

Ing. Rudolf Pribiš

Autoreferát dizertačnej práce

**DIGITÁLNE TECHNOLOGIE PRE SÉMANTICKÚ
INTEROPERABILITU V INDUSTRY 4.0**

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy
v študijnom odbore kybernetika**

Miesto a dátum: Bratislava,

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Rudolf Pribiš

Autoreferát dizertačnej práce

**DIGITÁLNE TECHNOLOGIE PRE SÉMANTICKÚ INTEROPERABILITU V
INDUSTRY 4.0**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:
Mechatronicke systémy

Miesto a dátum: Bratislava,

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

Na Ústave automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave (FEI STU BA)

Predkladateľ: Ing. Rudolf Pribiš
Ústav automobilovej mechatroniky
FEI STU BA, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
FEI STU BA, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Peter Ševčík, PhD.
Katedra technickej kybernetiky
FRI-KTK, Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Ing. Juraj Štefanovič, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky
PEVŠ, Tomášikova 20, 820 09 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3,
812 19 Bratislava, v miestnosti

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program :	Mechatronicke systémy
Písomná práca k dizertačnej skúške	Digitálne technológie pre sémantickú interoperabilitu v Industry 4.0
Autor:	Ing. Rudolf Pribiš
Vedúci záverečnej práce:	doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.
Miesto a rok predloženia práce:	Bratislava 2022

Charakteristickými črtami pre komunikáciu v Industry 4.0 sú interoperabilita a schopnosť autonómnej komunikácie komponentov medzi sebou. Hlavným cieľom tejto práce je priniesť inovácie do komunikácie v priemysle a to použitím moderných technológií, ktoré umožňujú komunikačnú a sémantickú interoperabilitu, škálovateľnosť, horizontálnu a vertikálnu integráciu a hybridnú komunikáciu, ktorá by využívala prednosti komunikačných modelov klient-server a publish-subscribe. To je dosiahnuté vytvorením originálnej metodiky návrhu Komponentu Industry 4.0, pomocou ktorej boli vytvorené Komponenty I4.0 zo škály zariadení: vstavaný systém snímačov, analógové meracie zariadenie a kyberneticko-fyzikálny systém. Ďalej, návrhom a realizáciou komunikačnej platformy I4.0, ktorá centralizuje dáta a služby poskytované vytvorenými Komponentami I4.0 v sieti. Verifikácia funkčnosti zostrojenej platformy prebehla pomocou pripojenia priemyselného PLC a rôznych priemyselných komerčných rozhraní človek stroj, ktoré ponúkajú interakciu s Komponentmi I4.0 v sieti. Na záver je predstavený návrh hybridnej komunikácie, ktorá ponúka obojstrannú komunikáciu bez nutnosti priameho alebo trvalého spojenia medzi poskytovateľom a odoberateľom dát pomocou komunikačného modelu Pubsub. Rozdelenie kapitol práce sleduje spomenuté naplnenie cieľov, pričom úvodná časť analyzuje súčasný stav I4.0 a vysvetľuje dosiahnutie interoperability pomocou OPC UA (respektíve globálnej interoperability v I4.0 pomocou administratívnej schránky aktíva).

Kľúčové slová: Sémantická interoperabilita, Komponent Industry 4.0, OPC UA, administratívna schránka aktíva, hybridná komunikácia.

ABSTRACT

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

Study Programme:	Mechatronic systems
Dissertation Thesis:	Digital technologies for semantic interoperability in Industry 4.0
Author:	Ing. Rudolf Pribiš
Supervisor:	doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.
Place and year of submission:	Bratislava 2022

The hallmarks of Industry 4.0 communication are interoperability and the ability of autonomous communication between components in the network. The main objective of this work is to bring innovation to communication in Industry by using modern technologies that enable communication and semantic interoperability, scalability, horizontal and vertical integration, and hybrid communication that could benefit from client-server and publish-subscribe communication models. This is achieved through the creation of an original Industry 4.0 Component design methodology by which I4.0 Components have been created from a range of devices: an embedded sensor system, an analogue measurement device and a cyber-physical system. Next, by the design and implementation of the I4.0 communication platform, which centralizes the data and services provided by the created I4.0 Components in the network. Verification of the functionality of the built platform was done by connecting an industrial PLC and various industrial commercial human machine interfaces that offer interaction with I4.0 components on the network. Finally, a design of a hybrid communication is presented which offers two-way communication without the need for a direct or permanent connection between the publisher and subscriber. The distribution of the chapters of the thesis follows the fulfilment of the objectives, with the introductory section analysing the current state of I4.0 and explaining the achievement of interoperability using OPC UA (or global interoperability in I4.0 using the Asset Administration Shell).

Key words: semantic interoperability, Industry 4.0 Component, OPC UA, Asset Administration Shell, hybrid communication.

OBSAH

1.	Úvod	8
2.	Ciele dizertačnej práce	10
3.	Riešenia dizertačnej práce.....	11
3.1.	Porovnanie otvorených softvérových nástrojov na tvorbu Komponentu I4.0	11
3.2.	Overenie použitia komunikačného modelu OPC UA klient-server.....	14
3.3.	Návrh metodiky na implementácia AAS ako Komponentu Industry 4.0	16
3.4.	Realizácia komunikačnej platformy pre I4.0 na báze agregáčného OPC UA servera	17
3.5.	Návrh hybridnej komunikácie, ktorá ponúka výhody komunikácie PubSub a klient – server.....	22
4.	Prehľad výsledkov dizertačnej práce.....	26
5.	Záver.....	28
	Prínosy práce	30
	Budúce perspektívy výskumu	30
	Publikačná činnosť autora.....	31
	Referencie.....	33

1. Úvod

V súčasnej dobe je informácia komoditou, ktorej dôležitosť markantne nabera na význame aj v priemyselnej výrobe. Informácia v správnej forme a v pravý čas šetrí náklady a môže napomôcť k zabráneniu vzniku neočakávaných situácií. Aktuálne a budúce trendy v priemysle sú popísané v štúdiách národných organizácií ako aj v článkoch akademickej obce, ktoré popisujú potrebu priemyselnej revolúcie, definujú pojem Priemysel 4.0 (Industry 4.0) a aj stratégiu jeho implementácie (1). Za účelom zjednotenia rôznych aspektov výrobného procesu, bol vytvorený referenčný model architektúry priemyslu 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0) (1). V heterogénnom systéme modelovanom pomocou RAMI 4.0 existuje množstvo rôznych aktív (napríklad človekoden, ventil, výrobná linka, životný cyklus, atď.), ktoré môžu mať diametrálne odlišné atribúty. Aby bolo možné popísať takéto elementy a ich vzťahy v rámci Industry 4.0 jednoznačným a štandardizovaným spôsobom, bol zadaný pojem *Komponent Industry 4.0*. Komponent Industry 4.0 je implementovaný pomocou Asset Administration Shell, čo je akousi schránkou do ktorej je zapuzdrené aktívum (asset) a cez ktorú je možné takéto aktívum spravovať (1).

Pokrok v oblasti integrovaných obvodov (zvýšenie ich výkonnosti a efektivity pri znížení ceny) bol základným predpokladom k počatiu štvrtej priemyselnej revolúcie – ako sa často označuje súčasné obdobie. Tento pokrok umožnil vznik takzvaných IOT i IIOT. Ako už plynie z názvu, takéto zariadenie je možné pripojiť k Internetu, prípadne k intranetu a komunikovať s ním.

Väčšina takýchto zariadení podporuje komunikáciu cez MQTT alebo podobný protokol a zvyčajne poskytuje iba jednoduché informácie ako napríklad teplotu, tlak, prípadne poskytujú aj dodatočné informácie ako inžiniersku jednotku, rozsah atď. V komunikácii sa takéto zariadenie označuje ako *publisher*, poskytovateľ informácií, a tieto informácie poskytuje bez akejkoľvek vedomosti alebo potvrdenia kto, a vôbec či niekto (*subscriber*) tieto informácie prijíma. Poskytované dáta v MQTT sú preddefinované a na ich zmenu je potrebný iný komunikačný kanál ako MQTT.

Druhým spôsobom komunikácie je komunikácia podľa modelu klient server. Oproti spomenutému modelu *PubSub* má tú výhodu, že klient dokáže serveru poslať požiadavku (*request*) a server mu odpovie odpoveďou (*response*). To dáva komunikácii väčšiu flexibilitu oproti modelu *PubSub*, dokonca klient môže volať aj metódy, ktoré server poskytuje. Avšak server musí pre každého jedného klienta otvoriť priame spojenie, čo v prípade veľkého množstva klientov, alebo obmedzeného výkonu serveru môže byť problém (2).

Či už sa jedná o IOT alebo IIOT s komunikáciou *PubSub* alebo klient server, takéto zariadenie nemožno automaticky považovať za Komponent Priemyslu 4.0. Sú určité

kritéria, ktoré musia byť naplnené, aby entita mohla byť považovaná za Komponent I4.0. Podrobnejšiu definíciu Komponentu I4.0 je možné nájsť v dokumente nemeckej organizácie Industrie 4.0 Platform (1).

2. Ciele dizertačnej práce

Autor tejto práce identifikoval potrebu interoperability ako jednu z najdôležitejších požiadaviek na komunikáciu a výmenu dát v Industry 4.0. Interoperabilita sa týka nielen komunikácie, ale aj spôsobu digitalizácie modelov aktív (z angl. asset). Autor sa domnieva, že jedinou cestou k dosiahnutiu globálnej interoperability v priemysle je použitie otvorených štandardov ako je napríklad IEC 62541 (OPC Unified Architecture), alebo koncept administratívnej schránky aktíva (AAS - Asset Administration Shell) (3).

Ciele práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Analýza súčasného stavu v oblastiach modelovania a digitalizácie v priemysle, otvorených komunikačných protokolov a interoperability pre Industry 4.0.
2. Návrh architektúry vývojovej platformy pre Industry 4.0 s interoperabilitou, horizontálnou a vertikálnou integráciou priemyselných komponentov a širokou škálovateľnosťou.
3. Implementácia komunikácie pomocou OPC UA na vybratých embedded zariadeniach.
4. Realizácia komunikačnej platformy na báze agregáčného servera s interoperabilitou pre Industry 4.0.
5. Návrh hybridnej komunikácie, ktorá ponúka výhody komunikácie pub-sub a request-response.

3. Riešenia dizertačnej práce

Autor má potrebu podotknúť, že obdobie počas ktorého prebiehal výskum a tvorba ktoré priniesli výsledky dizertačnej práce trvalo štyri roky. Počas tohto obdobia, ktoré je z hľadiska boomu v technológiách Industry 4.0 pomerne dlhé, nastali viaceré zmeny či už v špecifikáciách OPC UA, otvorených softvérových nástrojoch, integrovaných vývojových prostrediach, softvérovej podpore a v neposlednej rade prírastkoch v odborných publikáciách. Preto boli viaceré časti prerábané (aj viac krát) aby odrážali naozaj aktuálne trendy, ba dokonca boli otvárané viaceré diskusie v odborných fórach pri návrhoch inovatívnych častí.

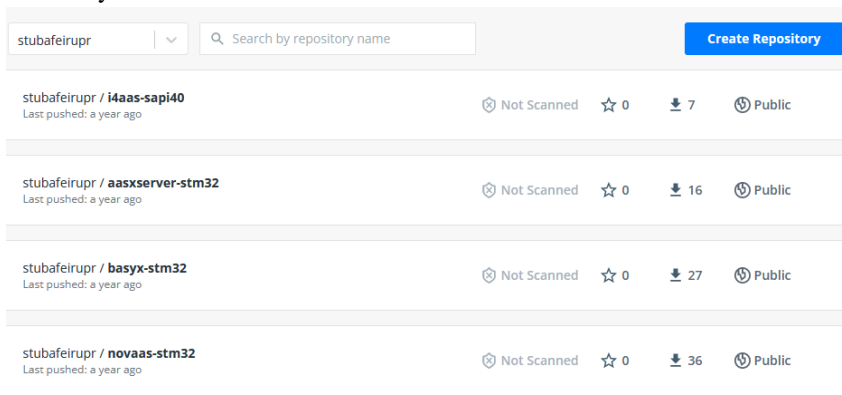
3.1. Porovnanie otvorených softvérových nástrojov na tvorbu Komponentu I4.0

Výsledkom porovnania otvorených softvérových nástrojov na tvorbu Komponentov I4.0 pomocou AAS na základe stanovených kritérií: **systemové nároky, interoperabilita a schopnosť nasadenia do prevádzky**, je sumár v podobe tabuľky a podrobný popis vyhodnotenia jednotlivých kritérií. Takéto vyhodnotenie sa aktuálne nenachádza v žiadnych publikáciách ani iných zdrojoch azda aj preto, lebo pomocou jednotlivých softvérových nástrojov (ak to bolo možné) boli vytvorené funkčné Komponenty I4.0, ktorých atribúty boli vzájomne porovnávané (3).

Nástroj Aspekt	AASX Server	Eclipse Basyx	SAP i40 aas	NOVAAS
Hostujúca platforma	Nezávislý na platforme, aj ako docker obraz	Nezávislý na platforme, aj ako docker obraz	Nezávislý na platforme, aj ako docker obraz	Nezávislý na platforme, aj ako docker obraz
Technológia implementácie	.Net Framework, .Net Core	JAVA, .Net Core, C++	JavaScript, TypeScript, Go	Node RED
OS hostujúceho systému	MS Windows	Ubuntu 18.04	Ubuntu 18.04	Ubuntu 18.04
Typ súboru AASX	XML	XML/JSON	nie je k dispozícii	JSON
Podporované API	REST ¹ , MQTT ² , OPC UA ³	REST ¹ , MQTT ² , OPC UA	REST ¹ , HTTP	REST ¹ , MQTT ²
Kompatibilita s AASX Package Explorer	áno	áno	nie je k dispozícii	častočná
Webové rozhranie	má	nemá	nemá	má
Databáza na ukládanie AAS	nemá	má	má	nemá
Infraštruktúra	nemá	má	má	nemá

Tabuľka 1 - Porovnanie nástrojov na tvorbu AAS (3).

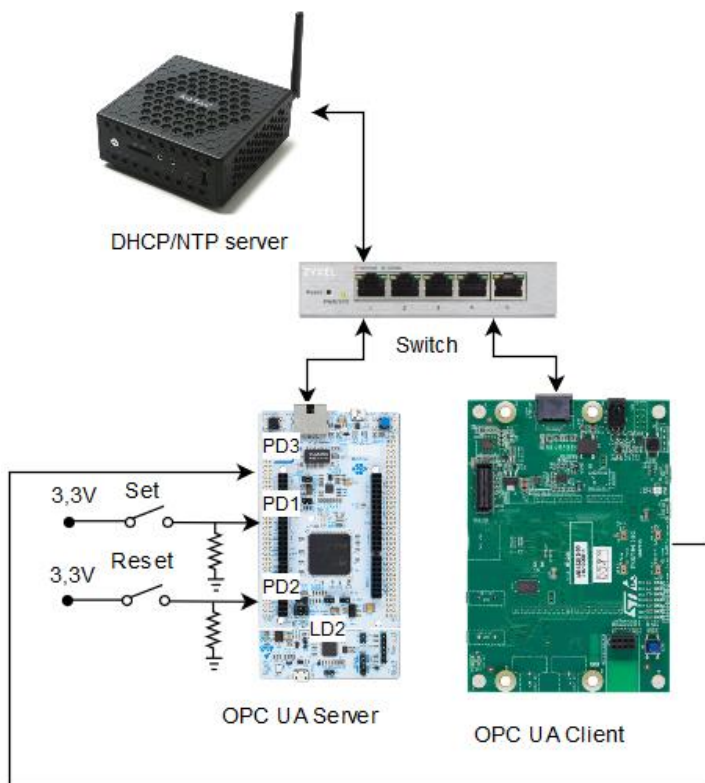
Jednotlivé implementácie vytvorených Komponentov I4.0 sú voľne dostupne ako *Docker* obrazy:



Obrázok 1 - Docker obrazy vytvorených Komponentov I4.0.

3.2. Overenie použitia komunikačného modelu OPC UA klient-server

Pre návrh platformy demonštrujúci horizontálnu interoperabilitu pre vstavané zariadenia boli použité vstavané zariadenia založené na vývojových doskách STM32 s Arm® Cortex®-M7 32-bit procesorom a operačným systémom v reálnom čase freeRTOS (real-time operating system - RTOS). Bol navrhnutý test, ktorého cieľom bolo overiť možnosti použitia komunikačného modelu klient-server v OPC UA na komunikáciu stoj - stroj.



Obrázok 2 – Experimentálne zapojenie overujúce možnosti komunikačného modelu klient-server v OPC UA.

Obe zariadenia **hostujú vstavaný (embedded) OPC UA server a klient**, ktoré boli navrhnuté pre účel experimentu.

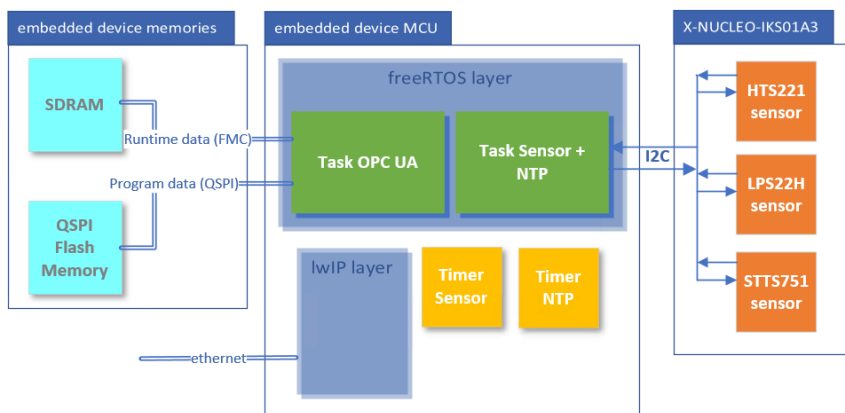
Výsledkami sú: zápis z experimentu vo forme tabuľky a normálneho rozdelenia latencií. Výsledky jednoznačne dokazujú, **že komunikačný model klient-server nie je vhodný pre potreby deterministickej komunikácie s nízkou latenciou na úrovni stroj – stroj (2)**.

3.3. Návrh metodiky na implementáciu AAS ako Komponentu Industry 4.0

Na základe analýzy súčasného stavu v oblasti digitalizácie a tvorby Komponentov I4.0 aj pomocou porovnania otvorených softvérových nástrojov na tvorbu Komponentu I4.0 z kapitoly 3.1, bola vytvorená metodika implementácie AAS ako Komponentov Industry 4.0. **Komponent I4.0 poskytuje** nie len **sémantickú interoperabilitu**, ale navyše jeho úlohou je poskytnúť **globálnu interoperabilitu v Industry 4.0**.

Pomocou tejto metodiky je možné **znižit' systémové nároky** na implementáciu AAS (t.j. Komponentu I4.0) rádovo **až 100 násobne** a tým táto metodika tiež zavádza označenie **vstavaný Komponent Industry 4.0** (z angl. **Embedded Industry 4.0 Component**) (3). Implementácia viacerých Komponentov I4.0, či už priamo vstavaných v aktíve, alebo aj mimo neho overujú danú metodiku aj v praxi.

Výsledkom je teda funkčná metodika implementácie AAS ako Komponentu Industry 4.0, ktorá využíva otvorené softvérové vývojové sady. Výstupom z praktického overenia sú Komponenty I4.0, ktoré sú použité v realizácii komunikačnej a vývojovej platformy a ktoré sú interoperabilné aj s komerčnými produktami ako sú priemyselné PLC a HMI.



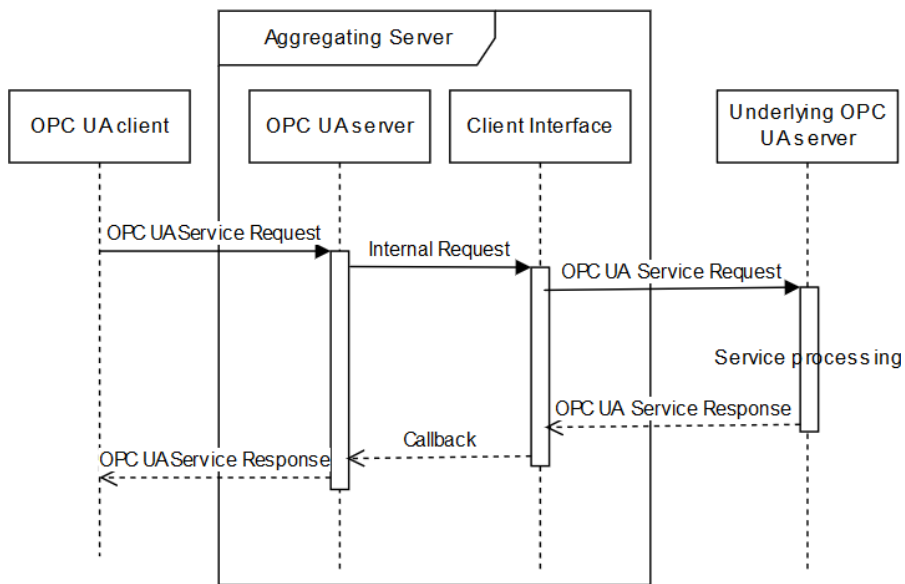
Obrázok 3 – Popis fungovania vstavaného AAS (3).

3.4. Realizácia komunikačnej platformy pre I4.0 na báze agregáčného OPC UA servera

Realizácia komunikačnej platformy pre I4.0 vychádza z návrhov architektúry vývojových platforiem pričom kladie dôraz na požiadavky:

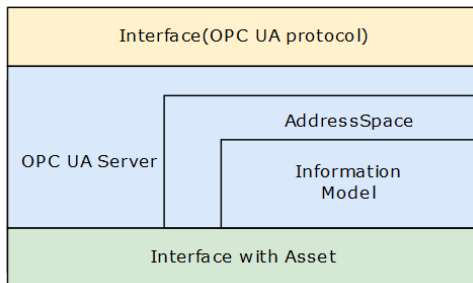
- Dostupnosť
- Škálovateľnosť
- Horizontálna a vertikálna interoperabilita
- Interoperabilita s Industry 4.0
- Schopnosť nasadenia

Základ agregáčného servera tvorí schopnosť komunikovať s inými OPC UA servermi, čo je dosiahnuté vytvorením *klienta rozhrania* (z angl. Client Interface), ktorý je v podstate samostatnou inštanciou OPC UA klienta (4):



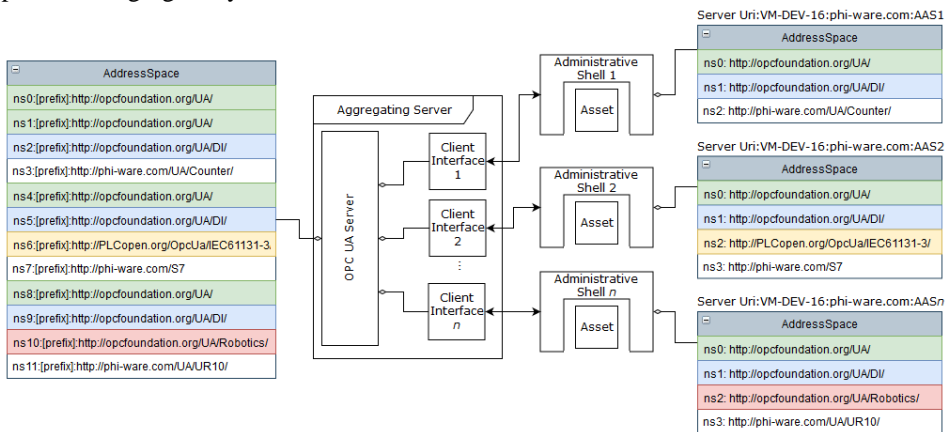
Obrázok 4 - OPC UA agregáčny server: tok odpovede a žiadosti (4).

Komunikačná (Obrázok 4) a **sémantická i globálna** (Obrázok 5) **interoperabilita s Industry 4.0 je dosiahnutá vďaka architektúre OPC Unified Architecture.**



Obrázok 5 - Realizácia AAS pomocou OPC UA (4).

Aby bola dosiahnutá jednoznačná adresácia ľubovoľného uzla agregovaného servera, bol navrhnutý mechanizmus generovania jednoznačných názvov menných priestorov agregovaných OPC UA serverov.



Obrázok 6 -Agregácia menných priestorov agregáčného OPC UA servera (4).

V praxi agregácia menných priestorov agregovaných serverov vyzerá takto:

Name	Value
[-]	String Array[10]
[0]	http://opcfoundation.org/UA/
[1]	urn:zotac:UA:AggregatingServer
[2]	http://phi-ware.com/AggregatingServer
[3]	http://opcfoundation.org/UA/Diagnostics
[4]	ns20x0:http://opcfoundation.org/UA/
[5]	ns20x3:http://admin-shell.io/samples/i4aas/instance/
[6]	ns2x0:http://opcfoundation.org/UA/
[7]	ns2x3:http://admin-shell.io/samples/i4aas/instance/
[8]	ns17x0:http://opcfoundation.org/UA/
[9]	ns17x3:http://admin-shell.io/samples/i4aas/instance

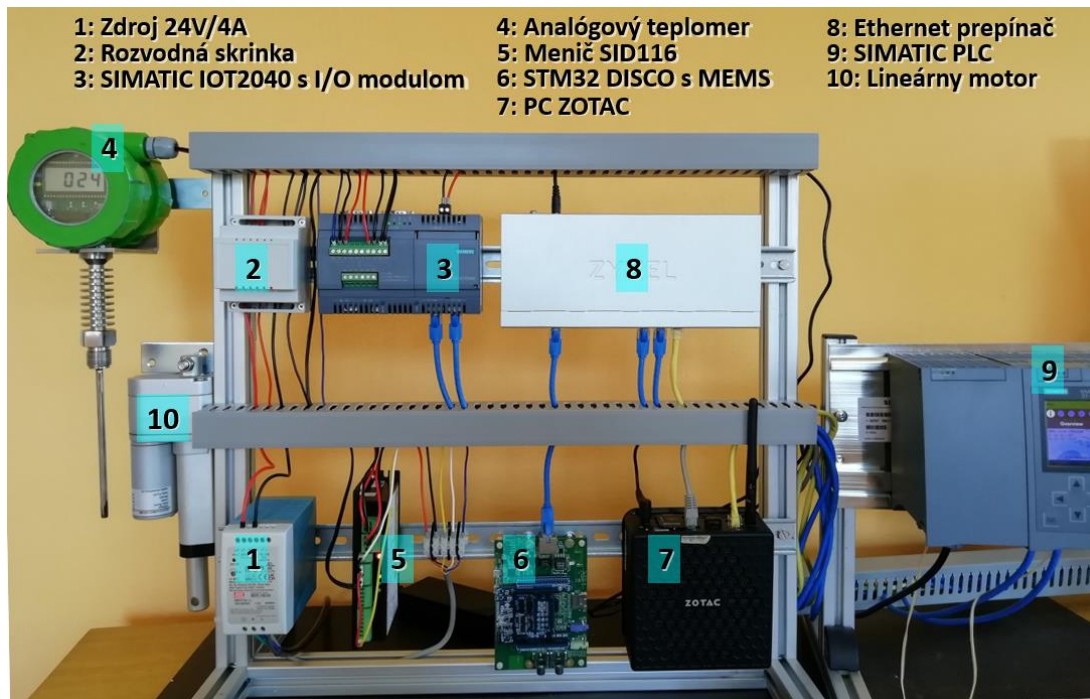
Obrázok 7 – Menné priestory agregáčného servera.

Menné priestory 4 až 9 majú predponu *nsixj* ktorá sa skladá z dvoch častí: kde *i* je identifikátor agregovaného OPC UA servera a *j* je index jeho menného priestoru.

Softvérové prevedenie komunikačnej platformy je založené na otvorenej softvérovej vývojovej sade UA-.NET Standard (5), ktoré sa skladá z viacerých častí navrhnutých a vyvinutých pre tento účel:

- Servis agregáčného OPC UA servera
- Servis webového rozhrania
- Servis databázového rozhrania
- Inštancia Platformy

Aby **bola overená funkčnosť komunikačnej platformy**, bola zostavená vývojová a komunikačná platforma ktorá obsahuje **Komponenty I4.0, ale aj komerčné systémy** schopné komunikovať cez OPC UA. Výsledná zostava bude odovzdaná do užívania ÚAMT na edukačné účely.



Obrázok 8 - Vývojová a komunikačná platforma pre Industry 4.0.

Komponenty I4.0 pripojené k platforme sú vizualizované komerčnými HMI, cez ktoré je možné **ovládať kyberneticko-fyzikálny systém** (lineárny motor s meničom).

Výsledkom je **komunikačná a vývojová platforma pre I4.0 so sémantickou interoperabilitou**, prostredníctvom ktorej je možné volať **aj servisy** agregovaných OPC UA serverov. Takže to **nie je iba komunikačná brána**, ktorá dokáže distribuovať hodnoty z pripojených OPC UA serverov. Jej fyzické prevedenie je kompaktné, s izolovanými zdrojmi napätia a je vhodné na edukačné účely v laboratóriách. Počítač ZOTAC by mal byť v blízkej budúcnosti nahradený virtuálnym serverom, taktiež umiestneným v laboratóriu ÚAMT, ktorý bude hostovaný serverom získaným darom od Nestlé Slovakia s.r.o. a môže slúžiť aj ako farma pre ďalšie virtuálne servery.

3.5. Návrh hybridnej komunikácie, ktorá ponúka výhody komunikácie PubSub a klient – server

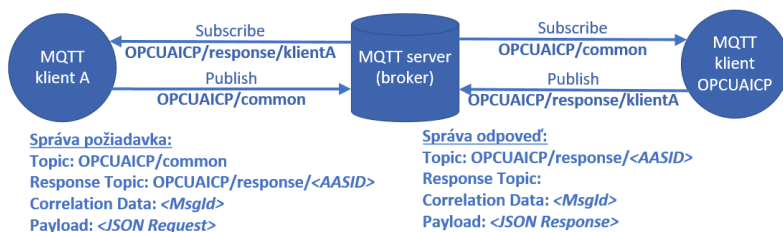
Východiskom pre návrh komunikácie popísanej v tejto kapitole je taktiež komunikácia OPC Unified Architecture, pretože spĺňa požiadavky Industry 4.0, je štandardom pre interoperabilitu v komunikácii a ponúka nástroje na tvorbu Komponentov I4.0 a navyše definuje spôsob komunikácie komunikačným modelom klient – server aj PubSub (6).

Pomenovanie **hybridná komunikácia** vychádza z toho, že navrhovaná komunikácia by mala zabezpečiť výhody (spĺňať požiadavky) komunikácie PubSub a klient – server:

- obojstranná komunikácia na obsluhu požiadavky (request) a poslanie odpovede (response).
- komunikáciu bez nutnosti priameho, alebo trvalého spojenia.
- poskytovanie dát cez PubSub.

Zo súčasného stavu poznania vyplýva že softvérové riešenia (Azure Industrial IoT Platform a z kap. 3.1) pre návrh Komponentov Industry 4.0 takúto komunikáciu neponúkajú. Ich riešením je použitie viacerých komunikačných modelov. A práve túto medzeru sa snaží vyplniť návrh hybridnej komunikácie, ktorý by **jedným komunikačným modelom pokryl výhody komunikácií Pubsub aj klient – server**.

Komunikácia MQTT spĺňa väčšinu požadovaných vlastností definovanej hybridnej komunikácie až na obojstrannú komunikáciu, potrebnú na vývoj aplikácii s architektúrou orientovanou na služby, ktorá je chrbticou OPC UA. Našťastie, MQTT v5.0 (vydaná v marci 2019) definuje nové črty: **response topic** a **correlation data**, vďaka ktorým je možné obojstrannú komunikáciu vytvoriť aj v MQTT.



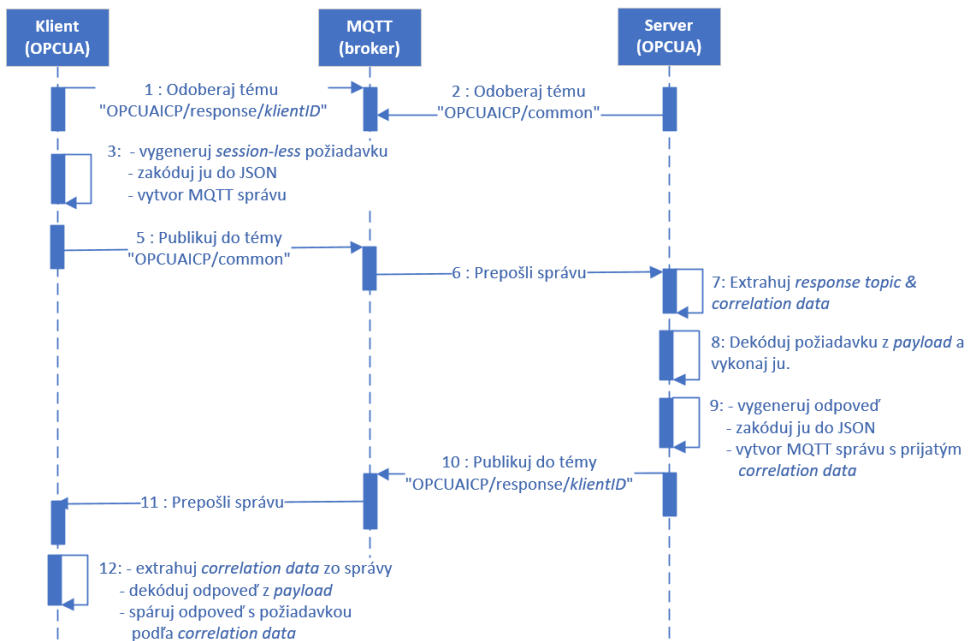
Obrázok 9 – Obojsmerná komunikácia cez MQTT v5.0

Návrh sa nezaobrá štruktúrou a implementáciou aplikácie v ktorej by mohla byť hybridná komunikácia použitá, **preto sa predpokladá nasledovné:**

- I. Požiadavky (*requests*) sú zo servisných sád, ktoré podporujú volanie bez relácií (*Session-less Service invocation*) podľa špecifikácie OPC 10000-4 (7).
- II. Požiadavky a odpovede (*requests & responses*) sú vytvorené v súlade s ich definíciou podľa špecifikácie OPC 10000-4 (7).
- III. Publikované dáta cez MQTT obsahujú *DataSetMetaData* OPC v súlade s ich definíciou podľa špecifikácie 10000-14 (6), nakonfigurované podľa špecifikácie OPC 10000-6 (8).
- IV. Aplikácia zostavujúca a prijímajúca MQTT správu je schopná extrahovať (resp. vložiť) response topic a correlation data z (do) tejto správy.

Samotný návrh vychádza zo spomenutých predpokladov, takže sa zaoberá jednotlivými krokmi iba abstraktne t.j. je nezávislý od konkrétnej implementácie.

Návrh v grafickej podobe zobrazuje diagram Obrázok 10:



Obrázok 10 - Diagram krokov hybridnej komunikácie

Kľúčové časti návrhu *hybridnej komunikácie* Obrázok 10 boli úspešne implementované pomocou voľne dostupných otvorených vývojových sád a tým sa návrh považuje za funkčný a uskutočniteľný. Tým že sa jedná o inováciu a zrejme aj prvú implementáciu takejto komunikácie, je potrebná úprava zdrojového kódu jadra UA-.NET Standard (5) a to najmä častí zostavujúcich MQTT správu. Konkrétne sa jedná a zakomponovanie *correlation data* a *response topic*. V závislosti od potrieb aplikácie je možné návrh doplniť logiku odosielania požiadavky o kontrolu jej doručenia pomocou QoS.

Navrhnutá hybridná komunikácia si môže nájsť svoje uplatnenie v aplikáciách kritických na spotrebu energie hosťujúceho zariadenia. Príkladom môže byť zariadenie napájané batériou ktoré sa pripojí k MQTT serveru (broker) iba v čase odosielania / prijímania dát, inak je v režime spánku.

4. Prehľad výsledkov dizertačnej práce

1. Analýza súčasného stavu v oblastiach modelovania a digitalizácie v priemysle, otvorených komunikačných protokolov a interoperability pre Industry 4.0.
 - Referenčný model RAMI 4.0 ako východisko pre návrh Industry 4.0 platformy.
 - Trendy vo vývoji komunikačných protokolov v priemysle a význam sémantickej interoperability.
 - OPC Unified Architecture ako štandard pre interoperabilitu.
 - Vysvetlenie pojmu Komponent Industry 4.0.
 - Porovnanie otvorených softvérových nástrojov na tvorbu Komponentu Industry 4.0 na výsledkoch získaných z praktickej implementácie AAS.
2. Návrh architektúry vývojovej platformy pre Industry 4.0 s interoperabilitou, horizontálnou a vertikálnou integráciou priemyselných komponentov a širokou škálovateľnosťou.
 - OPC UA ako riešenie spĺňajúce všetky požiadavky Industry 4.0.
 - Definícia požiadaviek pre navrhované platformy.
 - Návrh a realizácia platformy spĺňajúcej požiadavky horizontálnej interoperability.
 - Návrh platformy spĺňajúcej požiadavky vertikálnej interoperability.
 - Realizácia komunikačnej platformy pre I4.0 na báze OPC UA agregáčného servera a Komponentov I4.0 z vlastného vývoja.
3. Tvorba Komponentov I 4.0 formou AAS
 - Navrhnutá originálna metodika implementácie AAS ako Komponentu I4.0 zavádzajúca pojem *Vstavany Komponent Industry 4.0* (z angl. *Embedded Industry 4.0 Component*) publikované ako CC v (3).
 - Realizácia originálneho zariadenia ako *embedded* Komponent I4.0, na minimalistickom hardvéri STM 32.
 - Experimentálne overenie komunikačnej latencie na *embedded* zariadeniach OPC UA klient a server, publikované v (4).
4. Realizácia komunikačnej platformy na báze agregáčného servera s interoperabilitou pre Industry 4.0.

- Návrh a implementácia originálneho a inovatívneho softvérového riešenia agregáčného servera OPC UA s webovým rozhraním.
 - Realizácia agregáčnej platformy, ktorá umožňuje interoperabilnú komunikáciu OPC UA, vrátane AAS.
 - Na overenie interoperability boli použité tieto priemyselné prvky: PLC SIMATIC S7 1500, SIMATIC WinCC HMI a AVEVA Intouch HMI.
5. Návrh originálnej *hybridnej komunikácie*, ktorá ponúka výhody komunikácie pub-sub a request-response.
1. Analýza a Porovnanie komunikačných modelov klient-server a pub-sub .
 2. Návrh možného riešenia hybridnej komunikácie na báze MQTT a OPC UA.
 3. Realizácia hybridnej komunikácie nad rámec pôvodných cieľov DP.
 4. Verifikácia hybridnej komunikácie cez implementáciu jej kľúčových častí s využitím otvorených softvérových nástrojov.

5. Záver

Komunikácia je chrbticou Industry 4.0, lebo spája všetky technológie a disciplíny ktoré I4.0 zahŕňa. Takáto komunikácia musí spĺňať požiadavky I4.0, medzi ktoré patrí komunikačná aj významová (sémantická) interoperabilita. Existuje viacero komunikačných protokolov, ktoré spĺňajú podmienky komunikačnej interoperability, avšak na dosiahnutie sémantickej interoperability je potrebná štandardizovaná digitalizácia aktíva (z angl. asset) pomocou ktorej je možné prenášaným dátam priradiť ich význam. Sémantická interoperabilita je nevyhnutnou podmienkou autonómnej komunikácie v I4.0 ako aj jej pokročilým funkciami (napr. Plug and Produce). Dôležitosť sémantickej interoperability v I4.0 je nesporná, a preto sa táto práca venuje digitálnym technológiám pomocou ktorých ju je možné dosiahnuť.

Kapitola 1 dizertačnej je venovaná súčasnému stavu poznania oblastí digitalizácie aktíva pomocou referenčného modelu RAMI 4.0, ukazuje vývoj trendov priemyselných komunikačných protokolov, vysvetľuje dôležitosť sémantickej interoperability. Predstavuje OPC UA ako štandardizovaný nástroj pre dosiahnutie interoperability a vysvetľuje pojem Komponent Industry 4.0 ako prostriedok štandardizovaného digitálneho opisu aktíva. Na záver porovnáva konkrétne otvorené softvérové nástroje pomocou reálne implementovaných softvérových riešení pre Komponent I4.0.

Kapitola 2 dizertačnej práce na základe požiadaviek Industry 4.0 definuje ciele, ktoré slúžia ako východiská pre navrhnuté technológie. Táto časť je viac teoretická a abstraktne objasňuje ako sú tieto ciele dosiahnuté pomocou OPC UA a konceptu administratívnej schránky aktíva (angl. Asset Administration Shell).

Ťažisko dizertačnej práce je obsiahnuté v kapitolách 3 až 5 Kde kapitola 3 predstavuje originálnu metodiku implementácie AAS (t.j. Komponentu Industry 4.0) a zároveň ju aj overuje zapuzdrením troch rôznych aktív (vstavaný snímač MEMS, priemyselný analógový teplomer a lineárny motor s meničom) do administratívnej schránky. Kapitola 4 popisuje realizáciu komunikačnej platformy založenej na architektúre

predstavenej v kapitole 2. Táto platforma agreguje vytvorené Komponenty I4.0 do jedného komunikačného bodu, ktorý poskytuje ich dáta a služby v súlade s požiadavkami I4.0. Tento systém bol nasadený do laboratórnej prevádzky a bol k nemu pripojený priemyselný počítač PLC SIMATIC S7 1500, aby bola overená jeho interoperabilita aj s komerčnými produktami. V PLC bolo implementované riadenie pozície lineárneho motora čím bol vytvorený kyberneticko-fyzikálny systém ako Komponent I4.0. Ku komunikačnej platforme boli pripojené komerčné HMI SIMATIC WinCC a AVEVA (Wonderware) Intouch, čo tiež dokázalo interoperabilitu a schopnosť nasadenia realizovanej platformy v reálnych podmienkach, napríklad aj vo výrobe. Komunikačná platforma podporuje automatické objavovanie pripojených zariadení k sieti (pomocou OPC UA *discovery*) a identifikáciu Komponentu 4.0 v sieti pomocou sémantických identifikátorov, čo robí túto platformu pripravenou na implementáciu Plug and Produce. Na záver, v kapitole 5 je predstavený návrh hybridnej komunikácie ktorá pre potreby I4.0 ponúka výhody komunikačného modelu klient-server a Pubsub.

Z súčasného stavu poznania vyplýva že navrhnutá metodika implementácie AAS ako Komponentu Industry 4.0 je v skutku originálna a inovatívna, aplikovateľná na širokú škálu aktív (z angl. asset) a jej overenie pomocou realizácie Komponentov I4.0 dokazuje, že je prínosom v procese digitalizácie I4.0. Podobne aj realizovaná komunikačná platforma pre I4.0 na báze agregáčného servera OPC UA obsahuje inovatívne prvky ako napríklad automatické objavovanie pripojených OPC UA serverov (ako Komponentov I4.0) a poskytovanie ich služieb sieti z jedného agregovaného miesta, takže sa nejedná iba o ďalšiu komunikačnú bránu (gateway). Navyše identifikácia parametru (napríklad procesnej veličiny) agregovaného Komponentu I4.0 v sieti pomocou sémantického identifikátora je prípravou na implementáciu logiky Plug and Produce. Návrh hybridnej komunikácie sleduje najnovšie trendy ako napríklad vydanie MQTT v5.0 a definuje možnosť použitia obojsmernej komunikácie implementovanej pomocou Pubsub pre Industry 4.0, čo doposiaľ nebolo možné.

Prínosy práce

- V rámci analýzy súčasného stavu digitalizácie, modelovania, interoperabilnej komunikácie boli porovnané dostupné riešenia na tvorbu Komponentov Industry 4.0 na základe ich implementácie a experimentálne získaných poznatkov.
- Bola prakticky overená OPC UA komunikácia klient-server na konkrétnych aplikáciách s vyhodnotením latencie.
- Bola navrhnutá architektúra a podľa ktorej bola realizovaná vývojová a komunikačná platforma pre Industry 4.0 na báze agregáčného OPC UA servera. Laboratórny model je otvorený, plne funkčný a agreguje 3 servery, ktoré reprezentujú 3 Komponenty I4.0 (AAS).
- Bola navrhnutá a overená pôvodná metodika na implementáciu AAS ako Komponentu I4.0 aplikovateľná na širokú škálu zariadení. Táto metodika bola použitá na realizáciu Komponentu I4.0 formou embedded AAS na minimalistickom hardvéri STM 32, kde preukázateľne znižuje systémové nároky rádovo až 100 násobne.
- Bola navrhnutá originálna hybridná komunikácia ponúkajúca výhody komunikačných modelov klient-server a pub-sub. Hybridná komunikácia bola implementovaná a jej funkcia úspešne overená.

Budúce perspektívy výskumu

Keďže navrhnutá metodika využíva na tvorbu Komponentu I4.0 koncept AAS je vhodná aj na tvorbu interoperabilných digitálnych dvojčiat. Agregáčny server komunikačnej platformy je možné presunúť na výkonnejší hardvér (obdržaný ako dar od Nestlé Slovensko s.r.o.), kde by dokázal agregovať viac Komponentov I4.0, či už reálnych, alebo virtuálnych a využiť ho ako komunikačný uzol pre ich výmenu dát. Ďalším rozšírením by mohlo byť implementovanie logiky Plug and Produce pre ktorú ma platforma predpripravenú informačnú a komunikačnú infraštruktúru. Pridaním hybridnej komunikácie do komunikačnej platformy sa dá dosiahnuť volanie servisov OPC UA cez komunikačný model Pubsub z externých sietí, napríklad aj z Internetu. Zostavený systém použitý na overenie komunikačnej platformy bude odovzdaný pracovisku ÚAMT aby mohol slúžiť na študijné účely.

Publikačná činnosť autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - DRAHOŠ, Peter. Edge container for speech recognition. In *Electronics*. Vol. 10, iss. 19 (2021), Art. no. 2420 [20] s. ISSN 2079-9292 (2020: 2.397 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.360 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s-2.0-85116256301 ; WOS: 000726693100001 ; CC: 000726693100001 ; DOI: 10.3390/electronics10192420.

Ohlasy:

1. ZGANK, Andrej. Influence of Highly Inflected Word Forms and Acoustic Background on the Robustness of Automatic Speech Recognition for Human-Computer Interaction. In *MATHEMATICS*, 2022, vol. 10, no. 5, pp., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS

ADC02 PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - DRAHOŠ, Peter. Asset administration shell design methodology using embedded OPC unified architecture server. In *Electronics*. Vol. 10, iss. 20 (2021), Art. no. 2520 [17] s. ISSN 2079-9292 (2020: 2.397 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.360 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/electronics10202520 ; WOS: 000715604300001 ; CC: 000715604300001 ; SCOPUS: 2-s-2.0-85117093787.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - DRAHOŠ, Peter. An industrial communication platform for industry 4.0 - case study. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, [9] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039873 ; WOS: 000753938900025 ; SCOPUS: 2-s-2.0-85083112238 ; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039873.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - LESKOVSKÝ, Roman. Processing data from OPC UA server by using edge and cloud computing. In *PDeS 2019 : 16th IFAC conference on programmable devices and embedded systems. High Tatras, Slovakia. October 29-31, 2019*. 1. vyd. Laxenburg : IFAC, 2019, S. 240-245. ISSN 2405-8963. V databáze: DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.645 ; WOS: 000507495200041 ; SCOPUS: 2-s-2.0-85081593572.

Ohlasy:

1. [1] PIZON, J. - KULISZ, M. - LIPSKI, J. Matrix profile implementation perspective in Industrial Internet of Things production maintenance application. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2021-01-25, 1736, 1, pp. ISSN 17426588., Registrované v: SCOPUS

AFD02 BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf. Voice controlled DC motor using IoT Edge connected to the Azure cloud. In *ELITECH '20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020*. 1. ed.

- Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [5] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- AFD03 BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf. IoT edge container with artificial intelligence for speech recognition. In *ELITECH'21 [elektronický zdroj] : 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [6] s. ISBN 978-80-227-5098-1.
- AFD04 PRIBIŠ, Rudolf. Embedded OPC unified architecture software connects your device with Industry 4.0. In *ELITECH'19 [elektronický zdroj] : 21st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 29, 2019*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2019, CD-ROM, [7] s. ISBN 978-80-227-4915-2.
- AFD05 PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - DRAHOŠ, Peter. Implementation of micro embedded OPC unified architecture server-client. In *PDeS 2019 : 16th IFAC conference on programmable devices and embedded systems. High Tatras, Slovakia. October 29-31, 2019*. 1. vyd. Laxenburg : IFAC, 2019, S. 114-120. ISSN 2405-8963. V databáze: DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.742 ; WOS: 000507495200020 ; SCOPUS: 2-s2.0-85081565329.
- Ohlasy:
1. [1] ARM, Jakub - BENESL, Tomas - MARCON, Petr - BRADAC, Zdenek - SCHROEDER, Tizian - BELYAEV, Alexander - WERNER, Thomas - BRAUN, Vlastimil - KAMENSKY, Pavel - ZEZULKA, Frantisek - DIEDRICH, Christian - DOHNAL, Premysl. Automated Design and Integration of Asset Administration Shells in Components of Industry 4.0. In *SENSORS, 2021*, vol. 21, no. 6, pp., Registrované v: WOS
2. [1] CHARANIA, Zohra - IATROU, Chris Paul - KHAYDAROV, Valentin - JACOB, Richard - WITTIG, Robert - BAUER, Heiner - HOEPPNER, Sebastian - BACHMANN, Rene - BAUER, Philipp - DECKERT, Hendrik - MAYR, Christian - FETTWEIS, Gerhard - URBAS, Leon. Opportunities For A Hardware-Based OPC UA Server Implementation In Industry 4.0. In *IECON 2021 47TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 2021*, vol., no., pp. ISSN 1553-572X., Registrované v: WOS, SCOPUS
- AFD06 PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš. Communication platform based on OPC UA aggregating server. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [6] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- AFD07 PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš. Evaluation of open tools for designing and deploying Industry 4.0. In *ELITECH'21 [elektronický zdroj] : 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [7] s. ISBN 978-80-227-5098-1.

Referencie

1. **Bitkom; VDMA; ZVEI.** Implementation Strategy Industrie 4.0: Report on the Results of the Industrie 4.0 Platform. [Online] 2018. [Cited: máj 28, 2022.] <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Implementation-Strategy-Industrie-40-Report-on-the-results-of-the-Industrie-40-Platform.html>.
2. **Pribiš, Rudolf, Beňo, Lukáš a Drahoš, Peter.** Implementation of Micro embedded OPC Unified Architecture server-client. [Online] 2019. [Dátum: 28. máj 2022.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319326916?via%3Dihub>.
3. —. Asset Administration Shell Design Methodology Using Embedded OPC Unified Architecture Server. *Electronics 2021*. Electronics, 2021, Zv. 10, 20.
4. *An Industrial Communication Platform for Industry 4.0 - case study.* **Pribiš, Rudolf, Lukáš, Beňo a Peter, Drahoš.** Velke Karlovice, Czech Republic : IEEE, 2020. ISBN:978-1-7281-4381-1.
5. **OPC Foundation.** OPCFoundation / UA-.NET Standard git repository. [Online] 2022. [Dátum: 01. jún 2022.] <https://github.com/OPCFoundation/UA-.NETStandard>.
6. —. OPC 10000-14 - Part 14 - PubSub. [Online] 2022. [Dátum: 28. máj 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-14-pubsub/>.
7. —. OPC 10000-4 - Part 4 - Services. [Online] 2021. [Dátum: 28. máj 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-4-services/>.
8. —. OPC 10000-6 Part 6: Mappings. [Online] 2022. [Dátum: 27. máj 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-6-mappings/>.
9. **Yong, C, H, Lee, W, P and C, Lazarus.** Industry 4.0 Reference Architectural Models: Critical Review and Opportunities . [Online] 12 01, 2021. [Cited: máj 26, 2022.] <https://doi.org/10.55057/ijarei.2021.3.4.5>.
10. **ŠEMINSKÝ, Jaroslav.** KYBERNETICKO-FYZIKÁLNE SYSTÉMY VO VÝROBE. [Online] 2018. [Cited: máj 26, 2022.] http://www.sjf.tuke.sk/umpadi/taipvpp/2018/index.files/25_Seminsky_Kyberneticko_fyzikalne%20systemy%20vo%20vyrobe.pdf.
11. **Schweichhart, Karsten.** Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) - An Introduction. [Online] 2018. [Cited: máj 26, 2022.] <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>.

12. **Resnick, Craig.** OPC Technology Well-positioned for Further Growth in Tomorrow's Connected World. [Online] 2017. [Cited: máj 28, 2022.] <https://www.arcweb.com/blog/opc-technology-well-positioned-further-growth-tomorrows-connected-world>.
13. **Pribiš, Rudolf.** Sémantická interoperabilita v OPC Unified -Učebný text. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] <https://elearning.mechatronika.cool/blog/semanticka-interoperabilita-v-opc-unified-architecture/>.
14. **Pribiš, Rudol.** OPC Unified Architecture - Dočasný učebný text. [Online] 2018. [Cited: máj 26, 2022.] <https://elearning.mechatronika.cool/blog/opc-unified-architecture-ucebny-text/>.
15. **Pfrommer, Julius, et al.** Open Source OPC UA PubSub Over TSN for Realtime Industrial Communication. [Online] 2018. [Cited: máj 28, 2022.] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8502479/authors#authors>.
16. **Megow, Jörg.** REFERENCE ARCHITECTURE MODELS FOR INDUSTRY 4.0, SMART MANUFACTURING AND IOT AN INTRODUCTION. <https://www.bmwk.de>. [Online] 26. Máj 2022. https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/PAiCE_Leitfaden_Reference_Architecture.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
17. **Lin, Shi-Wan, et al.** Architecture Alignment and Interoperability An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper. [Online] december 5, 2014. [Cited: máj 2022, 2022.] https://www.iiconsortium.org/pdf/JTG2_Whitepaper_final_20171205.pdf.
18. **Lange, Jürgen, Iwanitz, Frank and Burke, Thomas, J.** *OPC Unified Architecture From Data Access to Unified Architecture*. Berlin : VDE VERLAG, 2010. Vol. IV. ISBN 3-978-3-8007-3242-5.
19. **Hoppe, Stefan.** OPC Foundation General Assembly Meeting. [Online] 2018. [Cited: máj 30, 2022.] <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2019/01/20181212-OPCF-GAM2018-v2.pdf>.
20. **González, Isaías, et al.** A Literature Survey on Open Platform Communications (OPC) Applied to Advanced Industrial Environments. 2019, Vol. 8, 5, p. 510.
21. **Foundation, OPC.** OPC 10000-3 - Part 3 - Address Space Model. [Online] 2022. [Cited: máj 28, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-3-address-space-model/>.
22. **Dauge, Sean.** Using MQTT to send and receive data for your next project. [Online] 2018. [Cited: máj 26, 2022.] <https://opensource.com/article/18/6/mqtt>.

23. **Bielik, Andrej, Grega, Michal and Halász, Peter.** Mosquito Telemetry Transport protokol pre IoT. [Online] 2017. [Cited: máj 26, 2022.] <https://elearning.mechatronika.cool/blog/message-queuing-telemetry-transport-mqtt-protokol-pre-internet-of-things/>.
24. **Beňo, Lukáš.** Protokol MQTT a OPC UA Pub/Sub. [Online] 2019. [Cited: máj 26, 2022.] <https://elearning.mechatronika.cool/blog/protokol-mqtt-a-opc-ua-pub-sub>.
25. **Beňo, Lukáš, Rudolf, Pribiš a Peter, Drahoš.** Edge Container for Speech Recognition. *Electronics*. 2021, Zv. X, 19.
26. **Plattform Industrie 4.0.** Which criteria do Industrie 4.0 products need to fulfil? [Online] 2019. [Cited: máj 26, 2022.] <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>.
27. **IGI Global.** What is Interoperability. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] <https://www.igi-global.com/dictionary/interoperability-medical-devices-information-systems/15494>.
28. **STMicroelectronics.** Quad-SPI Interface on STM32 Microcontrollers and Microprocessors AN4760 Application Note. [Online] 2021. [Cited: máj 27, 2022.] https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/b0/7e/46/a8/5e/c1/48/01/DM00227538/files/DM00227538.pdf/jcr:content/translations/en.DM00227538.pdf.
29. **ACPLT; Process Control Engineering RWTH Aachen University . openAAS** Development Repository for open Asset Administration Shell. [Online] 2018. [Cited: máj 26, 2022.] <https://acplt.github.io/openAAS/>.
30. **open62541.** open62541 Introduction. [Online] 2021. [Cited: máj 29, 2022.] <http://www.open62541.org/doc/1.3/>.
31. —. open62541 git repository. [Online] 2022. [Cited: jún 01, 2022.] <https://github.com/open62541/open62541>.
32. **OPC Foundation.** OPC Unified Architecture, Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN.pdf>.
33. —. OPC UA Profiles. *OPC UA Profiles*. [Online] [Cited: máj 28, 2022.] <https://profiles.opcfoundation.org/category/42>.
34. —. OPC 30270 – UA for Industrie 4.0 Asset Administration Shell. [Online] 2021. [Dátum: 28. máj 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-opc-ua-information-models/opc-ua-for-i4-asset-administration-shell>.

35. —. OPC 30040 - UA for AutomationML. [Online] 2016. [Cited: máj 28, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-opc-ua-information-models/opc-unified-architecture-for-automationml/>.
36. —. OPC 10000-8 - Part 8 - DataAccess. [Online] 2021. [Cited: máj 29, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-8-data-access/>.
37. —. OPC 10000-7 - Part 7: Profiles. [Online] 2017. [Cited: máj 28, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-7-profiles/>.
38. —. OPC 10000-5 - Part 5 - Information Model . [Online] 2022. [Cited: máj 29, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-5-information-model/>.
39. —. OPC 10000-3 - Part 3 - Address Space Model. [Online] 2022. [Cited: máj 27, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-3-address-space-model/>.
40. —. OPC 10000-2 - Part 2: Security. [Online] 2018. [Cited: máj 29, 2022.] <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-2-security-model/>.
41. **NOVA School of Science and Technology**. NOVA Asset Administration Shell. [Online] 2022. [Cited: máj 28, 2022.] <https://gitlab.com/novaas/catalog/nova-school-of-science-and-technology/novaas>.
42. **HMS**. News from HMS. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] <https://www.hms-networks.com/news-and-insights/news-from-hms/2020/05/29/industrial-network-market-shares-2020-according-to-hms-networks>.
43. **SIEMENS**. IOT2000 Extension Modules. [Online] 2018. [Cited: máj 29, 2022.] <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109745681/iot2000-extension-modules?dti=0&lc=en-LT>.
44. **Object Management Group®**. Introduction To OMG's Unified Modeling Language™ (UML®). [Online] [Cited: máj 29, 2022.] <https://www.uml.org/what-is-uml.htm>.
45. **SAP**. i40-aas . [Online] 2021. [Cited: máj 28, 2022.] <https://github.com/SAP/i40-aas>.
46. **kalycito**. How to run OPC UA PubSub on real-time Linux and TSN using open62541. [Online] [Cited: máj 28, 2022.] <https://www.kalycito.com/how-to-run-opc-ua-pubsub-tsn/>.

47. **OPC Foundation.** Extending OPC UA to the field: OPC UA for Field eXchange (FX). [Online] 2021. [Cited: máj 28, 2022.] <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2020/11/OPCF-FLC-Technical-Paper-C2C.pdf>.
48. **Eclipse.** Eclipse BaSyx. [Online] 2021. [Cited: máj 28, 2022.] <https://www.eclipse.org/basyx/>.
49. **ECLASS.** ECLASS - Search the ECLASS content. [Online] 2022. [Cited: máj 28, 2022.] <https://eclass.eu/en/eclass-standard/search-content>.
50. **Platform Industrie 4.0.** Details of the Asset Administration Shell—Part 2. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part2_V1.html.
51. —. Details of the Asset Administration Shell—Part 1. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] <https://www.zvei.org/en/press-media/publications/details-of-the-asset-administration-shell>.
52. **ClodRail.** Connect IO-Link Sensors to Aveva Insight. [Online] 2020. [Cited: máj 26, 2022.] <https://www.youtube.com/watch?v=mCZIDkWsXPo>.
53. **Boston Consulting Group.** BCG: Industry 4.0 to lift manufacturing to new levels. [Online] 2015. [Cited: máj 28, 2022.] <https://www.consultancy.uk/news/2099/bcg-industry-40-to-lift-manufacturing-to-new-levels>.
54. **Microsoft.** Azure Industrial IoT Platform. [Online] 2022. [Cited: máj 28, 2022.] <https://github.com/Azure/Industrial-IoT>.
55. **AutomationML e.V. c/o IAF.** AutomationML. [Online] [Cited: máj 29, 2022.] <https://www.automationml.org/about-automationml/automationml/>.
56. **Industrial Digital Twin Association e.V.** Asset Administration Shell Frequently Asked Questions List. [Online] 2022. [Cited: máj 27, 2022.] <https://github.com/admin-shell-io/questions-and-answers>.
57. **Sino-German Industrie 4.0.** Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing System Architecture. [Online] 2018. [Dátum: 26. maj 2022.] <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/hm-2018-manufacturing.html>.
58. **Industrial Digital Twin Association e.V.** AASX server. [Online] 2022. [Cited: máj 28, 2022.] <https://github.com/admin-shell-io/aasx-server>.