinská, PhD.
Ústav informatiky
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 07 Bratislava

Ing. Juraj Štefanovič, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky
Fakulta informatiky
Paneurópska vysoká škola
Tomášikova 20, 820 09 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o
hod. na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova
2961, 841 04 Karlova Ves, v miestnosti

.....
prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

ANOTÁCIA

Slovenská technická univerzita v Bratislave

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný odbor: kybernetika
Študijný program: Mechatronické systémy
Autor: Ing. Martin Pajpach
Dizertačná práca: Interoperabilné digitálne dvojča pre Industry 4.0
Vedúci práce: doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.
Mesiac a rok odovzdania: máj 2024

Kľúčové slová: Industry 4.0, interoperabilita, sémantika, digitálne dvojča, 3D engine, OPC UA, AAS, smart manufacturing

Rozvoj Industry 4.0, najmä v oblastiach interoperability a návrhu, implementácie a používania digitálnych dvojčiat (DT), je v posledných rokoch enormný. Táto práca sa venuje trom kľúčovým aspektom, ktoré so sebou Industry 4.0 prináša – virtualizácii prostredníctvom digitálnych dvojčiat, interoperabilite založenej na štandarde OPC UA a využitíu komponentov Industry 4.0 – Asset Administration Shell (AAS). Pre účely vývoja a vzdelávania bol vypracovaný návrh edukačno-vývojovej platformy (EVP) interoperabilných digitálnych dvojčiat (I-DT), v ktorej sa vhodne prepájajú kľúčové atribúty Industry 4.0 v jeden celok. Podľa navrhutej architektúry bola vypracovaná metodika pre tvorbu platformy I-DT. Na základe vypracovanej metodiky bola zrealizovaná pilotná implementácia otestovaná na priemyselných technológiách. Platforma I-DT využíva otvorené a cenovo dostupné technológie, napĺňa atribúty Industry 4.0, ako sú interoperabilita, virtualizácia, rekonfigurovateľnosť, modularita a orientácia na služby. Platforma je otvorená pre ďalší vývoj digitálnych technológií.

ABSTRACT

Slovak University of Technology in Bratislava
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION
TECHNOLOGY

Study Branch: cybernetics
Study Programme: Mechatronic systems
Author: Ing. Martin Pajpach
Dissertation Thesis: Interoperable digital twin for Industry 4.0
Supervisor: doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.
Submitted: May 2024

Keywords: Industry 4.0, interoperability, semantics, digital twin, 3D engine, OPC UA, AAS, smart manufacturing

The development of Industry 4.0, especially in the areas of interoperability and the design, implementation and use of digital twins (DTs), has been tremendous in recent years. This thesis addresses three key aspects of Industry 4.0 - virtualization through digital twins, interoperability based on the OPC UA standard and the use of Industry 4.0 Components - Asset Administration Shell (AAS). An Education-development Platform (EDP) of Interoperable Digital Twins (I-DT) has been designed to conveniently combine the key attributes of Industry 4.0 into a single entity. According to the proposed architecture, a methodology for the creation of the I-DT platform has been developed. Based on the developed methodology, a pilot implementation was carried out and tested on industrial technologies. The I-DT platform uses open and affordable technologies, fulfils Industry 4.0 attributes such as interoperability, virtualization, reconfigurability, modularity and service orientation. The platform is open for further development of digital technologies.

OBSAH

Úvod.....	8
1. Digitálne dvojča a Interoperabilita v Industry 4.0.....	10
1.1. Digitálne dvojča	10
1.2. Interoperabilita v Industry 4.0	12
2. Súčasný stav	14
2.1. Aplikácie digitálnych dvojčiat v priemyselnej oblasti	14
2.2. Aplikácie digitálnych dvojčiat v oblasti vzdelávania a vývoja	16
2.3. Nástroje na tvorbu digitálnych dvojčiat	18
2.4. Zhrnutie súčasného stavu.....	19
3. Návrh edukačno-vývojovej platformy pre tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat	20
4. Implementácia a overenie platformy.....	23
4.1. Vytvorenie digitálneho opisu vo forme AAS	23
4.2. Vytvorenie OPC UA servera z AAS.....	26
4.3. Vytvorenie virtuálnej výrobnjej linky v Unity.....	27
4.4. Tok dát a informácií	27
4.5. Aspekt dát a servisov	30
4.6. Životný cyklus I-DT	31
4.7. Overenie platformy.....	32
4.8. Viacero co-simulačných modelov súčasne	34
Prínosy dizertačnej práce.....	35

Záver	37
Literatúra.....	39
Vlastná publikačná činnosť	45

Úvod

Rapidný rozvoj inteligentných, digitálnych technológií viedol k predstaveniu štvrtjej priemyselnej revolúcie - Industry 4.0 (I4.0). Jej víziou bola transformácia priemyslu na Smart Factories, ktoré dokážu rýchlo a flexibilne reagovať a prispôbiť sa meniacim sa požiadavkám zákazníkov. Kľúčovým pre I4.0 je stavanie na známych konceptoch digitalizácie, virtualizácie, prepojenosti a porozumeniu komunikujúcich systémov - interoperabilite, autonómnosti, ale aj komponentoch ako Cyber-Physical Systems (CPS), Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS), či Digital Twin (DT) [1], [2]. Hermann, et al. prezentovali v článku *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review* [3] **šesť atribútov I4.0**, zobrazených na Obrázok 1 v strede – **interoperabilita, virtualizácia, decentralizácia, real-time kapabilita, orientácia na služby a modularita**.



Obrázok 1: Šesť atribútov I4.0 (v strede) spolu s technológiami využívanými k ich implementácii (vonkajšia časť)

Predmetom práce je edukačno-vývojová platforma (EVP) pre tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat (I-DT). Hlavnou motiváciou je potreba vzdelávať odborníkov s digitálnymi kompetenciami pre Industry 4.0 nielen teoreticky ale hlavne prakticky. Digitálne technológie pre I4.0 predstavujú komplexnú a multidisciplinárnu problematiku – konvergenciu modernej automatizácie a informačno-komunikačných technológií (IKT). Koncept I4.0 odstraňuje doterajšie hranice medzi operačnými technológiami (OT) a informačnými technológiami (IT). Klasické vzdelanie v IT oblasti alebo v automatizácii už nestačí, hoci môže byť dobrým východiskom pre nové požiadavky na odborné kompetencie v kvalitatívne novom prístupe označovanom tiež ako 4. priemyselná revolúcia.

Prvá kapitola sa zaoberá všeobecným úvodom do problematiky digitálnych dvojčiat a interoperability pre Industry 4.0. V druhej kapitole je predstavený súčasný stav aplikácií a nástrojov na tvorbu digitálnych dvojčiat v oblasti priemyslu a vzdelávania a vývoja. Tretia kapitola sa venuje špecifikácii požiadaviek pre návrh a implementáciu platformy na tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat. Na základe požiadaviek je ďalej predstavený koncept platformy. Štvrtá kapitola opisuje implementáciu platformy na základe predstaveného konceptu a jej overenie. V závere sú zhrnuté hlavné prínosy dizertačnej práce.

1. Digitálne dvojčta a Interoperabilita v Industry 4.0

Úvodná kapitola sa zaoberá všeobecným úvodom do problematiky digitálnych dvojčiat (DT) a interoperability v Industry 4.0 (I4.0).

1.1. Digitálne dvojčta

Technológia digitálnych dvojčiat, v angl. Digital Twin (DT), umožňuje vytváranie čo najvernejších kópií fyzických entít (produktov, aktív, komponentov, procesov alebo systémov) vo virtuálnom svete. Využíva pri tom technológie ako virtualizácia a digitalizácia dát, umelá inteligencia (AI) a strojové učenie (ML) pre účely analýzy dát, optimalizácie a predikcie, IoT, či nepretržitá interoperabilná, zabezpečená komunikácia fyzickej a virtuálnej entity pre umožnenie neustálych optimalizácií oboch entít navzájom – ide teda o živý systém [4]. Vhodným prepojením týchto technológií tvorí DT základ pre budovanie Smart Factory v koncepte Industry 4.0 (I4.0).

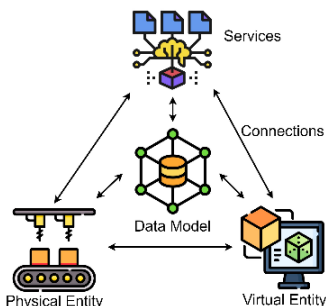
V závislosti od existencie komunikačného kanálu medzi virtuálnym a reálnym svetom a schopnosti virtuálnej a reálnej entity vymieňať si údaje jedno- či obojsmerne rozlišujeme 3 základné formy virtuálnej reprezentácie reálneho objektu [5], [6], [7]:

- digitálny model - digitálna reprezentácia fyzického systému bez komunikácie dát,
- digitálny tieň - jednosmerná komunikácia dát z reálnej entity do virtuálnej - zmeny fyzického systému sa dynamicky prejavujú vo virtuálnej entite, avšak virtuálna entita nie je schopná ovplyvniť reálny systém,
- **digitálne dvojčta** - obojsmerná komunikácia medzi reálnou a virtuálnou entitou - virtuálna entita je schopná dynamicky ovplyvňovať reálnu entitu.

Po stránke architektúry obsahuje DT tri základné komponenty [5], [7], [8]:

- **fyzičná entita** – zabezpečuje zber dát z reálneho systému pomocou snímačov, ich spracovanie využitím edge computingu a reakcie pomocou akčných členov,
- **virtuálna entita** – využíva virtuálny model, AI a machine learning (ML) algoritmy, databázy na uchovanie dát a taktiež správu a prácu s big data,
- **obojsmerná komunikácia medzi fyzickou a virtuálnou entitou** – sprostredkovaná pomocou zabezpečených komunikačných protokolov, ktoré okrem samotnej výmeny dát (v štandardizovanom formáte) zaisťujú taktiež dostatočnú bezpečnosť a ochranu dát pred útokmi.

V rámci konceptu DT možno zvýrazniť význam aspektu dát a servisov ich osamostatnením, čím sa rozšíri pôvodný koncept architektúry na tzv. **5D Digital Twin (5D-DT)** [9], [10], Obrázok 2. Aspekt servisov zahŕňa nielen nástroje pre reálnu entitu využívané napr. za účelom optimalizácie či predikcie, ale tiež servisy pre virtuálnu entitu zabezpečujúce vysokú dôveryhodnosť dát a synchronizáciu parametrov. Aspekt dát reprezentuje, okrem bežne zbieraných dát z reálnej entity, tiež dáta z virtuálnej entity, servisov, digitálnych opisov, domain knowledge a ich vzájomné prepojenie a interakciu.



Obrázok 2: Koncept 5D-DT

1.2. Interoperabilita v Industry 4.0

Schopnosť výmeny údajov medzi jednotlivými systémami je kľúčová pre Industry 4.0. O to viac v koncepte DT, pre ktoré je obojsmerná výmena dát medzi reálnou a virtuálnou entitou základným stavebným prvkom. Pre účely dosiahnutia jednoznačného vzájomného pochopenia komunikujúcich systémov – interoperability, je potrebná štandardizácia.

Základom pre budovanie interoperability je model referenčnej architektúry, ktorý definuje a zjednocuje základné pojmy pre I4.0, umiestnenie a vzťahy jednotlivých aspektov. V Európe je používaný *Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI 4.0)* [11]. Model RAMI 4.0 predstavuje trojrozmernú štruktúru, ktorá je použitá pri systematickom vývoji v koncepte I4.0 [12]. Pozostáva z troch dimenzií:

- Layers – reprezentuje pohľad na to isté aktívum z rôznych perspektív v koncepte I4.0. Každá vrstva charakterizuje odlišnú časť aktíva, ako napr. funkčnú, informačnú, komunikačnú,
- Life Cycle & Value Stream – reprezentuje životný cyklus produktu alebo systému na základe štandardu IEC 62890 a hodnotový tok naprieč celým životným cyklom. Odlišuje medzi produktom vo fáze **Type**, ktorá zahŕňa návrh, konceptualizáciu, vývoj produktu až po vývin prototypu. Prechodom do fázy **Instance** sa začína bežné užívanie produktu, jeho sériová výroba, údržba, prípadne optimalizácia až po vyradenie a ukončenie životného cyklu produktu.
- Hierarchy Levels – reprezentuje hierarchické usporiadanie funkčných celkov systému podľa štandardov IEC 62264 a IEC 61512.

Kľúčovú rolu pri dosiahnutí interoperabilnej komunikácie a výmeny dát má štandard *Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)* [13], [14]. Predstavuje spôsob, ako možno v koncepte I4.0 dosiahnuť interoperabilitu a kompatibilitu dát naprieč všetkými hierarchickými úrovňami modelu RAMI 4.0. Jednotlivé celky tak spolu dokážu flexibilne

komunikovať bez potreby ďalších prostredníkov, čo je základom pri budovaní Smart Factory. OPC UA zahŕňa základné funkcie špecifických typov prístupov k dátam, ktoré boli v klasickom OPC riešené osobitnými špecifikáciami, ako OPC Data Access, OPC Historical Data Access či OPC Alarms & Events [15]. K hlavným charakteristikám štandardu patria platformová nezávislosť, servisne-orientovaná architektúra, integrovaná bezpečnosť formou „secure-by-design“, „future-proof“ dizajn, prístup k dátam pomocou klient-server a publisher-subscriber architektúry [14], [16], [17].

OPC UA predstavuje štandard v komunikácii v rámci I4.0 aj vďaka **OPC UA informačnému modelu** [18], [19], [20], ktorý prináša konzistentnosť dát. Možno ním digitálne opísať aj komplexné štruktúry hardvéru či softvéru v štandardizovanom formáte a poskytnúť tak holistický pohľad na systém. Štruktúru OPC UA informačného modelu predpisuje OPC UA Metamodel - definuje základné koncepty, pravidlá a bázu pre tvorbu informačných modelov. OPC UA informačný model ďalej tvorí základ adresného priestoru OPC UA servera. Jednotlivé objekty informačného modelu sú v adresnom priestore reprezentované uzlami - nodes s unikátnymi NodeId a pomocou vzťahov - relations medzi nimi.

Administratívna schránka aktíva, *Asset Administration Shell (AAS)* [21], [22], predstavuje štandardizovaný spôsob vytvárania digitálnych opisov aktív v rámci Industry 4.0. AAS je nositeľom kompletného digitálneho opisu aktíva a jeho funkcionalít a je schopné poskytnúť tieto informácie ďalej informačnému svetu. Predstavuje spôsob tvorby **Komponentu I4.0**, ktorý je kombináciou aktíva a jeho digitálnej reprezentácie. Jednotlivé celky informácií sú v AAS rozdelené na Submodely.

2. Súčasný stav

Kapitola zachytáva aktuálny stav poznania v oblasti aplikácií a nástrojov na tvorbu digitálnych dvojčiat v oblasti priemyslu a vzdelávania a vývoja pre Industry 4.0.

2.1. Aplikácie digitálnych dvojčiat v priemyselnej oblasti

Goo-Young, et al. prezentujú v článku *Customized Digital Twin Platform for SMEs in South Korea* [23] návrh cloudovej DT platformy (CDTP), ktorá umožňuje malým a stredným podnikom (SMEs) v Južnej Kórei priblížiť sa k inováciám, ktoré so sebou prináša Smart Factory. Platforma poskytuje možnosti real-time monitorovania, diagnostiky a simulačnej predikcie. Na prenos dát je využitý autormi navrhnutý interface, ktorý by chceli v budúcnosti nahradiť komunikačným rozhraním založeným na štandardizovaných informačných modeloch, ktoré ponúka OPC UA a Asset Administration Shell (AAS).

Článok *Design of Virtual Engineering and Digital Twin Platform as Implementation of Cyber-Physical Systems* [24] autorov Falah, et al. predstavuje prototyp platformy pre tvorbu DT zameraný na podporu tovární v Indonézii pre posun k Industry 4.0. Predstavená platforma pozostáva z troch častí – 3D reprezentácie fyzického systému, modulu virtuálneho prostredia, ktorý je kľúčovou časťou celej platformy a interaktívnej vizualizácie. Autori využili cloudovú implementáciu s vizualizáciou vo virtuálnej realite (VR) doplnenú o služby sprostredkujúce prediktívnu analýzu a optimalizáciu fyzického procesu pre účely rozhodovania. Platforma však nevyužíva štandardizovaný spôsob komunikácie dát v Industry 4.0 a základom reprezentácií fyzického systému nie sú digitálne opisy, napríklad vo forme Asset Administration Shell (AAS), čo môže viesť k nekonzistentnosti dát naprieč rôznymi implementáciami.

Kasper, et al. v článku *Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems* [9] predstavujú návrh 5D-DT platformy pre industriálny energetický systém. Jednou z hlavných požiadaviek na platformu bolo zabezpečenie obojsmernej automatickej výmeny dát, ktorá je kľúčová najmä pri dynamických a rýchlo sa meniacich systémoch. Druhou požiadavkou bola schopnosť DT ovplyvňovať reálny systém. Keďže sa jedná živé systémy, ktoré by mali byť v prevádzke veľmi dlhú dobu, tak je potrebná tiež modularita, škálovateľnosť a robustnosť. Kľúčovým je využitie štandardizovaných postupov vytváranie digitálnych opisov aktív v rámci ich funkcionality a schopnosť poskytnúť tieto dáta ďalej do informačného sveta, čo zabezpečuje využitie Asset Administration Shell (AAS).

V článku s názvom *Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard* [25] autori Pang, et al. analyzujú prácu a výzvy spojené s BigData generovanými digitálnymi dvojčatami. Zameriavajú sa na proces práce s týmito dátami, ich spracovanie a uchovávanie. Autori prezentujú príklad vytvorenia frameworku, v ktorom integrujú DT vo fázach prototypovania a prevádzky spojené digitálnym vláknom (DTH). DTH slúži na zdieľanie informácií počas celého životného cyklu produktu. Je preto nevyhnutné zabezpečiť homogénnosť, ľahký prístup a vzájomné porozumenie dátam – interoperabilitu, či vo fáze dizajnu a plánovania, vo fáze využívania a údržby, ako aj pri komunikácii s dodávateľmi a zákazníkmi.

V článku *Development of a digital twin operational platform using Python Flask* [26] je autormi Bonney, et al. prezentovaný návrh DT platformy DTOP-Cristallo. V návrhu platforma zbiera údaje z IoT zariadení, ktoré vie následne sprostredkovať používateľovi vo webovej aplikácii. Platforma využíva možnosti cloud-computingu pre centralizovaný zber dát a vykonávanie simulácií pre účely decision-makingu. Platforma však neposkytuje spôsob

spätnej interakcie virtuálnej entity do reálneho prostredia na základe výsledkov simulácie, možno tak hovoriť o aplikácii digitálneho tieňa.

Autori Redeker, et al. predstavujú vo svojom článku *Towards a Digital Twin Platform for Industrie 4.0* [27] návrh riešenia DT platformy zefektívňujúcej vývoj, nasadenie a prevádzku služieb pre business vrstvu v oblasti I4.0. Svoje riešenie stavajú na mikroslužbovej architektúre a štandardizácii dát vo forme OPC UA a Asset Administration Shell (AAS), ktorá je základom interoperability ich platformy a vzájomné porozumenie stakeholderov. Mikroslužby umožňujú ľahký prístup k dátam pre účely analýzy odkiaľkoľvek, zároveň vďaka metóde Continuous Integration / Continuous Deployment (CI/CD) je zabezpečená ich rýchlá rekonfigurovateľnosť a opätovné nasadenie. Nedostatkom platformy však je, že neposkytuje priamu spätnú väzbu do procesu na základe výsledkov analýz dát, ktoré z neho prišli.

Yasin, et al. publikovali článok *A Roadmap to Integrate Digital Twins for Small and Medium-Sized Enterprises* [28], v ktorom sa zamerali na prezentáciu, ako môže byť technológia DT prínosná pre malé a stredné podniky (SMEs). V ich článku, kde uvádzajú príklad DT riadenia servomotora v závislosti od snímanej teploty, využívajú komunikačný štandard OPC UA. Jeho využitie vnímajú ako nevyhnutné pri komunikácii priemyselných zariadení a PLC, nakoľko prináša interoperabilitu a kompatibilitu s väčšinou existujúceho hardvéru a softvéru v priemyselnej výrobe, čo ponúka SMEs všestrannosť pri voľbe hardvéru a softvéru. Taktiež bezpečnosť, ktorú OPC UA poskytuje, bola kľúčovou pri jeho výbere, keďže zabezpečuje zachovanie dôvernosti údajov.

2.2. Aplikácie digitálnych dvojčiat v oblasti vzdelávania a vývoja

Autori Erdei, et al. v článku *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm* [29] navrhli a vytvorili škálovateľné virtuálne

robotické pracovisko, ktoré má slúžiť pre účely výučby práce s robotickým ramenom. Keďže je celá realizácia čisto virtuálna nie je limitovaná priestorovými požiadavkami a umožňuje tiež paralelnú prácu viacerých používateľov nezávisle. Prezentovaný koncept testovali a vyhodnotili, že je prínosný v edukačnom procese. Autori predstavujú dané riešenie ako realizáciu digitálneho dvojčata, pričom toto neobsahuje žiadnu fyzickú entitu a teda ani možnosť virtuálnej entity na ňu spätne vplyvať.

V článku *Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool* [30] predstavujú autori Kuts, et al. návrh výučbového pracoviska robotiky vo virtuálnej realite. Virtuálne pracovisko predstavuje vernú kópiu fyzického pracoviska, pričom cieľom autorov bolo vyhodnotiť faktory ako porovnanie doby, ktorú trvá dokončiť úlohu v reálnom verzus virtuálnom prostredí, či akú dobu trvá používateľom používanie a sústredenie sa na jednotlivé príkazy vo virtuálnom používateľskom rozhraní. Navrhnuté pracovisko dokáže pracovať v režime pripojenom k robotovi, kedy sa informácie z virtuálneho robota prenášajú do reálneho, a v režime offline. Autori prezentujú sľubné výsledky ich pozorovania pri porovnaní jednotlivých meraných metrík. Platforma však v žiadnom z prezentovaných režimov neposkytuje možnosť obojsmernej komunikácie dát medzi virtuálnym a fyzickým procesom.

Dôležitosť vzdelávania v oblasti I4.0 a DT je prezentovaná v článku *Low-Cost Digital Twin Approach and Tools to Support Industry and Academia: A Case Study Connecting High-Schools with High Degree Education* [31]. Autori Acker, et al. navrhli nástroj približujúci študentom strednej školy priebeh virtuálneho prototypovania výrobnéj linky, ktorú následne vytvoria využitím 3D tlačne. K linke vytvárajú virtuálnu repliku v prostredí Unity s podporou Robot Operating System (ROS). Virtuálna replika čerpá dáta z reálnych snímačov a vizualizuje priebeh výroby vo virtuálnom prostredí – ide teda o aplikáciu digitálneho tieňa.

2.3. Nástroje na tvorbu digitálnych dvojčiat

Trh poskytuje množstvo pripravených, spoplatnených šablón a nástrojov vhodných pre návrh a realizáciu DT. Väčšina popredných spoločností pôsobiacich na poli automatizácie poskytuje svoj vlastný nástroj [32], [33], pričom platí, že k dispozícii je možnosť modifikácie existujúceho „off-the-shelf“ produktu v závislosti od potrieb zákazníka.

Spoločnosť Bosch poskytuje platformu *Bosch IoT Things* [34], ide o cloudový servis umožňujúci tvorbu DT pre fyzické modely. Tieto môžu obsahovať informácie o fyzickom modeli, ako aj ďalšie informácie o jeho funkcionalite poskytujúce celistvý pohľad na reálny systém, ktorý je vytvorený ako Asset Administration Shell (AAS), ukážku vidieť na Obrázok 12. Informácie sú následne dostupné používateľovi prostredníctvom API. Možno teda hovoriť o nástroji na tvorbu digitálnych tieňov bez spätnej väzby do reálneho prostredia.

Firma IBM ponúka zákazníkom nástroj *IBM Maximo Application Suite* [35], v minulosti tiež IBM Digital Twin Exchange, ktorý slúži ako webový prehliadač pre zozbierané dáta. Možno tu monitorovať aktíva, ich stav pre účely prediktívnej údržby a robiť vizuálnu inšpekciu aktív pomocou strojového videnia na základe vstupných fotografií. Platforma poskytuje nástroje na dohľad nad stavom výroby, nemožno však hovoriť o digitálnom dvojčati.

Riešenie od firmy Siemens *Siemens Digital Enterprise Suite* [36] predstavuje kolaboratívnu platformu pre tvorbu DT. Platforma využíva informácie z ďalších nástrojov od spoločnosti Siemens ako MindSphere. Cieľom je vytvoriť viacero DT pre celý životný cyklus výrobku aj výrobného procesu. Digitálne dvojča výrobku sa vytvára už vo fáze definície a návrhu, čo umožňuje simulovať a overovať vlastnosti výrobku v závislosti od príslušných požiadaviek. Digitálne dvojča výrobného procesu zahŕňa všetky aspekty, od strojov a kontrolerov až po celé výrobné linky vo virtuálnom

prostredí. Výsledky simulácií výrobného procesu môžu viesť k predchádzaniu chýb či optimalizácii výroby a tým k zníženiu nákladov. Digitálne dvojča výkonnosti celej výroby predstavuje komplexný nástroj, ktorý pre účely ďalšej optimalizácie využíva domain-knowledge aj z iných nástrojov, napr. MindSphere.

Nástroj *Factory I/O* [37] umožňuje 3D továrenské simulácie slúžiace k naučeniu automatizačných technológií, ako je programovanie PLC. Umožňuje ale taktiež prácu s mikrokontrolermi, či SoftPLC (počítačovo založené industriálne kontrolery so soft real-time ako napr. Codesys).

Nástroj *realvirtual.io* [38] slúži na vizualizáciu a virtualizáciu automatizovaných systémov. Umožňuje taktiež vývoj v rozšírenej realite (AR) a virtuálnej realite (VR). Zameriava sa na strojné inžinierstvo, podporuje prácu s CAD dátami a integráciu s reálnymi systémami prostredníctvom OPC UA či Siemens S7 protokolu. Nevýhodou je, že nepracuje s konceptom komponentov Industry 4.0 a pre účely extenzívneho vývoja a vzdelávania sa stáva cenovo menej dostupným variantom.

2.4. Zhrnutie súčasného stavu

Ako ukazuje analýza súčasného stavu, nie sú k dispozícii vhodné experimentálne, edukačné platformy pre prácu s komplexnými digitálnymi technológiami, ktoré by stavali na myšlienke interoperability. Nástroje ponúkané automatizačnými firmami predstavujú často cenovo-náročne dostupné „off-the-shelf“ riešenia, blackboxy, ktoré znemožňujú hlbšie pochopenie ich fungovania. Prehľad tiež ukázal, že prezentované nástroje a platformy často ani nespĺňajú podmienky na označenie digitálnym dvojčatom. Podľa našich skúseností existujú rôzne nástroje a komponenty, z ktorých je možné takéto edukačné pomôcky tvoriť, pokiaľ ich návrh prispôbime potrebám a možnostiam vzdelávania.

3. Návrh edukačno-vývojovej platformy pre tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat

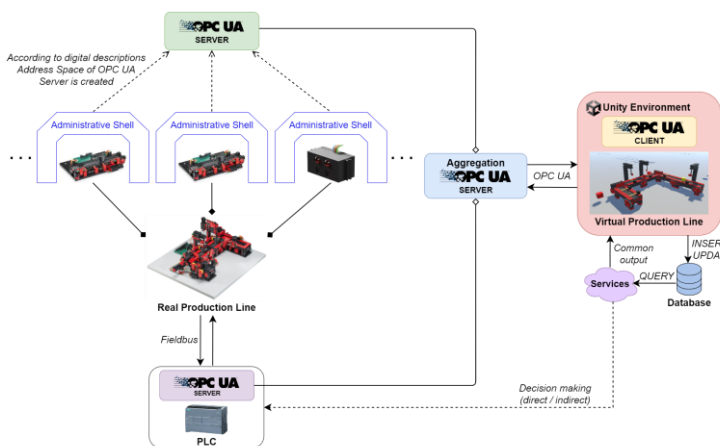
Na základe našej analýzy súčasného stavu, ktorá preukázala, že aktuálne dostupné riešenia - edukačné platformy a nástroje na tvorbu DT, nevyhovujú požiadavkám tvorby DT pre Industry 4.0, sme sa rozhodli pre návrh a vývoj vlastnej platformy.

Boli vyšpecifikované **požiadavky na vytvorenie edukačno-vývojovej platformy (EVP) pre tvorbu interoperabilných DT (I-DT)**:

- zabezpečiť, aby výstup platformy spĺňal požiadavky pre označenie I-DT,
- dodržať súlad s atribútmi I4.0,
- využiť cenovo dostupné komponenty a priemyselne vyrábaný hardvér pre možnosť nákladovo a časovo nenáročnej replikácie riešenia,
- zabezpečiť interoperabilnú komunikáciu v rámci celej platformy,
- zabezpečiť bezpečnosť komunikovaných dát,
- zabezpečiť modularitu a rekonfigurovateľnosť,
- zaručiť otvorenosť platformy pre ďalší výskum a vývoj.

Na základe špecifikovaných požiadaviek bol vytvorený návrh edukačno-vývojovej platformy (EVP) pre tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat (I-DT). Platforma si kladie za cieľ použiť vecne aj **ekonomicky dostupné komponenty**, na ktorých je možné prakticky demonštrovať metodiku tvorby DT a overovať funkčnosť digitálnych technológií. Experimentálna platforma pre I-DT pozostáva z moderných priemyselných riadiacich a komunikačných systémov a reálnej časti výrobnéj linky na báze priemyselne vyrábaného fyzického modelu *Indexed Line with two Machining Stations* od firmy Fischertechnik. **Linka je digitálne modelovaná vo virtuálnej oblasti a riadená v reálnom čase.** Navrhnutá experimentálna platforma **spĺňa atribúty konceptu I4.0**, a to: *interoperabilitu* zabezpečenú využitím

štandardizovaných digitálnych opisov vo forme AAS a otvoreného štandardu OPC UA pre interoperabilnú výmenu dát, *orientáciu na služby a bezpečnosť dát* integrovanú v rámci komunikačného štandardu OPC UA, *modularitu a rekonfigurovateľnosť* a samozrejme *virtualizáciu* umožnenú najmä vo forme vizualizácie a simulácie výrobnjej linky v Unity. Hlavnou črtou použitých digitálnych technológií je ich otvorenosť a u hardvérových komponentov ich priemyselná výroba a ekonomická dostupnosť. Vďaka otvorenosti a interoperabilite je možné navrhnuté I-DT rozširovať a overovať na ňom nové vyvinuté digitálne technológie v súčinnosti s inými už funkčnými technológiami I4.0. Architektúra platformy I-DT je navrhnutá z dostupného hardvéru a digitálnych technológií pre I4.0, Obrázok 3.



Obrázok 3: Architektúra platformy pre tvorbu interoperabilného DT

Na Obrázok 3 možno vidieť ako sú administratívne schránky pre jednotlivé diely linky využité k vytvoreniu OPC UA servera. Štruktúra AAS sa pritom vo vytvorenom OPC UA serveri prejaví vo forme jeho adresného priestoru. **OPC UA server vytvorený na základe digitálneho opisu** spolu s **PLC OPC UA serverom** sú následne zagregované na **agregačnom OPC UA serveri**, ktorý je **jednotným prístupovým bodom** ku všetkým OPC UA serverom

platformy. Agregáčny server vytvára kópiu agregovaných uzlov vo svojom adresnom priestore. Synchronizácia hodnôt uzlov medzi pôvodným uzlom a jeho obrazom na agregáčnom serveri je zabezpečená obojsmernou propagáciou zmien. OPC UA klient EVP je zaregistrovaný na hodnotu uzla agregáčného OPC UA servera, čím je zabezpečená obojsmerná komunikácia. Virtuálna linka je rozšírená o *aspekt dát a servisov*, čím spĺňa požiadavky pre **5D-DT**. Servisy poskytujú platforme nástroje na rozhodovanie – decision-making, ktorý môže byť priamy - direct alebo nepriamy - indirect.

Dôležitým pri návrhu konceptu bol aj pohľad na funkciu digitálneho dvojčaťa v rámci celého výrobného procesu. **Digitálne dvojča nenahrádza riadiaci systém** výrobnej linky (PLC) [39], ktorý musí byť rýchly, reagovať do niekoľkých milisekúnd a zabezpečiť bezpečnú prevádzku. **Digitálne dvojča je omnoho komplexnejšie – zbiera informácie nielen z fyzického procesu, ale tiež berie do úvahy dáta z virtuálnej entity, historické hodnoty, dokumentáciu, ako aj výstupy servisov, ktoré tieto dáta analyzujú.** Na základe komplexného pohľadu môže následne slúžiť ako nástroj pre optimalizáciu výroby, prediktívnu údržbu, testovanie „what-if“ scenárov, ...

Ďalšími požiadavkami pri tvorbe konceptu boli celková otvorenosť platformy a jej ľahká škálovateľnosť. S ohľadom na **otvorenosť platformy** boli volené aj jednotlivé nástroje, ako AASX Package Explorer [40] a AASX Server [41] pri tvorbe kompletného digitálneho opisu výrobnej linky, či fyzikálny engine Unity pre tvorbu virtuálnej repliky výrobnej linky. Za účelom docieľiť **ľahkú škálovateľnosť** platformy bol navrhnutý spôsob rozširovania virtuálnej výrobnej linky na princípe Plug&Produce. Virtuálnu výrobnú linku možno jednoducho rozšíriť pridaním nových digitálnych opisov pre ďalšie časti linky bez potreby ďalšej inštalácie či reštartu celej platformy.

4. Implementácia a overenie platformy

Fázu implementácie možno rozdeliť na časť vytvorenia digitálnych opisov pre jednotlivé časti výrobnjej linky vo forme AAS, na časť využitia týchto AAS pre vytvorenie adresného priestoru OPC UA servera, na časť vytvorenia virtuálnej výrobnjej linky v Unity na základe informácií na OPC UA serveri, na časť návrhu a implementáciu obojsmernej komunikácie medzi virtuálnou a reálnou výrobnou linkou a na časť rozšírenia o aspekt dát a servisov - rozšírenie na 5D-DT. V rámci overenia boli používateľsky otestované 3 hlavné režimy:

- režim virtuálneho prototypovania - fáza návrhu a konceptualizácie linky,
- režim digitálneho dvojčata - fáza používania v prevádzke: možnosti optimalizácie a prediktívnej údržby,
- režim virtuálneho rozšírenia existujúcej linky - testovanie „what-if“ scenárov.

4.1. Vytvorenie digitálneho opisu vo forme AAS

Základom pre prácu s platformou I-DT je vytvorenie kompletného digitálneho opisu jednotlivých častí linky pomocou AAS. Na vytváranie administratívnych schránok bol použitý AASX Package Explorer [40] vyvíjaný v súlade so špecifikáciami nemeckej Industrial Digital Twin Association (IDTA) [22], [42], [43]. Výstupný súbor musí pre zabezpečenie interoperability spĺňať požiadavky definované pre *Package file format for the Asset Administration Shell (AASX)* [44].

AAS pre opis jednotlivých častí linky pozostáva zo 6 Submodelov z ktorých niektoré predstavujú štandardizované šablóny SM (SM Template) vydávané IDTA [45] a niektoré boli navrhnuté práve pre ED platformu:

- SM Nameplate – definovaný IDTA - nesie základné digitálne informácie o výrobcovi a aktíve,

- SM TechnicalData – definovaný IDTA - obsahuje technické parametre aktíva, ako hmotnosť, rozmery, napájacie napätie,
- SM Handover Documentation - definovaný IDTA - obsahuje všetku priloženú dokumentáciu o aktíve,
- SM OperationalData – definovaný pre ED platformu I-DT - operačné dáta aktíva, ide o časovo-premenné vlastnosti, napr. či je dopravník spustený. Operačné dáta sú spravidla kategórie VARIABLE. Jednotlivé vlastnosti si definuje používateľ sám v závislosti od potreby.
- SM UnityData – definovaný pre ED platformu I-DT - nesie všetky informácie potrebné pre prácu s objektom v Unity:
 - poloha časti linky,
 - rotácia časti linky,
 - vizualizácia v podobe priloženého AssetBundle (vytvorený z CAD modelu / 3D modelu),
 - binárny súbor (.dll) obsahujúci skripty na obsluhu časti linky,
 - informácia o tom, či má objekt aj fyzický náprotivok, alebo ide o čisto virtuálnu časť linky – táto informácia je potrebná pre odlišenie správania časti linky pri interakcii s výrobkami vo virtuálnom prostredí.
- SM PlcCommunication – definovaný pre ED platformu I-DT - obsahuje 0..* SubmodelElementCollection so všetkými uzlami na PLC OPC UA serveri, s ktorými môže virtuálna linka komunikovať. Každá reprezentácia uzla PLC OPC UA servera obsahuje informácie:
 - prístupový bod (endpoint) PLC OPC UA servera,
 - NodeId na PLC OPC UA serveri,
 - komunikačný OPC UA interface vytvorený na PLC, ktorý obsahuje príslušný uzol,

- názov vlastnosti v AAS SM OperationalData, ktorá má byť notifikovaná pri zmene hodnoty,
- informácia s názvom PLC tagu,
- príznak rozlišujúci, či je daný tag v PLC využívaný ako vstup (digitálny / analógový snímač, príloha Snímače a príznak „IsSensor“).

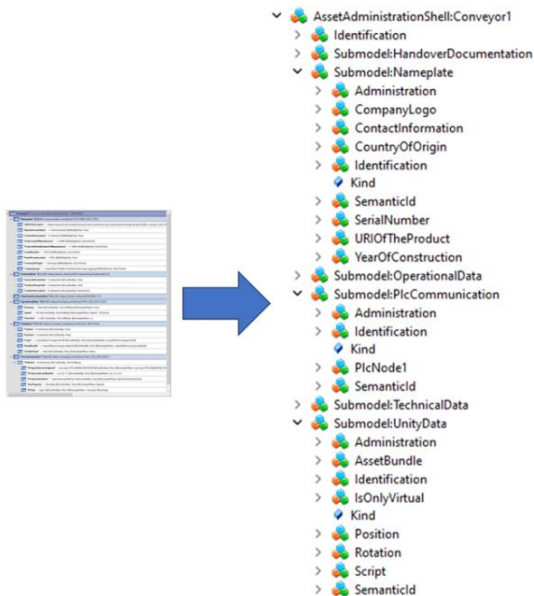
Na Obrázok 4 možno vidieť ukážku digitálneho opisu dopravníka vytvoreného v nástroji AASX Package Explorer.



Obrázok 4: Digitálny opis dopravníka v nástroji AASX Package Explorer

4.2. Vytvorenie OPC UA servera z AAS

Na vytvorenie OPC UA servera bol použitý nástroj AASX Server [41] od IDTA, ktorý interne využíva výstupný AASX package file na vytvorenie OPC UA informačného modelu. Tento je následne použitý na vytvorenie adresného priestoru OPC UA servera. Pri vytváraní adresného priestoru OPC UA servera je každému aktívu (assetu), submodelu a vlastnosti (property) priradený uzol s unikátnym NodeId. Ukážku vytvoreného adresného priestoru z AAS možno vidieť na Obrázok 5. Nástroj AASX Server vytvára NodeId na základe ShortId príslušného objektu. ShortId - lokálny unikátny identifikátor v rámci AAS. Na základe tejto skutočnosti a vďaka využitiu SM šablón možno následne univerzálne referencovať jednotlivé uzly OPC UA servera vytvoreného z AAS, napr. NodeId pre rýchlosť prvého dopravníka v SM OperationalData bude mať štruktúru „Conveyor1.OperationalData.Speed“.



Obrázok 5: Ukážka výsledného adresného priestoru OPC UA servera (vpravo) vytvoreného z AAS (vľavo, Obrázok 4)

4.3. Vytvorenie virtuálnej výrobnjej linky v Unity

Fyzický model linky Fischertechnik je riadený PLC s vlastným OPC UA serverom. Jednotlivé diely sú digitálne opísané pomocou AAS, z ktorých je vytvorený adresný priestor „OPC UA servera z AAS“. Oba tieto OPC UA servery sú následne agregované na agregáčnom OPC UA serveri, ktorý slúži ako jednotný prístupový bod k dátam na oboch serveroch.

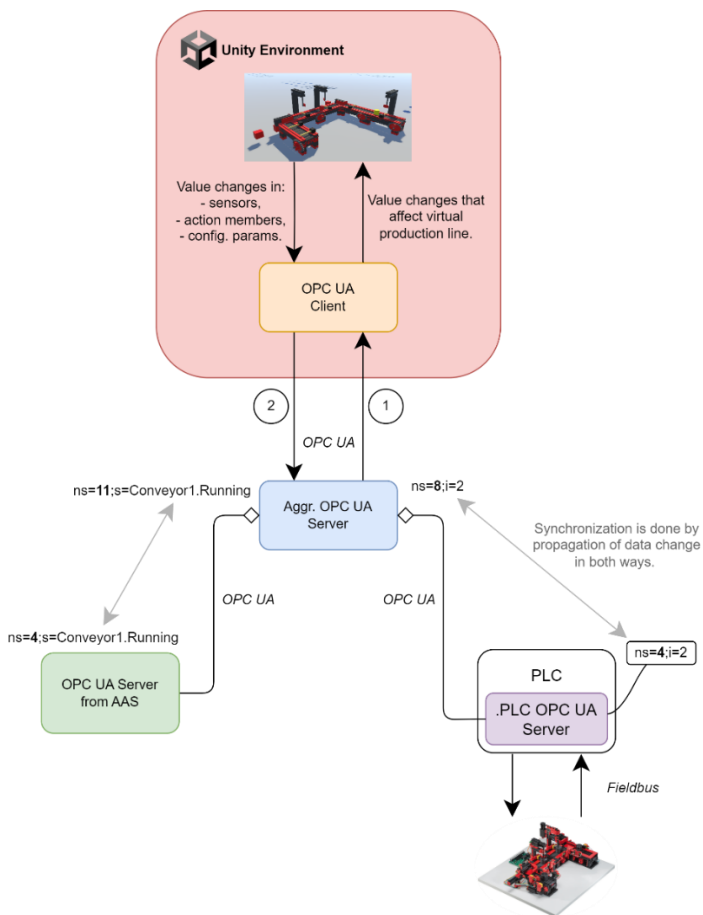
Aplikácia navrhnutá v Unity implementuje upravenú verziu knižnice OPC UA klienta. Knižnica zabezpečuje obojsmernú komunikáciu medzi reálnou a virtuálnou entitou modelom klient-server. Upravená verzia knižnice OPC UA klienta poskytuje služby na pripojenie, odpojenie a opätovné pripojenie k agregáčnemu OPC UA serveru, čítanie štruktúry adresného priestoru agregáčného OPC UA servera, či zápis hodnoty do uzla agregáčného OPC UA servera.

Služby knižnice sú využívané aj pri vystavanií virtuálnej výrobnjej linky. Výrobná scéna je pred spustením prázdna. Až po načítaní adresného priestoru agregáčného OPC UA servera dochádza k vystavaniu virtuálnej linky. Tým sa zabezpečuje škálovateľnosť celého riešenia, keďže adresný priestor možno jednoducho modifikovať úpravou v AAS.

4.4. Tok dát a informácií

Riadenie procesov výrobnjej linky, reálnej aj virtuálnej, zabezpečuje PLC so vstavaným PLC OPC UA serverom. Na Obrázok 6 možno vidieť schematicky znázornené prepojenie jednotlivých technológií a tok dát naprieč nimi. Agregáčny OPC UA server vytvára kópiu agregovaných uzlov OPC UA servera z AAS a PLC OPC UA servera vo svojom adresnom priestore. Synchronizácia hodnôt uzlov medzi pôvodným uzlom a jeho obrazom na agregáčnom serveri je zabezpečená obojsmernou propagáciou zmien. Rozdielom medzi pôvodným a agregovaným uzlom je NodeId, ktoré je mu na

agregačnom OPC UA serveri pridelené. Nodeld závisí od poradia v akom sú serveri agregované.



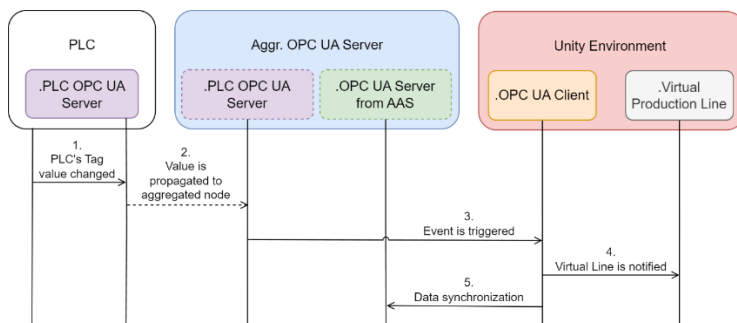
Obrázok 6: Prepojenie jednotlivých technológií a tok dát naprieč platformou

Platforma I-DT implementuje algoritmus, ktorý využíva informácie zo Submodelu PlcCommunication a na jeho základe je schopná vytvoriť komunikačné dvojice medzi agregovanými uzlami PLC OPC UA servera a OPC UA servera vytvoreného z AAS. V rámci PlcCommunication sú

obsiahnuté všetky informácie potrebné na presný digitálny opis uzla na PLC OPC UA serveri – PLC OPC UA server Endpoint, NodeId, komunikačný interface, ako aj informácia, o ktorú vlastnosť v rámci Submodelu OperationalData sa jedná pri virtuálnej výrobnjej linky. Vytvorenie komunikačnej dvojice je kľúčové pre zabezpečenie obojsmernej komunikácie.

Samotnú obojsmernú komunikáciu možno rozdeliť do dvoch hlavných procesov, ktoré sú na Obrázok 34 označené číslami ① a ②:

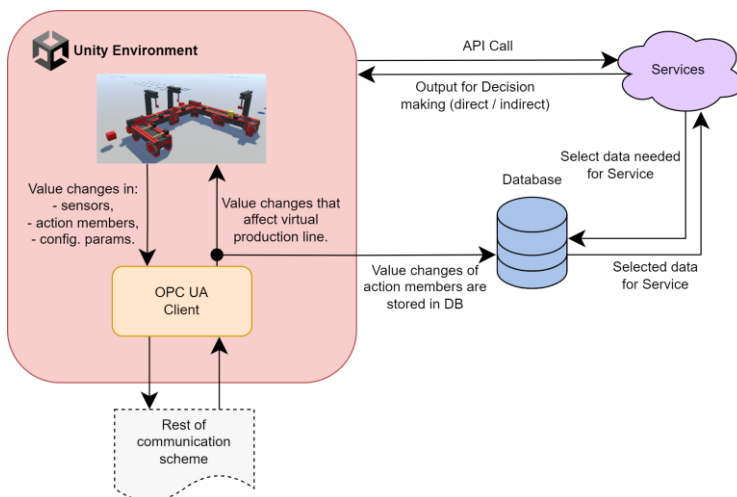
1. komunikácia zmeny hodnoty, ktorá nastala na reálnej výrobnjej linke - sekvenčný diagram vidieť na Obrázok 7,
2. komunikácia zmeny hodnoty, ktorá nastala na virtuálnej výrobnjej linke:
 - zmena hodnoty pri úprave konfiguračného parametra virtuálnej linky, napr. zmena smeru chodu dopravníkového pásu pri testovaní (fyzický model linky Fischertechnik neumožňuje zmenu smeru chodu dopravníkového pásu, preto je tento parameter považovaný za konfiguračný pre virtuálnu linku),
 - zmena hodnoty ovplyvňuje chod linky, napr. keď virtuálny snímač nasníma prítomnosť výrobku.



Obrázok 7: Sekvenčný diagram zmeny hodnoty na reálnej linke

4.5. Aspekt dát a servisov

Zakomponovaním aspektu dát a servisov, vid' Obrázok 8, je možné v spojení s platformou pre tvorbu I-DT hovoriť o návrhu 5D digitálnych dvojčiat (5D-DT). Na uchovanie dát z výrobného procesu slúži databáza, ktorá sprístupňuje uchované historické dáta servisom analyzujúcim a vyhodnocujúcim priebeh výrobného procesu.



Obrázok 8: Rozšírenie platformy o aspekt dát a servisov

Servisy platformy analyzujú a vyhodnocujú doterajší beh linky a poskytujú:

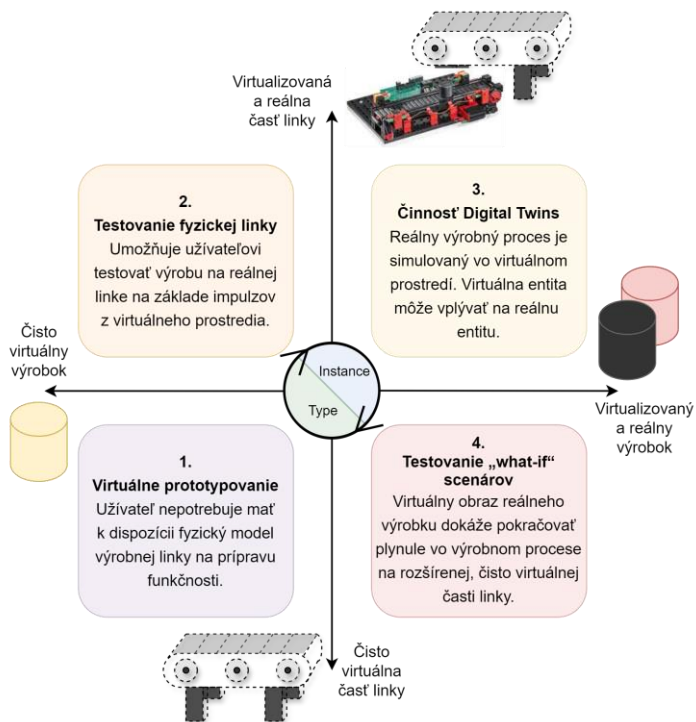
- nepriamu podporu rozhodovania (indirect decision making) - servis generuje textový výstup, ktorý je používateľovi k dispozícii v notifikačnom paneli,
- priame rozhodovanie (direct decision making) - servis generuje požiadavku na úpravu parametra výrobnéj linky.

4.6. Životný cyklus I-DT

V produkcii môže platforma I-DT pracovať súčasne so 4 odlišnými entitami:

1. čisto virtuálnou linkou,
2. čisto virtuálnym produktom,
3. reálnou časťou linky s virtuálnym obrazom (DT výrobnéj linky),
4. reálnym produktom s virtuálnym obrazom (zjednodušené DT výrobku).

Na základe interakcie týchto entít možno rozlíšiť 4 fázy životného cyklu I-DT, Obrázok 9.



Obrázok 9: Štyri fázy životného cyklu I-DT

V prvej fáze životného cyklu - **virtuálne prototypovanie**, pracuje používateľ s čisto virtuálnym návrhom výrobnjej linky. Používateľ má možnosť vyskladať si celú linku na základe digitálnych opisov (AAS) pre jej jednotlivé časti. Riadenie linky môže zabezpečiť simulované PLC (napr. PLCSIM) - nie je potrebné fyzicky vlastniť žiadnu časť navrhovanej linky.

V druhej fáze - **testovanie a uvedenie fyzickej linky do prevádzky**, si používateľ na základe návrhu z predošlej fázy postupne obstará a zostaví výrobnú linku. Následne, pred uvedením do prevádzky, môže otestovať funkčnosť celej zostavenej linky na základe impulzov z virtuálneho prostredia. **Schopnosť ovplyvňovať reálnu linku z virtuálneho prostredia je pre DT kľúčová k umožneniu obojsmernej komunikácie.**

Tretia fáza - **činnosť DT**, predstavuje hlavnú aplikáciu platformy. Reálny výrobný proces je simulovaný vo virtuálnom prostredí. Virtuálna entita môže vplývať na reálnu entitu.

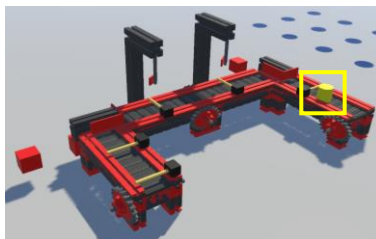
Posledná, štvrtá, fáza - **testovanie „what-if“ scenárov**, umožňuje používateľovi rozšíriť výrobnú linku vo virtuálnom prostredí. Virtuálny obraz reálneho výrobku dokáže plynule pokračovať vo výrobnom procese na čisto virtuálnej časti linky. Je tak možné virtuálne prototypovať a testovať nové časti linky, pred ich obstaraním a reálnym rozšírením existujúceho riešenia.

4.7. Overenie platformy

Overovanie platformy, jej funkčnosti a možností prebiehalo používateľským testovaním. Testy boli vykonávané primárne pre tri hlavné režimy platformy:

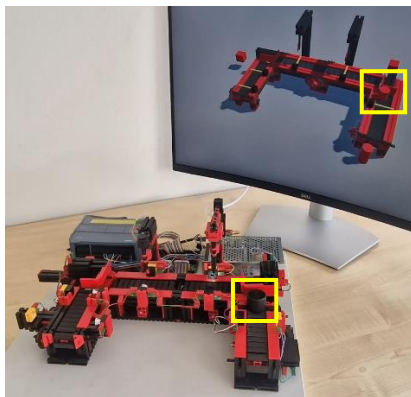
1. virtuálne prototypovanie (Obrázok 10) – fáza návrhu a konceptualizácie linky - oblasť *Type* v kontexte životného cyklu RAMI4.0. Používateľ si pripraví AAS pre jednotlivé časti linky a z týchto môže zostaviť virtuálnu výrobnú linku, na ktorej vie testovať výsledný výrobný proces ešte pred tým, ako je linka fyzicky

postavená. Pri návrhu virtuálnej linky možno tiež použiť virtuálne, simulované PLC (napr. PLCSIM), čo umožňuje dodatočné zníženie nákladov pre časť vývoja linky. Využitím nástroja PLCSIM bolo možné otestovať funkčnosť platformy v kombinácii s rôznymi verziami CPU PLC S7-1500 značky Siemens, ako napr. 1513-1 PN, 1515T-2 PN.



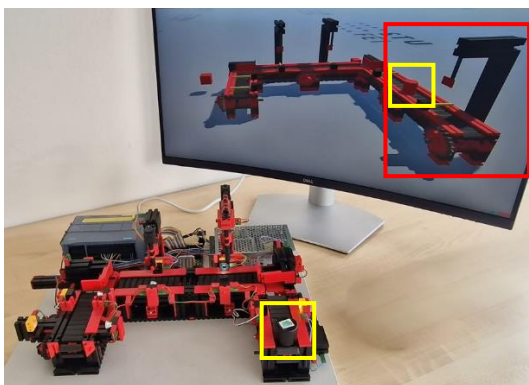
Obrázok 10: Režim virtuálneho prototypovania

2. digitálne dvojča (Obrázok 11) - fáza používania, kedy je virtuálna výrobná linka prepojená s reálnou a dochádza medzi nimi k obojsmernej komunikácii dát. Ide o primárny režim platformy vo fáze Instance, ktorý by mal zahŕňať fázy užívania, optimalizácie výrobného procesu či predikcie chýb.



Obrázok 11: Režim Digital Twin – reálny výrobok a jeho virtuálny obraz (na monitore) sú označené žltým rámkom

3. režim virtuálneho rozšírenia existujúcej linky (Obrázok 12) – umožňuje používateľovi testovanie „what-if“ scenárov v prípade, že zvažuje úpravu alebo rozšírenie linky. V tomto režime, podobne ako v režime čisto virtuálnej výroby, môže používateľ jednoducho pridávať nové časti linky alebo upravovať aktuálnu linku jednoduchou úpravou AAS a sledovať výsledky. Implementovaná funkcionality platformy na princípe Plug&Produce zjednodušuje celý proces aktualizácie linky vo virtuálnom prostredí.



Obrázok 12: Režim virtuálneho rozšírenia existujúcej linky – koniec linky, označený červeným rámkom, je rozšírený o dopravník, snímač a mixér

4.8. Viacero co-simulačných modelov súčasne

Platforma umožňuje súbežný beh viacerých co-simulačných modelov. Každý z modelov by sa mal zamerať na jednu primárnu funkciu – vizualizáciu a simuláciu výroby, optimalizáciu výroby, prediktívnu údržbu, ... Všetky tieto funkcionality predstavujú komplexné operácie, ktoré by mali zohľadňovať nielen dáta z výrobného procesu, ale aj historické dáta či informácie z AAS a dokumentácie. Rozdelenie zodpovedností za jednotlivé funkcie do viacerých co-simulačných modelov umožňuje škálovať potrebný výpočtový výkon. Je však potrebný ďalší výskum v tejto oblasti ako možno vhodne kombinovať výsledky jednotlivých co-simulačných modelov.

Prínosy dizertačnej práce

Hlavné výsledky a vedecký prínos práce:

1. Originálny návrh architektúry interoperabilného DT využitím štandardu OPC UA a administratívnych schránok (AAS) pre I4.0.
2. Vytvorenie metodiky tvorby platformy I-DT, ktorá spája interoperabilitu I4.0, DT, fyzikálny engine Unity, priemyselné riadiace systémy (PLC) a modelovú výrobnú linku.
3. Pilotná implementácia vytvorením a overením funkčnosti interoperabilného DT modelovej výrobnéj linky s využitím moderných a dostupných digitálnych technológií pre edukačné účely.

Ďalšie výsledky práce:

- modularita a rekonfigurovateľnosť riešenia využitím AAS,
- implementácia algoritmu na princípe Plug&Produce – umožňuje používateľovi rekonfigurovať virtuálnu linku bez nutnosti rekompilácie alebo reštartu aplikácie,
- kompletná dokumentácia platformy spracovaná v cloudovej Azure DevOps Wiki spolu s repozitármi v Azure DevOps Repos,
- využitie otvorených technológií, ako AASX Package Explorer a AASX Server,
- cenová dostupnosť platformy a jednoduchá replikovateľnosť riešenia,
- platforma umožňuje prácu vo viacerých režimoch, pričom každý má svoje konkrétne miesto v rámci životného cyklu výrobnéj linky:
 - ako čisto virtuálna výrobná linka bez potreby fyzického hardvéru (virtuálne prototypovanie) – fáza návrhu a konceptualizácie linky,
 - ako digitálne dvojča - fáza užívania, ktorá umožňuje optimalizáciu a prediktívnu údržbu,

- ako virtuálne rozšírenie existujúcej linky – testovanie „what-if“ scenárov pre prípadnú úpravu či rozšírenie existujúcej výroby,
- umožňuje tiež spúšťať viacero co-simulačných modelov súčasne, pričom každý môže byť zameraný na inú úlohu (simulácia výrobného procesu, testovanie „what-if“ scenárov, optimalizácia, prediktívna údržba).
- zjednodušený prechod z fázy *Type* (návrhu a konceptualizácie) do fázy *Instance* (výroba, maintenance) v rámci RAMI4.0,
- funkčnosť jednotlivých režimov platformy bola overená s využitím priemyselných technológií – riadiacim systémom (PLC) Siemens S7-1200 a tiež virtuálnym PLC Siemens S7-1500 vytvoreným v simulačnom prostredí nástroja PLCSIM.

Záver

Rozmach digitálnych technológií prispievajúcich k rýchlemu rozvoju v oblasti Industry 4.0 (I4.0) je obrovský. Je ale potrebné zdôrazniť, že až výsledné riešenia, ktoré vhodne prepájajú tieto technológie do jedného celku, napĺňajú atribúty I4.0 – interoperabilitu, modularitu a rekonfigurovateľnosť, virtualizáciu, orientáciu na služby, reálny čas a decentralizované rozhodovanie. Prehľad aktuálneho stavu v oblasti aplikácií digitálnych dvojčiat (DT) v priemyselnej praxi, jednej z kľúčových technológií I4.0, zdôraznil potrebu štandardizácie pre dosiahnutie interoperability komunikujúcich systémov. Prieskum ukázal, že množstvo prezentovaných aplikácií DT či nástrojov na ich tvorbu v skutočnosti nevytvára digitálne dvojčatá, ale len digitálne tieňe – *digital shadow*. Digitálny tieň je schopný simulovať priebeh výrobného procesu, ale neumožňuje, na rozdiel od DT, spätnú väzbu z virtuálneho systému do reálneho.

Predmetom práce je edukačno-vývojová platforma (EVP) pre tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat (I-DT). Hlavnou motiváciou je potreba vzdelávať odborníkov s digitálnymi kompetenciami pre I4.0 nielen teoreticky ale hlavne prakticky. Oblasť vzdelávania digitálnych kompetencií pre I4.0 predstavuje komplexnú a multidisciplinárnu problematiku – prepája modernú automatizáciu, operačné technológie (OT) a informačné technológie (IT). Pohľad na súčasný stav v oblasti vzdelávania digitálnych technológií ukazuje, že dostupné platformy a nástroje nestavajú na princípe interoperability. Platformy zamerané na tvorbu DT pre vzdelávacie účely dokonca často umožňujú len tvorbu digitálnych tieňov, ktoré iba vizualizujú priebeh výrobného procesu bez spätnej interakcie s reálnym systémom. Podľa našich skúseností existujú nástroje a komponenty, z ktorých je možné tvoriť cenovo-dostupné, otvorené, edukačné pomôcky, ktoré umožnia tvorbu I-DT, pokiaľ ich návrh prispôbime potrebám a možnostiam vzdelávania.

V práci je prezentovaný návrh, metodika tvorby edukačno-vzdelávacej platformy (EVP) na tvorbu I-DT, ktorá využíva vyššie zmienené cenovo-dostupné a otvorené technológie. Na základe vytvoreného návrhu a metodiky bola zrealizovaná pilotná implementácia interoperabilného DT s využitím moderných a dostupných digitálnych technológií pre edukačné účely. Platforma zastrešuje celý životný cyklus modelovej linky *Indexed Line with two Machining Stations* od Fischertechnik – fázy *Type* a *Instance* v kontexte RAMI4.0. Pracuje s digitálnymi opismi jednotlivých častí modelovej linky vo forme AAS – Komponent I4.0, ktoré umožňujú jednoduchú rekonfiguráciu a modularitu výrobnjej linky vo virtuálnom prostredí. Pre účely ad-hoc aktualizácie virtuálnej linky platforma podporuje funkcionality na princípe Plug&Produce. Funkčnosť platformy bola overená s reálnymi priemyselnými riadiacimi systémami v režimoch virtuálneho prototypovania, digital twin a testovania „what-if“ scenárov pri virtuálnom rozšírení existujúcej linky. Poskytuje tiež možnosť spúšťania viacerých co-simulačných modelov súčasne – aplikovateľnosť tohto režimu v praxi je ale potrebné overiť pri ďalšom výskume.

Literatúra

- [1] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios,” in *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, IEEE, Jan. 2016, pp. 3928–3937. doi: 10.1109/HICSS.2016.488.
- [2] R. Hall, S. Schumacher, and A. Bildstein, “Systematic Analysis of Industrie 4.0 Design Principles,” *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 440–445, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.005.
- [3] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review,” *Dortmund*, 01, 2015. doi: 10.13140/RG.2.2.29269.22248.
- [4] W. Albalkhy, D. Karmaoui, L. Ducoulombier, Z. Lafhaj, and T. Linner, “Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges,” *Autom Constr*, vol. 162, p. 105368, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105368.
- [5] D. M. Botín-Sanabria, S. Mihaita, R. E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza, and J. de J. Lozoya-Santos, “Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review,” *Remote Sensing*, vol. 14, no. 6. MDPI, Mar. 01, 2022. doi: 10.3390/rs14061335.
- [6] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 29, pp. 36–52, May 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [7] C. Qian, X. Liu, C. Ripley, M. Qian, F. Liang, and W. Yu, “Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions,” *Future Internet*, vol. 14, no. 2. MDPI, Feb. 01, 2022. doi: 10.3390/fi14020064.

- [8] O. T. Eleftheriou and C.-N. Anagnostopoulos, "Digital twins: A brief overview of applications, challenges and enabling technologies in the last decade," *Digital Twin*, vol. 2, p. 2, Mar. 2022, doi: 10.12688/digitaltwin.17581.1.
- [9] L. Kasper, F. Birkelbach, P. Schwarzmayr, G. Steindl, D. Ramsauer, and R. Hofmann, "Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 6981, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12146981.
- [10] S. Deng *et al.*, "A systematic review on the current research of digital twin in automotive application," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 3, pp. 180–191, 2023, doi: 10.1016/j.iotcps.2023.04.004.
- [11] Plattform Industrie 4.0, "RAMI4.0 – a reference framework for digitalisation." Plattform Industrie 4.0, 2018. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [12] Fraile, Sanchis, Poler, and Ortiz, "Reference Models for Digital Manufacturing Platforms," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, p. 4433, Oct. 2019, doi: 10.3390/app9204433.
- [13] F. Pethig *et al.*, *Industrie 4.0 Communication Guideline Based on OPC UA*. VDMA Verlag GmbH, 2023. Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320035806_Industrie_40_Communication_Guideline_Based_on_OPC_UA
- [14] OPC Foundation, "Unified Architecture." Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>

- [15] R. Pribiš, “OPC UA – história a špecifikácia,” Bratislava, Nov. 2023.
- [16] K. Manditereza, *What is OPC UA and How it Works?*, (Jun. 2015). Accessed: Mar. 23, 2024. [Online Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=vRk42W_4R0o&list=PLIrJJXPVFRvjHsA9tta8yULOB8nPUO_G7
- [17] “Exploring OPC UA Security Concepts.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://opconnect.opcfoundation.org/2020/06/exploring-opc-ua-security-concepts/>
- [18] Unified Automation, “OPC UA Meta Model.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: https://documentation.unified-automation.com/uasdkhp/1.5.1/html/_12_opc_ua_fundamentals_overview.html#OpcUaFundamentalsMetaModel
- [19] OPC Foundation, “OPC Unified Architecture Specification Part 5: Information Model.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part5/v105/docs/>
- [20] K. A. Nsiah, M. Schappacher, and A. Sikora, “Dynamic mapping of EDDL device descriptions to OPC UA,” *J Phys Conf Ser*, vol. 870, p. 012006, Jul. 2017, doi: 10.1088/1742-6596/870/1/012006.
- [21] “Details of the Asset Administration Shell - Part 1.” Plattform Industrie 4.0, 2020. Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.zvei.org/en/press-media/publications/details-of-the-asset-administration-shell>
- [22] Industrial Digital Twin Organization, “Part 1: Metamodel.” Industrial Digital Twin Association, Frankfurt am Main, Apr. 2023. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/aasspecifications/specification-of-the-asset-administration-shell-part-1-metamodel-idta-number-01001-3-0>

- [23] G.-Y. Kim *et al.*, “Customized Digital Twin Platform for SMEs in South Korea,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 11044–11049, 2023, doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.806.
- [24] M. F. Falah, S. Sukaridhoto, M. U. H. Al Rasyid, and H. Wicaksono, “Design of Virtual Engineering and Digital Twin Platform as Implementation of Cyber-Physical Systems,” *Procedia Manuf*, vol. 52, pp. 331–336, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.11.055.
- [25] T. Y. Pang, J. D. Pelaez Restrepo, C.-T. Cheng, A. Yasin, H. Lim, and M. Miletic, “Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an ‘Industry 4.0’ Shipyard,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1097, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11031097.
- [26] M. S. Bonney *et al.*, “Development of a digital twin operational platform using Python Flask,” *Data-Centric Engineering*, vol. 3, p. e1, Jan. 2022, doi: 10.1017/dce.2022.1.
- [27] M. Redeker, J. N. Weskamp, B. Rossl, and F. Pethig, “Towards a Digital Twin Platform for Industrie 4.0,” in *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, IEEE, May 2021, pp. 39–46. doi: 10.1109/ICPS49255.2021.9468204.
- [28] A. Yasin, T. Y. Pang, C.-T. Cheng, and M. Miletic, “A Roadmap to Integrate Digital Twins for Small and Medium-Sized Enterprises,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 20, p. 9479, Oct. 2021, doi: 10.3390/app11209479.
- [29] T. I. Erdei, R. Krakó, and G. Husi, “Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 8862, Sep. 2022, doi: 10.3390/app12178862.
- [30] V. Kuts *et al.*, “Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool,” *Robotics*, vol. 11, no. 5, p. 113, Oct. 2022, doi: 10.3390/robotics11050113.

- [31] J. Acker, I. Rogers, D. Guerra-Zubiaga, M. H. Tanveer, and A. A. A. Moghadam, “Low-Cost Digital Twin Approach and Tools to Support Industry and Academia: A Case Study Connecting High-Schools with High Degree Education,” *Machines*, vol. 11, no. 9, p. 860, Aug. 2023, doi: 10.3390/machines11090860.
- [32] “Top 10 Digital Twin Companies Impacting Industry 4.0 Innovations in 2021.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-digital-twin-companies-impacting-industry-4-0-innovations-in-2021>
- [33] I. Tomych, “20 Digital Twins Companies.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://dashdevs.com/blog/product-owner-talks-20-digital-twins-service-companies/>
- [34] Bosch, “Digital twin.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://docs.bosch-iot-suite.com/things/getting-started/twin/>
- [35] IBM, “IBM Maximo Application Suite.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/products/maximo>
- [36] Siemens, “Digital Twins with potential.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/the-digital-twin.html>
- [37] “About Factory I/O.” Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://docs.factoryio.com/>
- [38] “DIGITAL TWINS FOR MACHINE & PLANT ENGINEERING.” Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://realvirtual.io/en/>
- [39] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers*. Elsevier, 2015. doi: 10.1016/C2014-0-03884-1.
- [40] Industrial Digital Twin Association, “AASX Package Explorer.” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available:

- <https://github.com/admin-shell-io/aasx-package-explorer?tab=readme-ov-file>
- [41] Industrial Digital Twin Association, “AASX Server.” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/admin-shell-io/aasx-server>
- [42] Industrial Digital Twin Organization, “Part 2: Application Programming Interfaces.” Industrial Digital Twin Association, Frankfurt am Main, Jun. 2023. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/aasspecifications/specification-of-the-asset-administration-shell-part-2-application-programming-interfaces-idta-number-01002-3-0>
- [43] Industrial Digital Twin Organization, “Part 3a: Data Specification – IEC 61360.” Industrial Digital Twin Association, Frankfurt am Main, Apr. 2023. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/aasspecifications/specification-of-the-asset-administration-shell-part-3a-data-specification-iec-61360-idta-number-01003-a-3-0>
- [44] Industrial Digital Twin Organization, “Part 5: Package File Format (AASX).” Industrial Digital Twin Association, Frankfurt am Main, Apr. 2023. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/aasspecifications/specification-of-the-asset-administration-shell-part-5-package-file-format-aasx-idta-number-01005-3-0>
- [45] Industrial Digital Twin Organization, “Registered AAS Submodel Templates.” Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/submodels>

Vlastná publikačná činnosť

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 PAJPACH, Martin - HAFFNER, Oto - KUČERA, Erik - DRAHOŠ, Peter. Low-cost education kit for teaching basic skills for industry 4.0 using deep-learning in quality control tasks. In *Electronics*. Vol. 11, iss. 2 (2022), Art. no. 230 [20] s. ISSN 2079-9292 (2022: 2.900 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.628 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85122676468 ; WOS: 000757352400001 ; CC: 000757352400001 ; DOI: 10.3390/electronics11020230. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V3

Ohlasy:

1. [1] KEE, Elven - CHONG, Jun Jie - CHOONG, Zi Jie - LAU, Michael. A Comparative Analysis of Cross-Validation Techniques for a Smart and Lean Pick-and-Place Solution with Deep Learning. In *ELECTRONICS*, 2023, vol. 12, no. 11, art. no. 2371. ISSN 2079-9292., Registrované v: WOS, SCOPUS, CC
Ohlas: zahraničný

2. [1] FU, Aihui - SAINI, Raghav - KOORNNEEF, Remko - VAN DER MEER, Arjen - PALENSKY, Peter - CVETKOVIC, Milos. The Illuminator: An Open Source Energy System Integration Development Kit. In: *2023 IEEE Belgrade PowerTech, PowerTech 2023*, 2023, in press. ISBN 978-166548778-8., Registrované v: SCOPUS, WOS
Ohlas: zahraničný

3. [1] KITCHAROEN, Pornchai - HOWIMANPORN, Suppachai - CHOOKAEW, Sasithorn. Review Process to Investigate Trends of Using Arduino to

Enhance AI Study. In: 31st International Conference on Computers in Education, ICCE 2023 Proceedings, 2023, Vol. 2, pp. 448-455. ISBN 978-626968902-6., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

4. [1] SINGH, Mahipal - GOYAT, Rekha - PANWAR, Renu. Fundamental pillars for industry 4.0 development: implementation framework and challenges in manufacturing environment. In: TQM JOURNAL, 2024, vol. 36, no. 1, pp. 288-309. ISSN 1754-2731., Registrované v: WOS, SCOPUS

Ohlas: zahraničný

5. [1] AWOUDA, Ahmed - TRAINI, Emiliano - ASRANOV, Mansur - CHIABERT, Paolo. Bloom's IoT Taxonomy towards an effective Industry 4.0 education: Case study on Open-source IoT laboratory. In: EDUCATION AND INFORMATION TECHNOLOGIES, 2024, in press. ISSN 1360-2357., Registrované v: WOS, SCOPUS

Ohlas: zahraničný

6. [1] RYAZANTSEV, Sergey V. - ANDRONOVA, Inna V. - SH.SHADMANOV, Erkin - POPKOVA, Elena G. Quality management in industry 4.0 based on educational and labor migration: prospects of Russia and other cis countries. In: International Journal for Quality Research, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 259-278. ISSN 1800-6450., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

7. [1] YESLYAMOV, Serik. Application of Software Robots Using Artificial Intelligence Technologies in the

Educational Process of the University. In: Journal of Robotics and Control (JRC), 2024, vol. 5, no. 2, pp. 359-369. ISSN 2715-5056., Registrované v: SCOPUS
Ohlas: zahraničný
8. [1] TZAMPAZAKI, Maria - ZOGRAFOS, Charalampos - VROCHIDOU, Eleni - PAPAKOSTAS, George A. Machine Vision-Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0. In: APPLIED SCIENCES-BASEL, 2024, vol. 14, no. 4, art. no. 1471. ISSN 2076-3417., Registrované v: WOS, CC
Ohlas: zahraničný

ADC02 PAJPACH, Martin - PRIBIŠ, Rudolf - DRAHOŠ, Peter - KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto. Educational-development Platform for Interoperable Digital Twin. In *Scientific Reports*.
Typ výstupu: pripravovaný článok; Výstup: zahraničný

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 PAJPACH, Martin - DRAHOŠ, Peter - PRIBIŠ, Rudolf - KUČERA, Erik. Educational-development workplace for digital twins using the OPC UA and Unity 3D. In *2022 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : Proceedings ; 31st International Conference; 11-14 September 2022 Visegrád, Maďarsko*. 1. vydanie. Danvers, Massachusetts, USA : IEEE, 2022, [6] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925933 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142116332 ; IEEE: 9925933.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

Ohlasy:

1. [1] ZHANG, Kesheng - XU, Quan - LIU, Changxin - CHAI, Tianyou. Intelligent decision-making system for mineral processing production indices based on digital twin interactive visualization. In: *Journal of Visualization*, 2024, in press. ISSN 1343-8875., Registrované v: SCOPUS, WOS
Ohlas: zahraničný

AFC02 PAJPACH, Martin - PRIBIŠ, Rudolf - DRAHOŠ, Peter - KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto. Design of an Educational-development Platform for Digital Twins using the Interoperability of the OPC UA Standard and Industry 4.0 Components. In *ICECCME 2023 : International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering. Tenerife, Spain. July 19-21, 2023*. Danvers : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-2297-2. V databáze: IEEE: 10252941 ; SCOPUS: 2-s2.0-85174074691 ; DOI: 10.1109/ICECCME57830.2023.10252941.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

AFC03 PAJPACH, Martin - SEKERÁK, Ľuboš - KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto - PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - JANECKÝ, Dominik. Exspiro - mobile application for food sustainability. In *MoSICom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

- AFC04 BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto - PAJPACH, Martin - BARANOVIČ, Ján. Enlightening university students about Containerization through an interactive webpage. In *MoSICom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
- AFC05 HAFFNER, Oto - KUČERA, Erik - BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - PAJPACH, Martin - JANECKÝ, Dominik. Gesture Recognition System Based on Motion Capture Suit and LSTM Neural Network. In *MoSICom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
- AFC06 JANECKÝ, Dominik - KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto - KIŠŠ, Juraj - PAJPACH, Martin. Application For Interfacing 3D Engine Unity With Robot Operating System. In *MoSICom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

AFC07 KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto - BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - PAJPACH, Martin - JANECKÝ, Dominik. Monitoring and Control of Discrete-Event System Using Augmented Reality and Open-Source PLC. In *MoSICom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

AFC08 PRIBIŠ, Rudolf - HAFFNER, Oto - BEŇO, Lukáš - JANECKÝ, Dominik - KUČERA, Erik - PAJPACH, Martin - JURIŠ, Adam - HAMRÁK, Michal - ZAJAC, Šimon. Emerging Trends in Education For Industry 4.0 and 5.0 Engineers in Slovakia Using E-learning Web Applications. In *MoSICom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 PAJPACH, Martin - HAFFNER, Oto. Využitie výpočtovej inteligencie pre úlohy kontroly kvality. In *ŠVOČ 2021 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 21. apríl 2021*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, S. 59-63. ISBN 978-80-227-5104-9.

Typ výstupu: príspevok; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: V2

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEF01 PAJPACH, Martin - DRAHOŠ, Peter. Digital twin : Definition and use. In *ELITECH'22 [elektronický zdroj] : 24th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. June 1, 2022.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, [5] s. ISBN 978-80-227-5192-6.

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	8
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	1
BEF	Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)	1
Súčet		11

Štatistika: kategória ohlasov od 2022

1 Citácia v publikácii registrovaná v citačných indexoch			9
	Zahraničné		9
Súčet			9

Zdroje metrik: Clarivate, Scopus a Journalmetrics