

**Ing. Michal Kostoláni**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**Výskum a vývoj systému rozšírenej reality pre údržbu plniaceho zariadenia**

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

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

**Miesto a dátum:**                    Bratislava, 30.5.2020



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

**Ing. Michal Kostoláni**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**Výskum a vývoj systému rozšírenej reality pre údržbu plniaceho zariadenia**

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

**v doktorandskom študijnom programe:**    Mechatronické systémy

**Miesto a dátum:**      Bratislava, 30.5.2020

**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. Michal Kostoláni  
Ústav automobilovej mechatroniky  
FEI STU BA, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Školiteľ:** prof. Ing. Justín Murín, DrSc.  
Ústav automobilovej mechatroniky  
FEI STU BA, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Oponenti:** prof. Ing. Pavol Tanuška, PhD.  
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky  
MtF STU v Trnave, J. Bottu 25, 91724 Trnava  
e-mail: [pavol.tanuska@stuba.sk](mailto:pavol.tanuska@stuba.sk)

prof. Ing. Iveta Zolotová, PhD.  
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU Košice  
Vysokoškolská 4, 042 00 Košice  
e-mail: [iveta.zolotova@tuke.sk](mailto:iveta.zolotova@tuke.sk)

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná:** 29.06.2020

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

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

# ABSTRAKT

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

|                                 |                                                                   |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Študijný program:               | Mechatronicke systémy                                             |
| Autor:                          | Ing. Michal Kostoláni                                             |
| Dizertačná práca:               | Výskum a vývoj rozšírenej reality pre údržbu plniaceho zariadenia |
| Vedúci dizertačnej práce:       | prof. Ing. Justín Murín, DrSc.                                    |
| Miesto a rok predloženia práce: | Bratislava 2020                                                   |

Vzájomne prepojené výrobné zariadenia komunikujúce v sieťach priemyselného internetu vecí IIoT tvoria v dnešnej dobe významný krok k implementácii koncepcie Industry 4.0. Proces digitalizácie priemyslu sa dotýka nie len samotného výrobného procesu, ale aj stratégie a procesov údržby. Významnou alternatívou ku konvenčnému prístupu vykonávania údržby a monitorovania výrobných zariadení v sieti IIoT predstavuje využitie technológie rozšírenej reality. Vývoj aplikácie, ktorá umožní monitorovanie systému plnenia chladiacej kvapaliny a zároveň pomôže zefektívniť proces údržby použitím technológie rozšírenej reality si vyžaduje znalosti z viacerých oblastí mechatroniky. Výsledkom dizertačnej práce je autorom navrhnutá, realizovaná a testovaná mobilná modulárna aplikácia rozšírenej reality pre potreby vykonávania údržby na vyššie uvedenom zariadení. Procesné a prevádzkové dáta z riadiaceho systému PLC sú posielané pomocou priemyselnej brány IoT 2040 do technologickej platformy Thingworx. Samotná aplikácia rozšírenej reality je vytvorená vo vývojovom prostredí Vuforia Studio, ktorá využíva detekciu a rozpoznávanie špeciálnych značiek. Autorom dizertačnej práce vytvorená aplikácia rozšírenej reality predstavuje komplexné riešenie pre údržbu systému plnenia chladiacej kvapaliny, ktorá pozostáva z funkcionalít monitorovania parametrov, návodov na údržbu, montážnych sekvencií a vizualizácie náhradných dielov.

**Kľúčové slová:** rozšírená realita, údržba, systém plnenia chladiacej kvapaliny, aplikácia, IIoT

# ABSTRACT

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

|                               |                                                                                                    |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Study Programme:              | Mechatronic Systems                                                                                |
| Author:                       | Ing. Michal Kostoláni                                                                              |
| Thesis:                       | Research and development of the augmented reality application for maintenance of filling equipment |
| Supervisor:                   | prof. Ing. Justín Murín, DrSc.                                                                     |
| Place and year of submission: | Bratislava 2020                                                                                    |

Interconnected process equipment that communicating in the industrial internet of thing IIoT present an important step towards the implementation of the concept Industry 4.0. The process of industry digitalization will affect not only the assembly processes itself, but the maintenance strategy and processes as well. The use of augmented reality technology is an important alternative to the conventional approach of maintenance processes and monitoring of production facilities in the IIoT network. Development of augmented reality application that enables process equipment monitoring while improving the maintenance processes requires knowledge in several fields of mechatronics. The result of this dissertation thesis is the author designed, implemented and tested modular mobile application of augmented reality for the needs of maintenance on the above mentioned equipment. The process and operating data from the PLC control system are transported via industrial gateway IoT 2040 to the Thingworx technology platform. The augmented reality application itself is created in the Vuforia Studio development kit, which uses tag detection and recognition. This application created by the author of this dissertation represents a comprehensive solution for the maintenance of filling equipment that consists of parameter monitoring, maintenance instruction lists, visual sequences of assembly instructions and spare parts visualization.

Keywords: augmented reality, maintenance, filling equipment, application, IIoT

# Obsah

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| ABSTRAKT .....                                                | 5  |
| ABSTRACT .....                                                | 6  |
| Úvod .....                                                    | 8  |
| 1 Prehľad súčasného stavu.....                                | 10 |
| 2 Ciele dizertačnej práce .....                               | 12 |
| 3 Výsledky riešenia dizertačnej práce.....                    | 15 |
| 3.1 Návrh a realizácia komunikácie.....                       | 15 |
| 3.2 Metodika vizualizácie dodatočných informácií .....        | 17 |
| 3.3 Realizácia a testovanie aplikácie rozšírenej reality..... | 18 |
| 3.4 Zefektívnenie procesu údržby použitím aplikácie AR.....   | 20 |
| 4 Diskusia .....                                              | 21 |
| Záver .....                                                   | 23 |
| Publikačná činnosť autora.....                                | 26 |
| Ostatné .....                                                 | 27 |
| Zoznam použitej literatúry.....                               | 28 |

# Úvod

Výrobné zariadenia prechádzajú po celom svete, a prakticky vo všetkých odvetviach priemyslu významnou transformáciou. Digitalizácia mení spôsob, akým spracúvame materiály a vyrábame výrobky. Pojem Industry 4.0 je označenie pre súčasný trend digitalizácie a s ňou súvisiacu automatizáciu výroby, ako aj zmenu na trhu práce.

Medzi základné prvky Industry 4.0 patria kyber-fyzikálne systémy, snímajúce a spracovávajúce dáta z fyzických zariadení. Zavádzanie nových inovatívnych technológií v rámci priemyselnej výroby smeruje k vytvoreniu takzvaných inteligentných (smart) tovární, v ktorých ľudia, stroje, zariadenia, logistické systémy, ale aj produkty sú zosieťované, dokážu navzájom spolu komunikovať a spolupracovať.

Dáta sa teda stávajú významným kľúčom, ktorý môže otvoriť dvere technologickým možnostiam so schopnosťou úplne pretvárať výrobu. Vzájomne prepojené technológie, produkty, ľudia poskytujú obrovské množstvo dát, ktoré pomáhajú zvyšovať efektívnosť výrobných strojov a zariadení, znižovať náklady, šetriť zdroje a napomáhať optimalizovať procesy. Takto optimalizované a transparentné procesy poskytujú spoločnostiam prehľad a schopnosť rýchlo a pružne reagovať na zmeny na trhoch.

V prípade automobilového priemyslu sa proces digitalizácie dotýka nie len samotného výrobného procesu, ale aj všetkých obslužných a podporných procesov. Proces transformácie a digitalizácie sa vo veľkej miere dotýka aj stratégie a procesov údržby, ktoré majú priamy vplyv na výkon strojov a zariadení. Tá je úzko prepojená s produktivitou výroby, návratnosťou investícií a následne ziskom spoločnosti.

Automatizácia, robotizácia a digitalizácia prinášajú nové výzvy, ktoré reagujú na zmenený vzťah medzi človekom a strojom. Technológia rozšírenej reality umožňuje pracovníkom údržby doplniť zorné pole o doplňujúce digitálne informácie v reálnom čase, zobrazovať procesy v digitálnom prostredí. To umožňuje užívateľom získať napríklad všetky informácie o stave zariadenia, návodov na opravu či dokonca pomoc od experta.

Cieľom predloženej dizertačnej práce je výskum a vývoj aplikácie rozšírenej reality pre údržbu systému plnenia chladiacej kvapaliny v automobile, pričom sa zameriava na zefektívnenie procesu. Je teda motivovaná špecifickými požiadavkami z výrobného procesu. V kontexte výskumných prác o rozšírenej realite sa jedná o oblasť aplikačne orientovaného výskumu.



V rámci zefektívnenia procesu údržby plniaceho zariadenia, interaktívneho zaškolenia a vizualizácie procesov bola v tejto dizertačnej práci navrhnutá komunikačná architektúra umožňujúca realizáciu priemyselného internetu vecí (IIoT). Implementovaním priemyselnej brány (gateway) k riadiacemu systému PLC bolo realizované prepojenie samotného zariadenia s databázami a cloudovými službami. Týmto spôsobom sú dôležité procesné parametre systému plnenia posielané na server v reálnom čase, analyzované, a poskytované pre ďalšie aplikácie. Pre potreby údržby je vytvorená aplikácia rozšírenej reality, ktorá zobrazuje dodatočné digitálne informácie na mobilnom zariadení. Pomocou tejto aplikácie sú po naskenovaní unikátnej 2D značky v reálnom čase a na konkrétnom mieste zobrazované prevádzkové parametre systému, návody a postupy na údržbu systému plnenia, ako aj jednotlivé náhradné diely systému s popisom. Táto aplikácia bola testovaná a následne prispôbena podľa reálnych požiadaviek pri údržbe systému plnenia.

Výsledkom tejto dizertačnej práce je autorom navrhnutá, realizovaná a testovaná modulárna mobilná aplikácia rozšírenej reality pre údržbu priemyselného systému plnenia na mobilnom zariadení. Ďalším z prínosov riešenia je autorom navrhnutý komunikačný koncept, ktorý na získanie a posielanie dôležitých procesných a prevádzkových dát z PLC do cloudového systému používa autorom vytvorené komunikačné prepojenie. V predstavenom riešení sú použité len priemyselne certifikované komponenty, takže riešenie môže byť použité naprieč celým spektrom priemyselnej výroby.

# 1 Prehľad súčasného stavu

Industry 4.0 znamená rozsiahlu transformáciu celej sféry priemyselnej výroby prostredníctvom prepojenia digitálnych technológií a robotizácie s konvenčným priemyslom (dodávateľia, fabrika, distribútori, dokonca produkt samotný) do integrovaného reťazca. Výrobné podniky majú byť založené na globálnej sieti spájajúce inteligentné stroje, skladové systémy a výrobky do kyberfyzikálnych systémov (CPS).

Aby sa teoretická koncepcia štvrtej priemyselnej revolúcie mohla aplikovať priamo vo výrobných procesoch a podnikoch, je potrebná integrácia celého radu inovatívnych informačno-komunikačných technológií, ako sú Industrial Internet of Thing (IIoT), Big Data, Cloud Computing, virtuálna a rozšírená realita a pod. Tradičný výrobný model sa tak transformuje na tzv. inteligentnú továreň.

V prípade automobilového priemyslu sa proces digitalizácie dotkne nie len samotného výrobného procesu, ale aj všetkých obslužných a podporných procesov. Proces transformácie a digitalizácie sa vo veľkej miere dotýka aj stratégie a procesov údržby, ktoré majú priamy vplyv na výkon strojov a zariadení.

Pojem údržba technických strojov a systémov je definovaný ako súbor činností, s cieľom zabezpečenia prevádzky schopného stavu a predchádzaniu systémových výpadkov.

V dnešnej dobe zaužívaný koncept preventívnej údržby zahŕňa pravidelné vizuálne a fyzické kontroly, ktoré poskytujú špecifickejšie informácie o stave stroja alebo systému. Jednotlivé časti systémov sa preventívne vymieňajú v preddefinovaných intervaloch. To predstavuje prekážku efektívnej prevádzky.

Zavedenie priemyselného internetu vecí (IIoT), systémov na monitorovanie stavu zariadení (condition monitoring), spracovávanie a vyhodnocovanie veľkého množstva dát (Big Data), ako aj zavedenie rozšírenej reality do procesov údržby výrazne zvýši efektívnosť a kvalitu výrobných procesov, ako aj napomôže k eliminácii chýb spôsobených ľudským faktorom.

Jedným z hlavných aspektov modernizácie procesov údržby a tiež prvým krokom k Priemyslu 4.0 v oblasti tradičnej údržby je aj inteligentná interakcia v reálnom čase a rozširovanie schopností fyzického sveta prostredníctvom digitalizácie a vizualizácie s digitálnym obsahom.

Veľké množstvo technológií v rámci konceptu Industry 4.0 má pôvod vo webových technológiách a v informatike. Ich implementácia na procesnej úrovni je obmedzená hardvérom, pretože sú primárne určené na riadenie procesov.

V každom prípade existujú možnosti implementácie vizualizácie údajov podľa potrieb zákazníkov od jednoduchých prehľadov až po plnohodnotné

webové rozhranie HMI (Human Machine Interface).

Doba sa však rýchlo mení a rozšírená realita prestáva byť len technologickým výstrelkom. Dnes už je užitočným pomocníkom v rôznych oblastiach ako zdravotníctvo, priemysel a stavebníctvo, školstvo, ale aj finančný svet či samospráva. Každá z týchto oblastí dnes hlási nedostatok odborníkov, no práve tento problém môže veľmi efektívne riešiť práve rozšírená realita.

Rozšírená realita (AR) predstavuje generáciu systémov s integrovanými výpočtovými a zobrazovacími schopnosťami, ktoré kombinujú reálne a digitálne objekty v reálnom prostredí. Táto technológia na jednej strane ponúka pridanú hodnotu na riadenie výroby a na druhej strane umožňuje zvýšenie zručností a urýchlenie procesu údržby plniaceho zariadenia. Vlastné používateľské webové stránky ponúkajú neobmedzené možnosti. Aplikácie priemyselnej rozšírenej reality (IAR) sú systémy, ktoré využívajú koncept priestorovo interaktívneho prekrytia počítačom generovaných informácií v pracovnom kontexte.

Technológie rozšírenej reality môžu byť riešením aj akútneho nedostatku odborníkov – špecialistov. Vďaka nástrojom rozšírenej reality a znalostiam, ktoré budú koncentrované v digitálnej podobe a ktoré budú tieto aplikácie využívať, zvládnu aj menej skúsení pracovníci vykonať to, čo je teraz v kompetencii skúsenejších pracovníkov údržby.

V súčasnosti existuje viacero pilotných projektov a prípadových štúdií, ktorých hlavnou úlohou je popularizácia danej technológie, avšak pre nasadenie v sériovom procese výroby sú vo väčšine prípadov nevhodné. Sú totiž založené na platformách a komponentoch, ktoré nie sú primárne určené a certifikované na použitie v priemyselných podmienkach. Nemenej dôležitým faktom je, že tieto aplikácie sú vytvárané vývojármi, ktorí vo väčšine prípadov nemajú znalosť priamo o výrobných procesoch, preto takto vytvorená aplikácia nespĺňa svoju primárnu funkciu – doplniť dodatočné digitálne informácie dôležité z hľadiska procesu (výroby, údržby, servisu a pod.) v užívateľsky prívetivom a intuitívnom prostredí.

Údržba využívajúca rozšírenú realitu sa od zaužívaných systémov údržby líši tým, že údržbára dokáže priamo na mieste zásahu inštruovať a podporovať dodatočnými informáciami, ktoré štandardné systémy údržby v takom rozsahu a používateľsky prívetivým spôsobom nezvládajú. Cez inteligentný telefón alebo tablet zamierený na konkrétne miesto získava údržbár k dispozícii množstvo kontextových informácií k danému zariadeniu.

Cieľom využitia rozšírenej reality je teda naučiť ľudí reagovať na vzniknuté stavy a problémy, ako aj vizualizácia pracovných postupov pri činnostiach ako sú nastavovanie, údržba, opravy, výmeny a pod.

## 2 Ciele dizertačnej práce

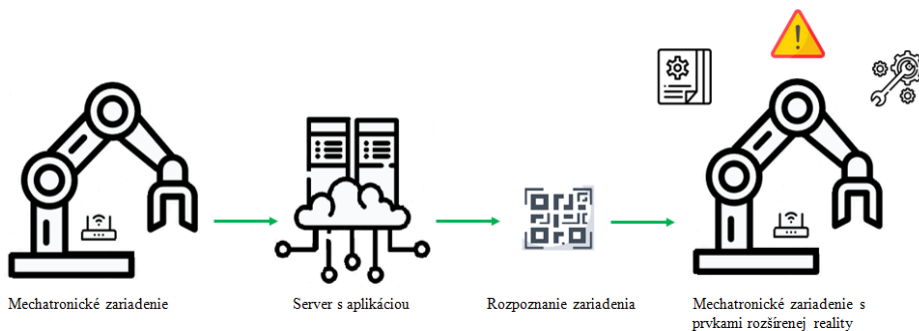
Vývoj v oblasti rozšírenej reality pre priemyselné aplikácie v oblasti údržby, logistiky a výroby pomocou najnovších informačno-komunikačných technológií patrí k moderným a veľmi dôležitým smerom. Na základe vlastných skúseností z oblasti údržby priemyselných zariadení, zrealizovaného pilotného projektu s využitím technológie rozšírenej reality, ako aj na základe vykonanej analýzy vedeckých publikácií a komerčne dostupných riešení som zistil, že v súčasnosti existuje viacero prototypových aplikácií a pilotných projektov rozšírenej reality pre priemyselné použitie. Tieto prototypové aplikácie sú realizované formou jednoúčelových systémov, ktoré neumožňujú modulárne riešenia a pre praktické použitie v vo viacerých priemyselných oblastiach nie sú vhodné.

V súčasnosti sú výrobné zariadenia monitorované pomocou SCADA systému a ovládané pomocou konzolových HMI systémov. V prípade jednoduchej výrobnéj linky je takýto prístup dostatočný, nakoľko pracovník údržby vie, kde sa ktoré zariadenie nachádza a ako je skonštruované. V prípade zložitej výrobnéj linky, na ktorej sa nachádza mnoho technológií od rôznych dodávateľov je prístup na báze znalostí nedostatočný. V rámci zvyšujúcej sa automatizácie a robotizácie výroby je vyvíjaný stále väčší tlak na údržbu, aby bola zabezpečená čo najvyššia technická disponibilita zariadení s minimálnymi personálnymi nákladmi, a nákladmi spojenými s náhradnými dielmi. Implementácia moderných technológií do zaužívaných procesov údržby predstavuje jednu z možností, ako zabezpečiť vyššie uvedené požiadavky.

Výskum a vývoj rozšírenej reality pre údržbu systému plnenia chladiacej kvapaliny v sieťach IIoT predstavuje multidisciplinárnu úlohu, nakoľko spája prácu s mechanickými a elektrickými komponentmi, riadiacim systémom PLC, komunikačnými protokolmi nie len v rámci priemyselnej automatizácie, ale aj v rámci cloudových služieb a vývojovým prostredím pre rozšírenú realitu Vuforia Studio.

Výberom vhodných hardvérových a softvérových komponentov je možné navrhnúť a zrealizovať modulárny a zároveň funkčný systém rozšírenej reality pre potreby údržby v rôznych odvetviach priemyslu.

Na základe analýzy reálnych požiadaviek z údržby systému plnenia chladiacej kvapaliny, ako aj analýzy dostupných technológií bol navrhnutý koncept, ktorý je ilustrovaný na Obr. 1.



Obr. 1: Koncept údržby systému plnenia pomocou rozšírenej reality

Ciele dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

1 Návrh a realizácia komunikačnej architektúry systému plnenia chladiacej kvapaliny v automobile pre potreby údržby:

- Možnosti využitia IIoT v komunikačnej architektúre systému plnenia chladiacej kvapaliny.
- Návrh komunikácie medzi systémom plnenia a cloudom (systémom AR).
- Realizácia komunikácie prostredníctvom priemyselnej brány IoT 2040.

2 Návrh a realizácia metodiky pre vizualizáciu prevádzkových parametrov a pracovných postupov pri údržbe systému plnenia:

- Návrh metodiky pracovných postupov a systému vizualizácie.
- Programová realizácia vizualizácie prevádzkových parametrov v prostredí Vuforia.
- Realizácia pracovných postupov pomocou mobilnej aplikácie rozšírenej reality.

3 Zefektívnenie procesu údržby systému plnenia použitím rozšírenej reality:

- Proces údržby systému plnenia využitím rozšírenej reality.
- Kvantitatívne ukazovatele efektivity procesu údržby systému plnenia.

4 Realizácia systému a zhodnotenie výsledkov a praktickej aplikácie v praxi pri údržbe systému plnenia

Úlohou predloženej dizertačnej práce je teda navrhnuť a zrealizovať komplexnú modulárnu aplikáciu pre údržbu a servis systému plnenia chladiacej kvapaliny automobilov s využitím technológie rozšírenej reality.

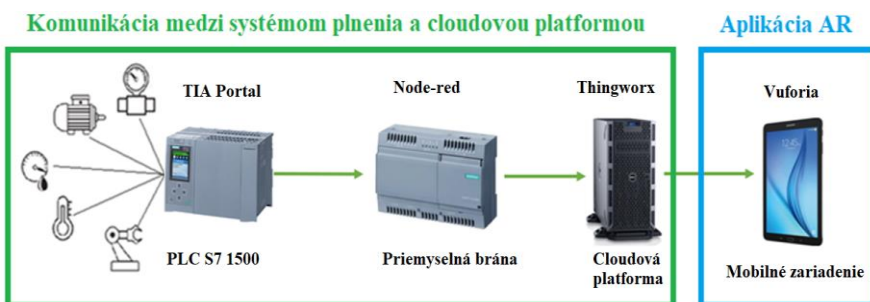
Systém plnenia chladiacej kvapaliny bol spomedzi mnohých výrobných zariadení zvolený pre dizertačnú prácu ako objekt výskumu z dôvodu, že predstavuje komplexné mechatronické zariadenie kombinujúce prvky mechaniky, elektroniky, hydrauliky, pneumatiky a prvky priemyselného riadenia. Predstavuje tak vhodný model na verifikáciu navrhovanej metodiky.

V aktuálnom stave predstavuje tento systém samostatne stojace zariadenie riadené pomocou PLC, ktoré neumožňuje využitie konceptu Industry 4.0.

V rámci praktickej časti dizertačnej práce bude zariadenie z hardvérovej, ako aj softvérovej stránky upravené tak, aby na ňom bolo možné uplatniť koncept Industry 4.0 pri použití priemyselne certifikovaných komponentov.

Praktická časť predloženej práce sa teda dá rozdeliť do 2 hlavných blokov:

- A. Návrh a realizácia komunikácie medzi systémom plnenia a aplikáciou rozšírenej reality v cloude. V rámci tohto bloku bude k riadiace PLC rady TIA Portal S7 1500 hardvérovo aj softvérovo rozšírené o priemyselnú bránu IoT 2040. Nastavenie komunikácie medzi PLC, priemyselnou bránou a cloudovou aplikáciou bude realizované v prostredí Node-red. Komunikácia medzi cloudovou aplikáciou a aplikáciou rozšírenej reality bude realizovaná využitím platformy Thingworx.
- B. Vytvorenie aplikácia rozšírenej reality. V rámci tohto bloku bude vytvorená metodika vizualizácie dodatočných informácií, ako aj modulárna aplikácia rozšírenej reality vo vývojovom prostredí Vuforia Studio. Vytvorená aplikácia bude testovaná pracovníkmi údržby pri simulovanom poruchovom stave za účelom vyhodnotenia efektivity navrhovaného riešenia pri údržby systému plnenia chladiacej kvapaliny.



Obr. 2: Roadmap – hlavné bloky dizertačnej práce

## 3 Výsledky dizertačnej práce

V rámci dizertačnej práce boli aplikované princípy údržby podľa koncepcie Industry 4.0 na systéme plnenia chladiacej kvapaliny, ktorý sa používa pri plnení chladiaceho systému automobilu. V tejto časti sú opísané praktické výstupy a výsledky dizertačnej práce.

Úvodom sa zaoberá návrhom a realizáciou komunikácie medzi riadiacim systémom PLC, ktorý je rozšírený o priemyselnú bránu IoT 2040, a cloudovou platformou Thingworx.

Ďalšie podkapitoly zaoberajúce sa návrhom metodiky vizualizácie dodatočných informácií, realizáciou a testovaním unikátnej mobilnej aplikácie rozšírenej reality pre potreby údržby systému plnenia, ktorá vylepšuje a dopĺňa konvenčný spôsob údržby a monitorovania zariadenia. Toto komplexné riešenie možno pokladať za aplikačno-vedecký prínos k rozvoju študijného odboru mechatronika.

### 3.1 Návrh a realizácia komunikácie

Systém plnenia chladiacej kvapaliny automobilu predstavuje samostatne stojace zariadenie, ktoré pozostáva zo senzorov, aktuátorov a riadiaceho PLC.

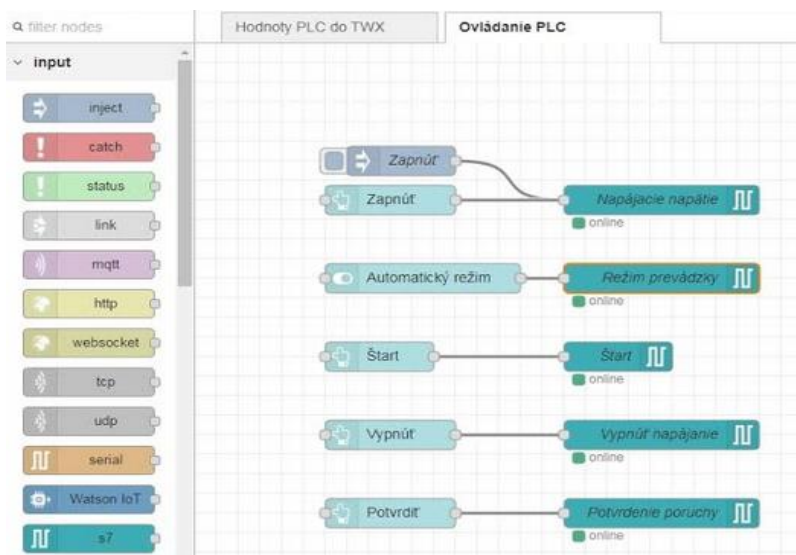
Na základe koncepcie IIoT opísanej bolo navrhnuté a realizované hardvérové a softvérové rozšírenie riadiaceho systému plnenia o priemyselnú bránu IoT 2040. Priemyselná brána harmonizuje komunikáciu medzi rôznymi zdrojmi údajov na veľké vzdialenosti, a tak umožňuje výmenu informácií medzi riadiacim systémom a cloudovou platformou.

Aby bola umožnená komunikácia medzi riadiacim systémom plniaceho zariadenia chladiacej kvapaliny a priemyselnou bránou, je potrebná úprava na strane PLC programu, ako aj konfigurácia na strane priemyselnej brány v kombinácii s vizuálnym editorom Node-red.

Pomocou tohto editora boli vizuálne naprogramované prepojenia medzi premennými z PLC, teda definovanými vstupmi a želanými výstupmi. Tým sú vytvorené dátové toky (flow), teda systém previazaných vstupno-výstupných uzlov použitých v riadiacom programe plniaceho zariadenia chladiacej kvapaliny.

Aby bol však dátový tok funkčný, je potrebné ku každému uzlu priradiť prislúchajúcu premennú. Priradením premennej I1.0 uzlu napájacieho napätia je zabezpečené, že po zatlačení vstupného tlačidla „zapnúť“ sa aj v riadiacom systéme PLC zmení stav premennej I1.0, a zapne sa napájacie napätie plniaceho zariadenia.

Pri definovaní každej premennej je nutné postupovať analogicky a definovať premennú z riadiaceho systému.



Obr. 3: Základné dátové toky

Na spracovanie a odoslanie dát z PLC do aplikácie rozšírenej reality je použitá technologická platforma Thingworx. Základným prvkom digitálneho znázornenia fyzických zariadení je v tejto platforme Thing (vec).

Každý jeden stroj je Thing (vec). Zariadenie alebo zdroj dát, ktorý je vzdialený od Thingworx a je prístupný cez sieť, je prepojený pomocou priemyselného pripojenia (industrial connections).

V rámci praktickej časti práce bol vytvorený unikátny komunikačný uzol, ktorý umožňuje komunikáciu s platformou Thingworx pomocou HTTP REST protokolu.

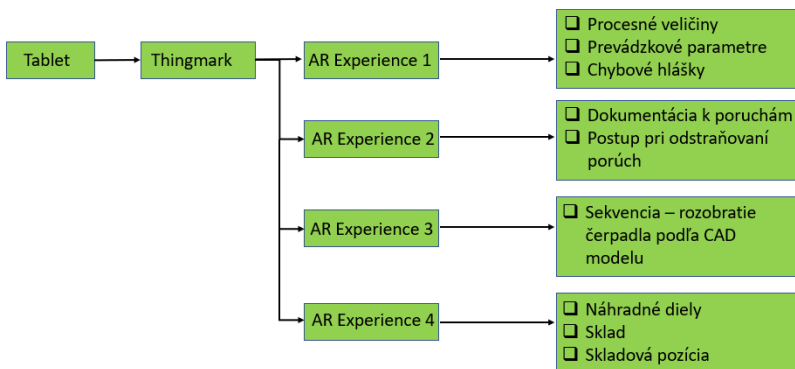
Vytvorenie digitálnej reprezentácie fyzického zariadenia v platforme Thingworx pre aplikáciu rozšírenej reality zahŕňa definovanie vlastností a chybových stavov zariadenia, pravidiel pre generovanie hlášok pomocou podmienených príkazov a generovanie autentifikačného kódu pre zabezpečenie prístupu k dátam.



## 3.2 Metodika vizualizácie dodatočných informácií

Pri návrhu metodiky vizualizácie prevádzkových parametrov pomocou aplikácie rozšírenej reality bolo potrebné sa pridržovať hlavného myšlienkového konceptu uvedenom na Obr. 1. Pre lepšiu prehľadnosť je uvedený sumár navrhnuitej metodiky v jednotlivých bodoch:

1. Užívateľ otvorí aplikáciu rozšírenej reality na mobilnom zariadení.
2. Užívateľ zosníma značku umiestnenú na zariadení.
3. Aplikácia analyzuje obraz z kamery a rozpozná značku Thingmark.
4. Pripojí sa na server Vuforia.
5. Aplikácia získa informácie o polohe a type zariadenia.
6. Aplikácia stiahne užívateľské rozhranie pre konkrétne zariadenie a zobrazí funkcionality na mobilnom zariadení.
7. Užívateľ interaguje so zariadením prostredníctvom rozhrania v aplikácii rozšírenej reality.
8. Užívateľ zvolí funkcionality monitoring, pracovné postupy, sekvencia alebo náhradné diely.
9. Užívateľ zvolí prevádzkový režim (Stand by, automatická prevádzka).
10. Nasmerovaním mobilného zariadenia na zariadenie so značkou Thingmark získa užívateľ doplnkový digitálny obsah (prevádzkové parametre).



Obr. 4: Diagram interakcie navrhnuitej aplikácie

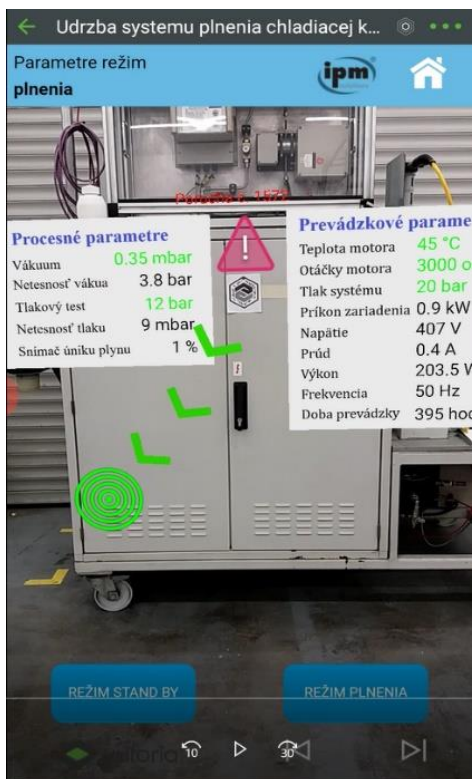
Samotná aplikácia rozšírenej reality je vytvorená vo vývojovom prostredí Vuforia Studio.

### 3.3 Realizácia a testovanie aplikácie rozšírenej reality

V tejto podkapitole je predstavený hlavný výsledok práce pre aplikačno-vedecký rozvoj odboru mechatronika.

Pre overenie navrhutej metodiky vizualizácie dodatočných informácií bolo potrebné navrhnuť a realizovať modulárnu aplikáciu rozšírenej reality, ktorá pozostáva z nasledovných funkcionalít:

- Monitoring, v rámci ktorej sú vizualizované kľúčové procesné a prevádzkové parametre systému plnenia.



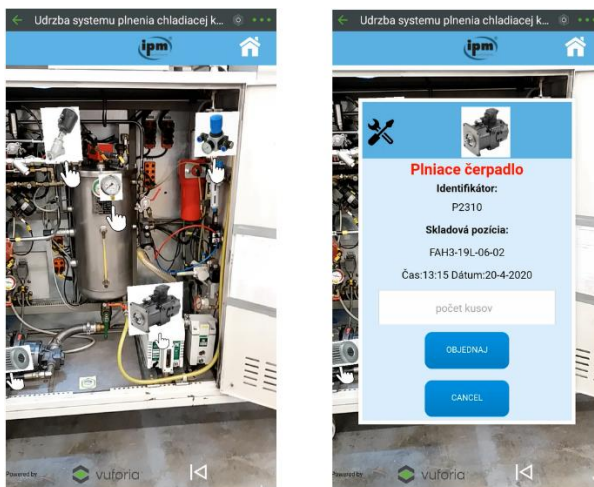
Obr. 5: Vizualizácia prevádzkových a procesných parametrov pomocou AR

- Návod. Táto funkcionálnosť obsahuje návody na odstránenie vzniknutých poruchových stavov.
- Sekvencia, ktorá interaktívnym spôsobom zobrazuje postup výmenu filtrov vo vákuovom čerpadle.



Obr. 6: Interaktívna vizualizácia pomocou aplikácie AR

- Náhradné diely, v rámci ktorej sú vizualizované dôležité náhradné diely zariadenia s informáciou, v ktorom sklade a na akej skladovej pozícii sa nachádzajú.



Obr. 7: Vizualizácia náhradných dielov pomocou aplikácie AR

### 3.4 Zefektívnenie procesu údržby použitím aplikácie AR

Zefektívnenie procesu údržby systému plnenia chladiacej kvapaliny pomocou aplikácie rozšírenej reality spočíva v doplnení požadovaných digitálnych informácií počas vykonávania údržby a to na správnom mieste a v správnom čase.

Aby bolo možné overiť a zefektívnenie procesu údržby, bol vykonaný test za účasti 10 pracovníkov pri vykonávaní údržby pri zachovaní rovnakých počiatočných podmienok.

Na základe výsledkov výkonového testu je možné vysloviť záver, že použitím aplikácie AR bola pri vykonávaní údržby dosiahnutá 20% časová úspora. Okrem skrátenia času potrebného na vykonanie nevyhnutnej údržby a opravy systému plnenia chladiacej kvapaliny, prináša použitie aplikácia rozšírenej reality aj nasledovné zefektívnenia procesu:

- Rýchlejšia vizuálna kontrola procesných a prevádzkových parametrov bez potreby hľadania v databáze.
- Zefektívnenie získavania inštrukcií, ktoré sa nachádzajú v digitálnej podobe priamo na zariadení.
- Zvýšenie interaktivity pracovných postupov využitím demontážnych a montážnych sekvencií.

## 4 Diskusia

Technológia rozšírenej reality zažíva v posledných rokoch prudký rozmach najmä v oblasti zábavy a reklamy. Postupným adaptovaním koncepcie Industry 4.0 v priemysle, ako aj stále intenzívnejším implementovaním princípov IoT a IIoT, je evidentný rastúci implementačný trend technológie rozšírenej reality aj v priemyselnom odvetví.

V súčasnosti existuje viacero pilotných projektov a prípadových štúdií, ktorých hlavnou úlohou je popularizácia danej technológie, avšak pre nasadenie v sériovom procese výroby sú vo väčšine prípadov nevhodné. Sú totiž založené na platformách a komponentoch, ktoré nie sú primárne určené a certifikované na použitie v priemyselných podmienkach. Nemenej dôležitým faktom je, že tieto aplikácie sú vytvárané vývojármi, ktorí vo väčšine prípadov nemajú znalosť priamo o výrobných procesoch, preto takto vytvorená aplikácia nespĺňa svoju primárnu funkciu – doplniť dodatočné digitálne informácie dôležité z hľadiska procesu (výroby, údržby, servisu a pod.) v užívateľsky prívetivom a intuitívnom prostredí.

Z týchto dôvodov má uvedená dizertačná práca ako jeden z hlavných cieľov navrhnuť metodiku komunikačnej architektúry výrobného zariadenia (systém plnenia chladiacej kvapaliny) s cloudom, implementovaním princípov priemyselného internetu vecí, ako aj vytvorenie aplikácie rozšírenej reality. Autorom dizertačnej práce navrhnutá a verifikovaná metodika bola použitá pri monitorovaní dôležitých parametrov z hľadiska výroby a údržby zariadenia, teda procesných a prevádzkových parametrov.

Autorom navrhnuté prístupy a riešenia prezentované v dizertačnej práci sú zovšeobecniteľné a je ich možné aplikovať nie len na ľubovoľné odvetvie priemyslu, v ktorom sú procesy riadené pomocou PLC, ale aj pre široké spektrum aplikácií (interaktívne zaškolenie, kontinuálne vzdelávanie, kontrola dodržiavania pracovných postupov a pod.).

Autorom predstavená metodika a programová realizácia mobilnej aplikácie pre vizualizáciu procesných a prevádzkových parametrov, pracovných návodov a montážnej sekvencie s využitím technológie rozšírenej reality prináša kvalitatívne zlepšenie z viacerých pohľadov.

Nie je tomu až tak dávno, keď mal pracovník údržby pridelené iba jedno zariadenie, ktoré nastavoval a vykonával údržbu len na základe skúsenosti a vlastných vnemov. Pri dnešnej tzv. štíhlej výrobe (lean) má pracovník údržby na starosti aj 10 technológií s rôznym stupňom automatizácie od viacerých dodávateľov.

Pri diagnostike a odstraňovaní porúch na výrobnom zariadení je možné vizualizovať dôležité dáta priamo na potrebnom mieste bez nutnosti ich manuálneho vyhľadávania v databázach riadiacich systémov, alebo vizualizovať predpokladaný poškodený komponent priamo na výrobnom zariadení bez nutnosti hľadania v konvenčnej papierovej dokumentácii.

V rámci narastajúcich požiadaviek na technické vedomosti a skúsenosti z praxe pristupuje v súčasnej situácii množstvo firiem rekvalifikácii novo nastúpených zamestnancov. Použitím technológie rozšírenej reality sa zaškolenie novo nastúpených pracovníkov stáva interaktívnejšie pomocou prekrytia skutočného výrobného zariadenia digitálnym modelom. Oproti konvenčnému zaškoleniu z technickej dokumentácie je hlavnou výhodou technológie rozšírenej reality možnosť zobrazenia výrobného zariadenia a jeho častí nie len v 2D, ale aj 3D a interaktivita s digitálnym modelom (vytvárania montážnych a demontážnych sekvencií a pod.). V prípade, že aj príde k poruchovému stavu výrobného zariadenia z dôvodu poškodenia komponentu, je dôležitým faktorom pri obnovení disponibility zariadenia čo najrýchlejšie vyhľadanie, doručenie a výmena náhradného dielu. Sklady vo výrobných podnikoch obsahujú tisícky rôznych komponentov, pod rôznym označením.

Aplikácia rozšírenej reality prezentovaná v rámci tejto dizertačnej práce obsahuje funkcionality, ktorá jednak napomáha s identifikovaním náhradného dielu priamo vo výrobnom zariadení, a obsahuje aj kľúčové informácie o aktuálnej skladovej pozícii.

# Záver

Predložená dizertačná práca sa zaoberá aktuálnou problematikou použitia technológie rozšírenej reality v priemyselnom prostredí pri údržbe systému plnenia chladiacej kvapaliny. Výsledkom práce je modulárna mobilná aplikácia rozšírenej reality pre údržbu. Riešenie je založené na monitorovaní a spracovávaní prevádzkových a procesných parametrov z riadiaceho systému PLC a následnej vizualizácii doplnkových digitálnych informácií pomocou mobilného zariadenia. Predložená dizertačná práca je zložená z deviatich kapitol.

Úvodné štyri kapitoly predstavujú teoretickú časť dizertačnej práce, v rámci ktorých sa kladie dôraz na správne vymedzenie pojmov. V prvej kapitole je priblížená koncepcia Industry 4.0, jej potenciálne prínosy, ale aj technológie, ktoré sú pre štvrtú priemyselnú revolúciu kľúčové. Dôraz sa kladie aj na transformáciu v rámci priemyselnej údržby. V úvodnej kapitole je priblížené aj mechatronické zariadenie – systém plnenia chladiacej kvapaliny automobilov, ako aj aktuálne zaužívaný spôsob vykonávania údržby na tomto zariadení. V rámci druhej kapitoly sú definované a vysvetlené pojmy virtuálnej a rozšírenej reality. Dôraz sa kladie na priblíženie aktuálnych technológií, komponentov a zobrazovacích systémov rozšírenej reality. Diskutované sú aj možnosti využitia rozšírenej reality v rámci údržby systému plnenia chladiacej kvapaliny. Nemenej dôležitá tretia kapitola približuje tematiku priemyselnej komunikácie, transformáciu automatizačnej pyramídy a aplikovanie princípov priemyselného internetu vecí pomocou IIoT brány (gateway). Nadväzujúca štvrtá kapitola približuje použité programové prostriedky, pomocou ktorých sú realizované navrhnuté čiastkové ciele dizertačnej práce.

V piatej kapitole je formulovaný problém riešený a sú definované konkrétne ciele v rámci dizertačnej práce. Koncept údržby systému plnenia pomocou rozšírenej reality je predstavený pomocou prehľadnej schémy.

Šiesta až deviata kapitola tvoria ťažisko dizertačnej práce, v rámci ktorých sú uvedené originálny prístup a pracovné postupy, ako aj dosiahnuté výsledky práce. V rámci šiestej kapitoly je prezentovaný autorom vytvorený návrh komunikácie medzi systémom plnenia chladiacej kvapaliny a aplikáciou rozšírenej reality, detailný opis procesu tvorby dátového toku, ako aj jednotlivé použité softvérové komponenty prezentovaného návrhu. Šiesta kapitola obsahuje opis vytvorenia komunikácie medzi systémom plnenia chladiacej kvapaliny a aplikáciou rozšírenej reality, v rámci ktorej bola realizovaná konfigurácia priemyselnej brány IoT 2040 a proces komunikácie s technologickou platformou Thingworx. Predstavená je digitálna reprezentácia systému plnenia chladiacej

kvapaliny. Siedma kapitola obsahuje návrh metodiky pre vizualizáciu prevádzkových parametrov, pracovných návodov, sekvencií a náhradných dielov. Programová realizácia prostredníctvom vývojového prostredia Vuforia Studio je taktiež súčasťou siedmej kapitoly. V rámci ôsmej kapitoly sú funkcie vytvorenej aplikácie rozšírenej reality pre údržbu systému plnenia chladiacej kvapaliny testované priamo pri vykonávaní údržby na danom zariadení. V deviatej kapitole je predstavený výsledok testu realizovaného počas údržby systému plnenia, aby bolo možné kvantifikovať zefektívnenie procesu. Na základe výsledkov testu možno vysloviť záver, že implementovaním technológie rozšírenej reality do procesov údržby je možné procesy údržby zefektívniť.

Výsledky dizertačnej práce prezentované v siedmej až deviatej kapitole predstavujú hlavný vedecký a aplikačný prínos k rozvoju študijného odboru mechatronika. Vedecké prínosy dizertačnej práce sú založené na návrhu, realizácii a verifikovaní komunikačnej architektúry medzi riadiacim systémom PLC výrobného zariadenia a aplikáciou rozšírenej reality. Autorom dizertačnej práce prezentované metódy a postupy využívajú princípy priemyselného internetu vecí IIoT a technológiu rozšírenej reality.

Významnou súčasťou výsledku dizertačnej práce je aj návrh a vývoj unikátnej mobilnej aplikácie rozšírenej reality pre potreby údržby systému plnenia chladiacej kvapaliny, ktorá vylepšuje a dopĺňa konvenčný spôsob údržby a monitorovania zariadenia. Táto aplikácia prináša originálny prístup k priemyselnej údržbe využívajúca technológiu rozšírenej reality na poskytnutie doplnkových digitálnych údajov. Modularitu a zovšeobecniteľnosť riešenia podporuje aj použitie priemyselne certifikovaných hardvérových a softvérových komponentov. Takéto komplexné riešenie je možno pokladať za aplikačno-vedecký prínos k rozvoju študijného odboru mechatronika.

Prínosy dizertačnej práce je možné zhrnúť do nasledovných bodov:

- Návrh metodiky komunikácie priemyselného zariadenia s využitím princípov priemyselného internetu vecí IIoT.
- Návrh metodiky pre vizualizáciu prevádzkových parametrov, pracovných postupov, pracovnej sekvencie a náhradných dielov s využitím technológie rozšírenej reality.
- Programová realizácia a implementácia navrhutej metodiky komunikácie výrobného zariadenia s cloudovou službou.
- Programová realizácia a implementácia navrhutej metodiky vizualizácie dodatočných informácií pomocou rozšírenej reality.



- Overenie funkčnosti navrhutej a vytvorenej aplikácie rozšírenej reality priamo pri údržbe systému plnenia chladiacej kvapaliny v priemyselnom prostredí.

Deklarované prínosy dizertačnej práce predstavujú vysoko aktuálne trendy v priemyselnej praxi. Výsledky dizertačnej práce sú zovšeobecniteľné a je možné ich ďalej modifikovať aj pre technickú prax aj pre iné odvetvia priemyslu, ako aj výskumné účely.

# Publikačná činnosť autora

**ADC** Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch registrovaných databázach Web of Science alebo SCOPUS

- **ADC01:** AMINBAGHAI, Mehdi – MURÍN, Justín - KUTIŠ, Vladimír - HRABOVSKÝ, Juraj – KOSTOLÁNI, Michal – MANG, Herbert A. Torsional warping elastostatic analysis of FGM beams with longitudinally varying material properties. In Engineering Structures 200:109694. 2019, s. 2019.

**AFC** Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- **AFC01:** KOSTOLANI, Michal – MURÍN, Justín – KOZÁK, Štefan. An effective industrial control approach. In FedCSIS: Proceedings of the 2019 federated conference on computer science and information systems. Leipzig, Germany. September 1-4, 2019. Piscataway : IEEE, 2019, s. 919--922. ISBN 978-83-955416-0-5.
- **AFC02:** KOSTOLANI, Michal – KOZÁK, Štefan. Predictive maintenance control in industrial automation. In ACCS'019 & PEIT'019: Proceedings of 6th International Conference on ADVANCED CONTROL CIRCUITS AND SYSTEMS. Hurghada, Egypt. November 17-20, 2020. IEEE#048329.
- **AFC03:** KOSTOLANI, Michal – MURÍN, Justín. Smart maintenance education using augmented reality. In Poster Session of the 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems MECHATRONICS 2019. Vienna, Austria. 4–6 September 2019.

**AFD** Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- **AFD01:** KOSTOLANI, Michal – MURÍN, Justín – KOZÁK, Štefan. Intelligent predictive maintenance control using augmented reality. In FIKAR, M. -- KVASNICA, M. Process Control 2019. Danvers: IEEE, 2019, s. 131--135. ISBN 978-1-7281-3758-2.
- **AFD02:** KOSTOLANI, Michal – MURÍN, Justín. Condition monitoring of electric monorail system in automotive industry. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'18. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, ISBN 978-80-227-4794-3.
- **AFD03:** KOSTOLANI, Michal – MURÍN, Justín. Intelligent industrial gateway for educational purposes. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'19. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2019, ISBN 978-80-227-4915-2.

## **Ostatné**

- Vedenie diplomových prác :

Bc. Krištof Cséfalvay – „Návrh mechatronického systému v prostredí priemyselného internetu vecí“

Bc. Gabriel Križan – „Návrh, simulácia a realizácia systému pre IIoT“

# Zoznam použitej literatúry

- [1] Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F a Frank, A. G. “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance”, *International Journal of Production Economics*, s. 383–394, okt. 2018.
- [2] Hozdić, E. “Smart factory for industry 4.0: A review”, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, roč. 7, s. 28–35, jan. 2015.
- [3] M. Kostoláni, J. Murín, a Š. Kozák, “Intelligent predictive maintenance control using augmented reality”, v 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19), 2019, s. 131–135, doi: 10.1109/PC.2019.8815042.
- [4] Fraga-Lamas, P. , Fernández-Caramés, T. M. , Blanco-Novoa, Ó. a Vilar-Montesinos, M. A. “A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard”, *IEEE Access*, roč. 6, s. 13358–13375, 2018.
- [5] “Learning Paths | PTC University”. [Online]. Dostupné na: <https://www.ptcu.com/course/course-view/st/83>. [Cit: 20-mar-2020].
- [6] Gattullo, M., Scurati, G. W., Fiorentino, M., Uva, A. E., Ferrise, F. a Bordegoni, M. “Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, roč. 56, s. 276–286, apr. 2019.
- [7] Jetter, J., Eimecke, J. a Rese, A. “Augmented reality tools for industrial applications: What are potential key performance indicators and who benefits?”, *Computers in Human Behavior*, roč. 87, s. 18–33, okt. 2018.
- [8] “SIMATIC IoT2040 - 6ES7647-0AA00-1YA2 - Industry Support Siemens”. [Online]. Dostupné na: <https://support.industry.siemens.com/cs/products/6es7647-0aa00-1ya2/simatic-iot2040?pid=815412&mlfb=6ES7647-0AA00-1YA2&mfn=ps&lc=en-WW>. [Cit: 20-mar-2020].
- [9] “PTC Help Center”. [Online]. Dostupné na: [http://support.ptc.com/help/thingworx\\_hc/thingworx\\_8\\_hc/en/index.html#page/ThingWorx%2FWelcome.html%23](http://support.ptc.com/help/thingworx_hc/thingworx_8_hc/en/index.html#page/ThingWorx%2FWelcome.html%23) [Cit: 23-mar-2020].
- [10] “User Guide : Node-RED”. [Online]. Dostupné na: <https://nodered.org/docs/user-guide/> [Cit: 23-mar-2020].
- [11] “Support | Vuforia Developer Portal”. [Online]. Dostupné na: <https://developer.vuforia.com/support> [Cit: 23-mar-2020].
- [12] “Vuforia Studio Help”. [Online]. Dostupné na: [http://support.ptc.com/help/vuforia/studio/en/index.html#page/Studio\\_Help\\_Center/RPAdvancedViewInView.html](http://support.ptc.com/help/vuforia/studio/en/index.html#page/Studio_Help_Center/RPAdvancedViewInView.html) [Cit: 23-mar-2020].