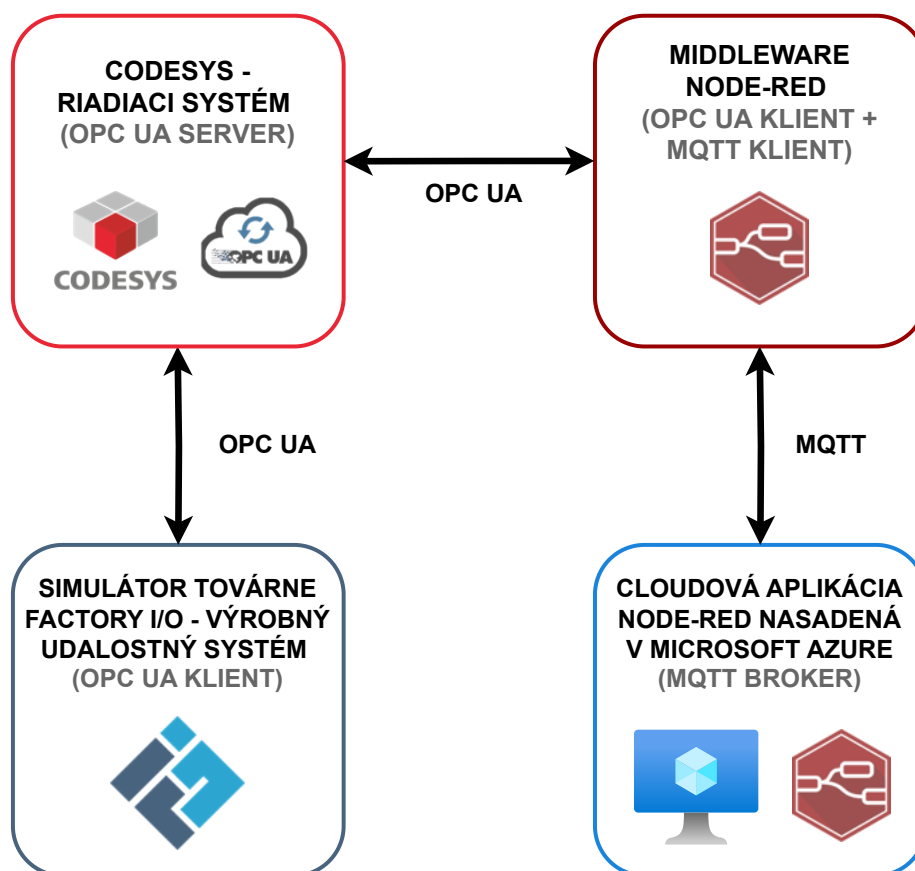


4.2 Druhá prípadová štúdia: Prepojenie PLC s cloudovou aplikáciou realizovanou pomocou Node-RED



Obrázok č. 85: Codesys v prepojení s OPC UA a MS Azure

V druhej edukačnej prípadovej štúdií (obrázok č. 85) sme sa rozhodli namiesto neplateného a open-source PLC editora využiť komplexné riešenie pre automatizáciu zvané Codesys. Toto riešenie zabezpečí spojenie s Factory I/O pomocou moderného komunikačného protokolu a štandardu OPC UA. OPC UA server bude bežať prostredníctvom runtime Codesys a Factory I/O bude figurovať ako OPC UA klient. Pre účely riadenia nie je teda potrebný prostredník vo forme Node-RED. Node-RED však budeme využívať pre odchyťavanie dát a ich zasielanie do cloudu a takisto bude využívaný pre zabezpečenie núdzového zastavenia a spustenia linky, ktoré môže užívateľ realizovať cez cloudovú aplikáciu. Cloudová aplikácia bude takisto realizovaná pomocou Node-RED, ktorý ponúka aj možnosti vizualizácie a realizácie používateľského rozhrania. Node-RED bude teda nasadený aj v cloudovom prostredí Microsoft Azure. Komunikáciu zabezpečí protokol MQTT. Codesys je možné voľne využívať pre akademické účely, obmedzením je však to, že runtime dokáže v voľnom režime bežať nepretržite len 2 hodiny, čiže vo výrobe je bezplatná verzia nepoužiteľná. Pre akademické použitie

však vo väčšina prípadov toto obmedzenie nie je problémom. Táto prípadová štúdia je opísaná s využitím diplomovej práce [66].

Špecifikácia a správanie diskretného udalostného systému je rovnaké ako v prvej prípadovej štúdií (kapitola 4.1.1 — obrázok č. 53).

4.2.1 Riadenie diskretného udalostného systému

Rovnako ako v prvej prípadovej štúdií aj tu je potrebné riadiť diskretný udalostný systém. V prvej prípadovej štúdií sa využíval open-source editor a runtime OpenPLC. Tento bol nahradený Codesysom, kde používame programovací jazyk Structured text (tzv. štruktúrovaný text) na deklaráciu premenných. Tento Structured text je porovnateľný s programovacím jazykom C alebo Pascal. Riadiaci program je písaný v rebríkovej schéme podobne ako v prvej edukačnej prípadovej štúdií.

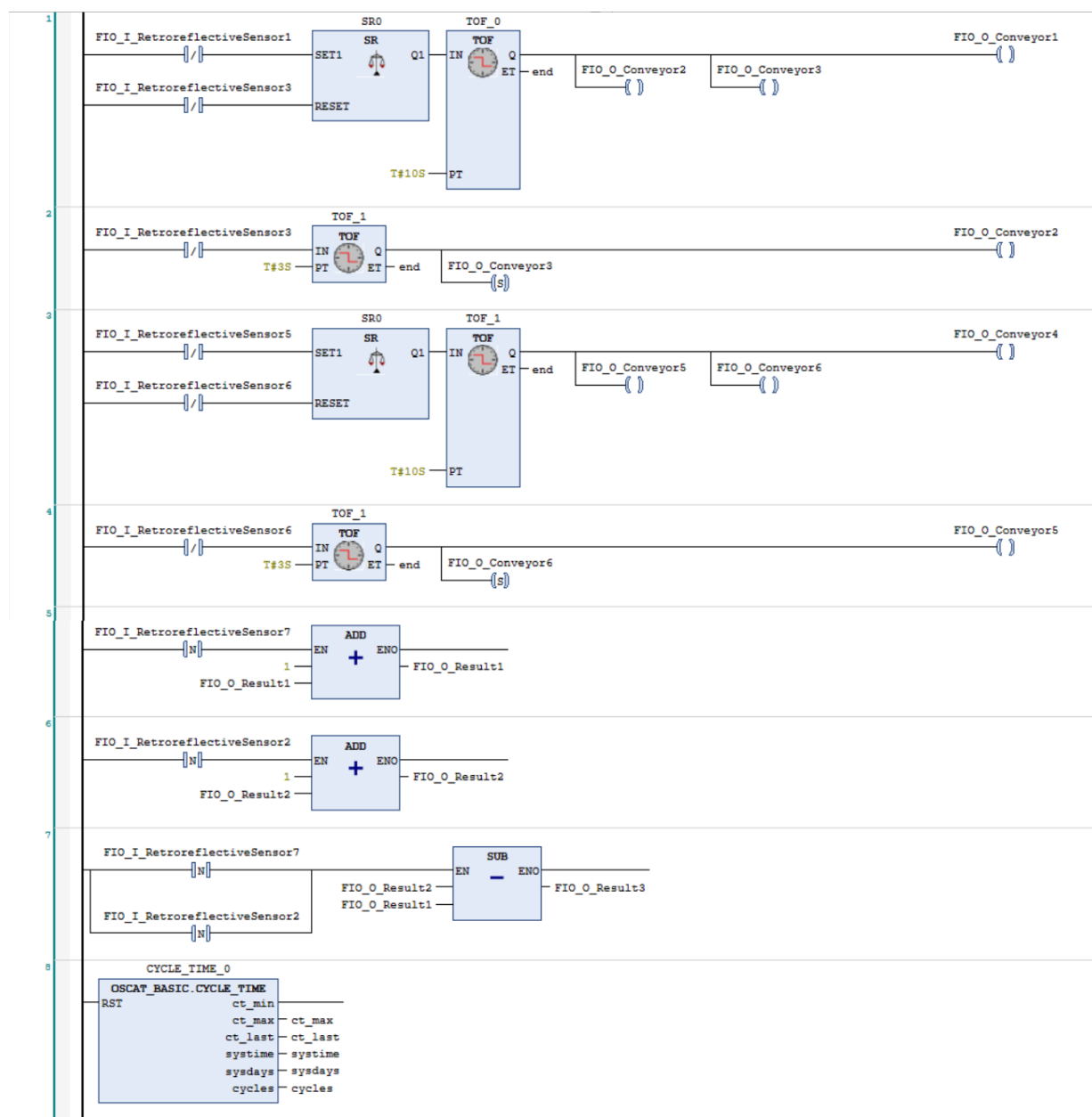
```
1 PROGRAM PLC_PRG
2 VAR
3 FIO_I_RetroreflectiveSensor1 : BOOL := TRUE;
4 FIO_I_RetroreflectiveSensor2 : BOOL := TRUE;
5 FIO_I_RetroreflectiveSensor3 : BOOL := TRUE;
6 FIO_I_RetroreflectiveSensor4 : BOOL := TRUE;
7 FIO_I_RetroreflectiveSensor5 : BOOL := TRUE;
8 FIO_I_RetroreflectiveSensor6 : BOOL := TRUE;
9 FIO_I_RetroreflectiveSensor7 : BOOL := TRUE;
10 FIO_O_Result1 : INT;
11 FIO_O_Result2 : INT;
12 FIO_O_Result3 : INT;
13 FIO_Factoryio_stop : BOOL;
14 FIO_Factoryio_start : BOOL := TRUE;
15 FIO_O_Conveyor1 : BOOL;
16 FIO_O_Conveyor2 : BOOL;
17 FIO_O_Conveyor3 : BOOL;
18 FIO_O_Conveyor4 : BOOL;
19 FIO_O_Conveyor5 : BOOL;
20 FIO_O_Conveyor6 : BOOL;
21 TOF_0: TOF;
22 end: TIME;
23 SR0: SR;
24 TOF_1: TOF;
25 CYCLE_TIME_0: OSCAT_BASIC.CYCLE_TIME;
26 ct_max: TIME;
27 ct_last: TIME;
28 systime: TIME;
29 sysdays: INT;
30 cycles: DWORD;
31 END_VAR
```

Obrázok č. 86: Codesys — deklarácia premenných [66]

V hlavnom okne Codesysu v hornej časti máme vstupné pole, kde sa deklarujú premenné v textovej forme. Hlavné premenné v riadiacom programe sú rovnaké ako v prvej prípadovej štúdií (obrázok č. 64) a tieto premenné sa rovnako správajú (kapitola 4.1.3).

Avšak boli pridané aj ďalšie premenné, ktoré súvisia s meraním času behu riadiaceho systému (obrázok č. 86).

V spodnej časti prostredia Codesys tvoríme rebríkový diagram. Diagram sa rovnako tvorí cez panel s nástrojmi. Pre zostavovanie programu boli použité rovnaké komponenty ako na obrázkoch č. 65 až 71. Program vyzerá ako na obrázku č. 87.



Obrázok č. 87: Codesys — rebríkový diagram [66]

Navyše oproti prvej edukačnej prípadovej štúdiu je prítomný blok CYCLE_TIME, ktorý je typu "Function module". Tento CYCLE_TIME bol vložený za pomoci externej knižnice OSCAT_BASIC verzie 3.3.4.0. Používa sa preto, aby sa mohlo merať, ako dlho riadiaci systém beží. Jeho parametrami sú:

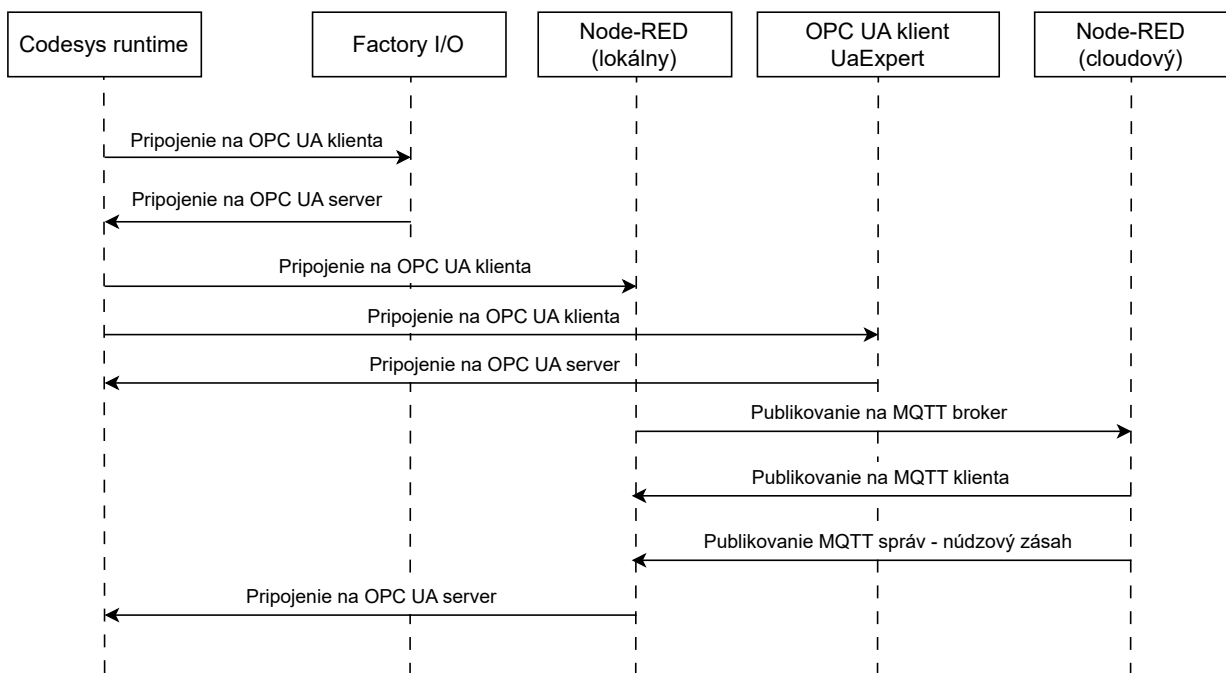
Vstup:

- booleovská premenná Reset.

Výstup:

- *ct_min* typu time — minimálny čas meraného cyklu;
- *ct_max* typu time — maximálny čas meraného cyklu;
- *ct_last* typu time — nedávno nameraný čas cyklu;
- *systime* typu time — trvanie od posledného spustenia;
- *sysdays* typu int — počet dní od posledného začiatku;
- *cycles* typu dword — počet cyklov od posledného spustenia.

4.2.2 Komunikácia jednotlivých subsystémov



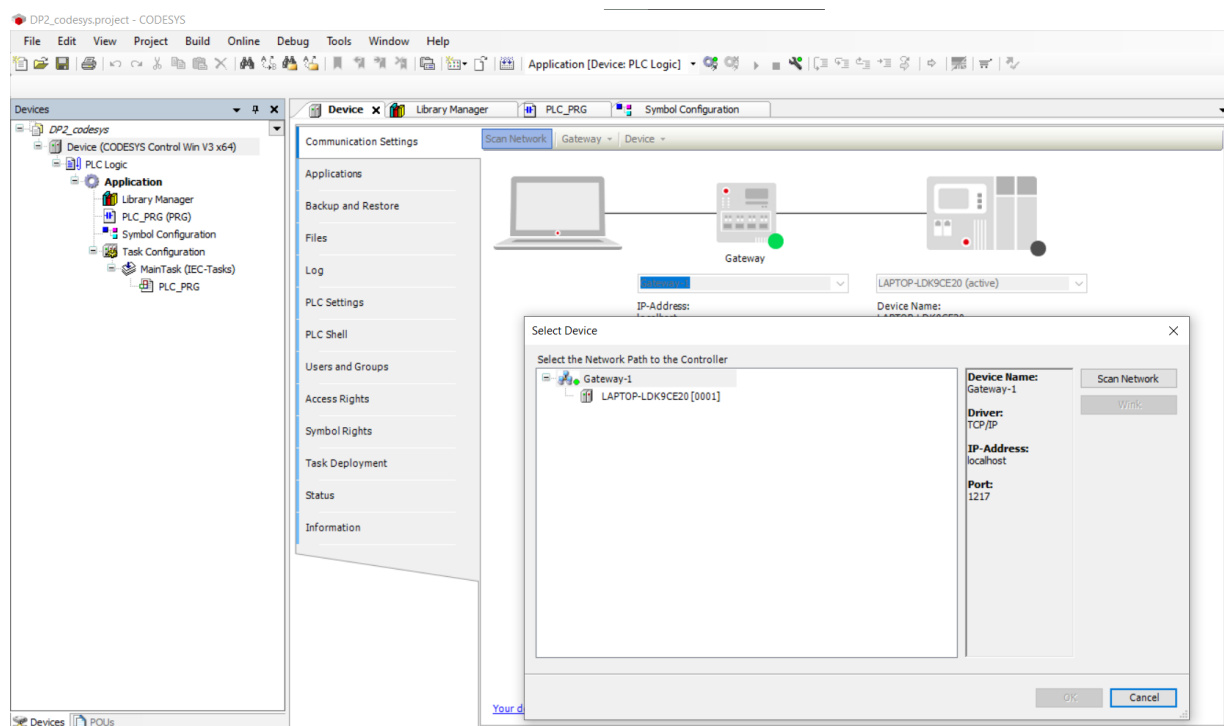
Obrázok č. 88: Sekvenčný diagram pre edukatívnu prípadovú štúdiu č. 2 [66]

Najdôležitejší prvok komunikácie je v tomto prípade komunikácia medzi Codesys a Factory I/O, keďže zabezpečuje riadiaci proces. Komunikáciu zabezpečuje moderný protokol OPC UA. Codesys sa teraz bude správať ako OPC UA server a Factory I/O ako OPC UA klient. Vďaka existencii OPC UA servera si je možné premenné prezeráť v ľubovoľnom OPC UA klientovi, napríklad v UaExperte. Node-RED budeme opäť

v tomto prípade využívať na zdieľanie dát do cloudovej aplikácie, ale na samostatné riadenie nie je potrebný. S cloudovou aplikáciou budeme komunikovať cez protokol MQTT.

4.2.3 OPC UA server v Codesys runtime

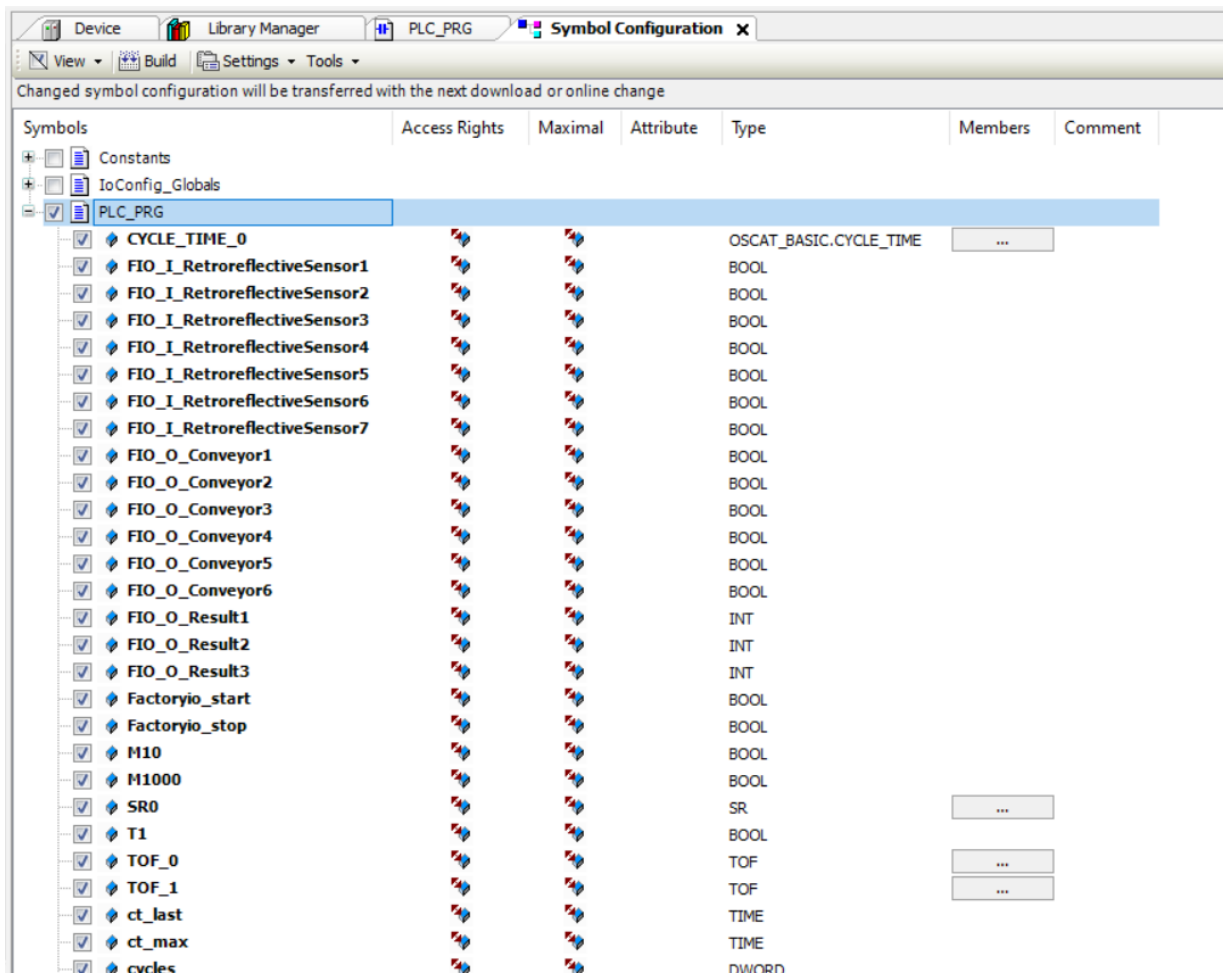
S Codesysom sa pracuje pomerne jednoducho. Je potrebné si uvedomiť, že je žiaduce premenné pomenovať tak, aby ich Factory I/O ľahko identifikoval a vyfiltroval tie, ktoré potrebuje. Celý OPC UA adresný priestor totiž obsahuje aj veľké množstvo rôznych konfiguračných a stavových premenných, ktoré prichádzajú s využitím Codesys runtime. Preto všetky užitočné premenné majú prefix (predponu) *FIO*. Toto sa realizuje preto, aby sme vedeli rozoznať naše (užitočné) premenné a boli ľahšie čitateľné. A tiež preto, aby sme ich vedeli ľahko získať vo Factory I/O. V konfigurácii symbolov (angl. Symbol configuration) Codesys projektu tieto premenné vyberieme, čím vlastne zadáme, že budú ponúkané OPC UA serverom. Následne inicializujeme Codesys Control Win PLC, čo je softPLC bežiacie pod Windowsom. Následne v Codesys projekte sa na tento runtime pripojíme a uploadneme (nahráme) doňho program. Pripojenie prebieha cez naskenovanie siete a výber riadiacej jednotky, čo môže byť spomínané softPLC alebo aj bežná hardvérová PLC jednotka (obrázok č. 89).



Obrázok č. 89: Skenovanie siete [66]

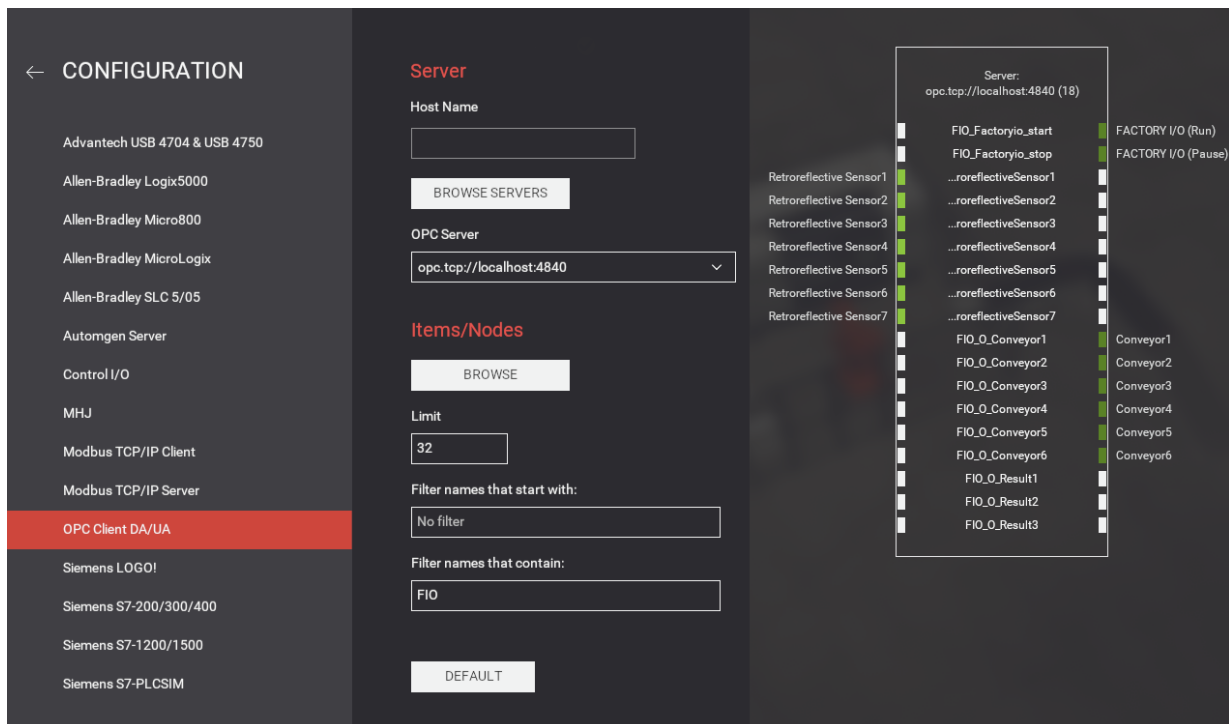
V konfigurácii symbolov môžeme kliknutím vybrať celý náš program PLC_PRG, čím sa označia všetky premenné (obrázok č. 90). Takto sú rovno v OPC UA serveri

dostupné všetky premenné, ktoré využívame. Následne vykonáme build programu a spustíme ho.



Obrázok č. 90: Konfigurácia premenných určených pre OPC UA server [66]

Vo Factory I/O otvoríme našu scénu (obrázok č. 54) a v konfigurácii nastavíme driver OPC Client DA/UA. Zadáme adresu `opc.tcp://localhost:4840` ako server a ako filter premenných si nastavíme "FIO", čím získame užitočné premenné z adresného priestoru OPC UA, ako bolo spomínané. Priradíme všetky premenné a komunikáciu medzi Factory I/O a Codesys máme zrealizovanú (obrázok č. 91).



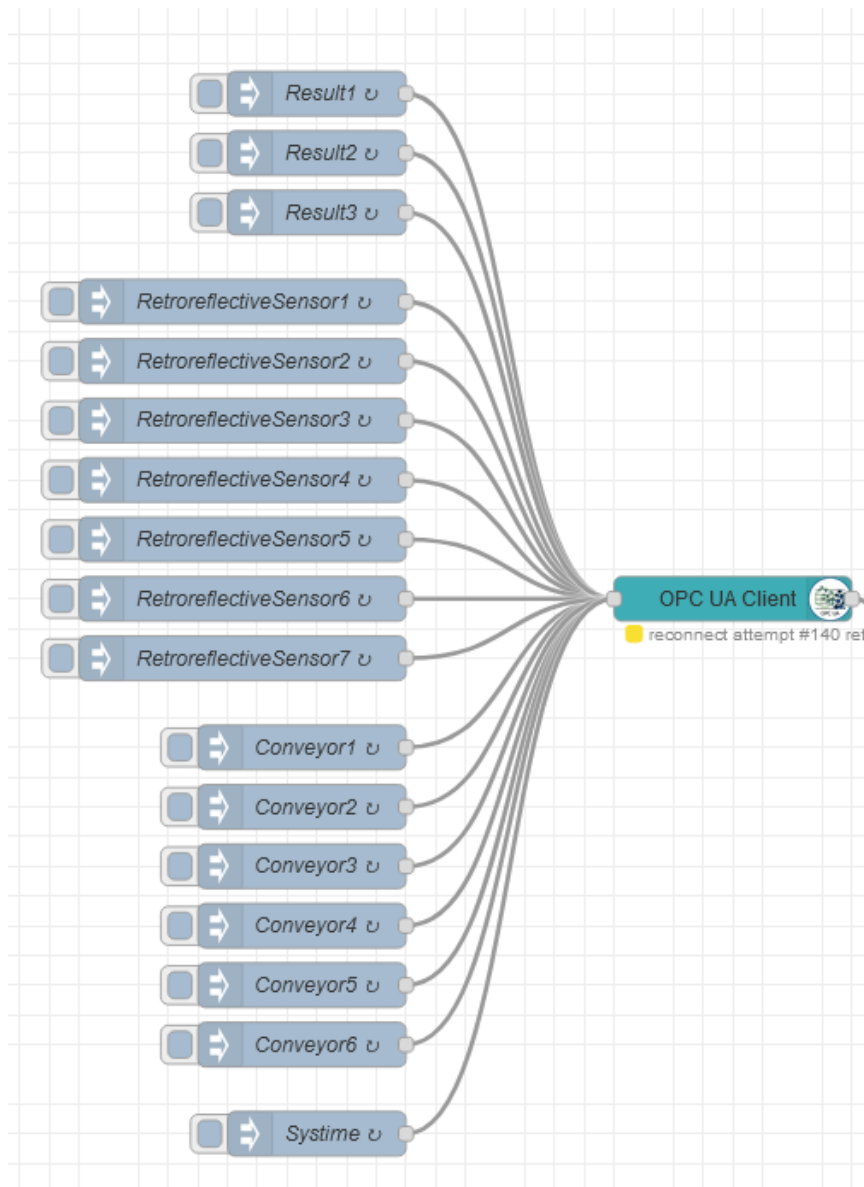
Obrázok č. 91: OPC UA Client Factory I/O [66]

4.2.4 Prepojenie runtime Codesys s lokálnym Node-REDom

Po vytvorení a rozbehnutí OPC UA servera pomocou Codesys chceme dáta pomocou protokolu OPC UA dostať do prostredníka Node-RED, ktorý beží na localhoste podobne ako OPC UA server. Túto funkcionality bude poskytovať uzol OPC UA Client, kde ako server bude nastavená rovnaká adresa ako v predošlej kapitole

(opc.tcp://localhost:4840). Takto Node-RED figuruje ako OPC UA klient. Sú prijímané všetky premenné, s ktorými chceme pracovať (obrázok č. 92). Naľavo v tomto obrázku je možné vidieť uzly typu *Inject*, ktoré sa každú sekundu dopytujú na jednotlivé premenné, pričom názov premennej je definovaný v *msg.topic* danej správy. Názov premennej je v Codesys OPC UA adresnom priestore pomerne komplexný. Názvy a aj samotné dáta si je možné prehľadne prezrieť napríklad v OPC UA klientovi UAExpert. Tam sa je možné dočítať, že ID jednej z premenných je:

ns=4;s=|var|CODESYS Control Win V3 x64.Application.PLC_PRG.FIO_I_RetroreflectiveSensor1
a na základe tohto ID sa je možné v Node-REDe na premennú dopytovať.



Obrázok č. 92: Lokálny Node-RED — OPC UA klient [66]

Je potrebné si objasniť dôvod behu Node-RED na localhoste. Podobne ako v predošlej prípadovej štúdií je cieľom využívať cloud pre monitorovanie diskrétného udalostného systému a núdzový zásah do neho. Nakoľko OPC UA server beží lokálne a nemáme verejnú (statickú) IP adresu, tak pre odoslanie údajov do cloudového prostredia a prijímanie údajov z cloudového prostredia je využitý lokálny Node-RED.

Do cloudovej aplikácie budeme naše užitočné premenné posilať pomocou protokolu MQTT. Postup je taký, že použijeme uzol *MQTT-in* (funguje ako subscriber) a *MQTT-out* (funguje ako publisher). Tieto uzly sa budú pripájať na broker (server), ktorý je realizovaný v cloudovom prostredí. Konkrétne ide o Aedes MQTT broker. Naše užitočné premenné budeme v lokálnom Node-RED čítať za pomoci OPC UA klienta, z ktorého sú pomocou vlastných funkcií *Filter* vyberané jednotlivé údaje (premenné) a

posielame ich pomocou MQTT do cloudovej aplikácie. Pri posielaní údajov cez MQTT je nutné im nastaviť príslušný *MQTT topic*. Tento vyzerá napríklad takto:
inputs/FIO_I_RetroreflectiveSensor1.

4.2.5 Node-RED dashboard v cloude Microsoft Azure

V prvej prípadovej štúdií bol dashboard (grafické rozhranie) pre monitorovanie a núdzový zásah do systému realizovaný pomocou aPaaS služby Azure IoT Central. V druhej prípadovej štúdií bol zvolený iný prístup. Aj Node-RED poskytuje možnosť realizácie grafického rozhrania, preto sa ako vhodná možnosť ukázala nasadiť Node-RED aj do cloudu a pomocou neho vytvoriť grafické rozhranie .

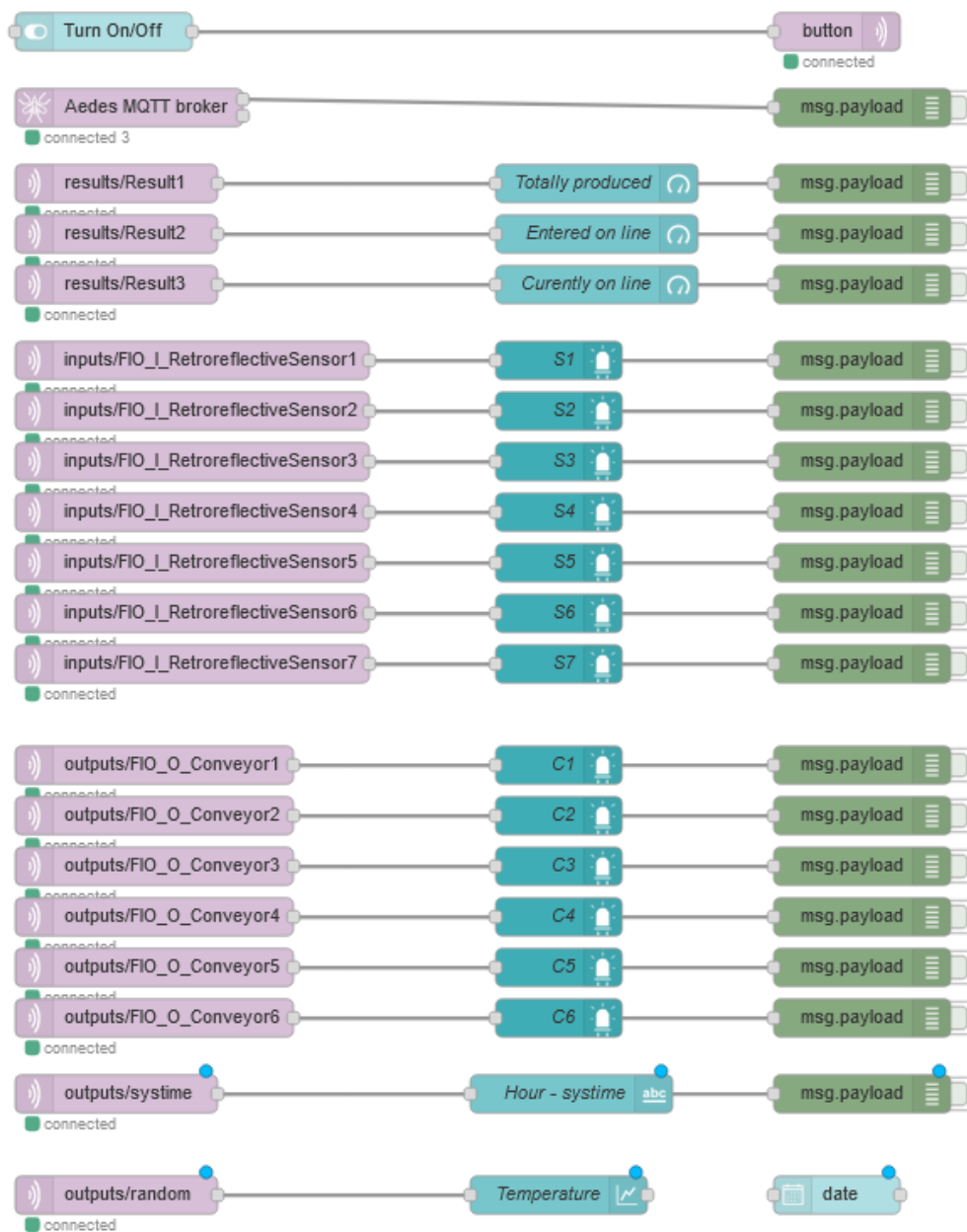
Nasadenie Node-RED do cloudového prostredia je pomerne jednoduché, nakoľko ide vlastne o aplikáciu bežiacu na runtime Node.JS. Využitý bol teda virtuálny stroj, konkrétne IaaS službu Azure Virtual Machine. Azure Virtual Machine je jedným z niekoľkých typov škálovateľných výpočtových zdrojov, ktoré Azure ponúka. Predtým ako ho vytvoríme, je potrebné definovať niekoľko záležitostí. Ide napríklad o názov aplikácie, miesto, kde budú zdroje uložené, veľkosť virtuálneho stroja, operačnej pamäte, maximálny počet virtuálnych počítačov, operačný systém, konfiguráciu a súvisiace zdroje. Ďalej poskytuje flexibilitu virtualizácie bez toho, aby sme boli nútení kupovať a udržiavať fyzický hardvér, na ktorom je spustený.

Vybraný bol virtuálny stroj triedy *Standard_B1s*. Poskytuje 1 GB operačnej pamäte. Využili sme operačný systém na báze Linuxu — Ubuntu Server 20.04 (Focal). Inštalácia Node-RED prebehla bez akýchkoľvek problémov.

Dáta teda posielame z lokálneho Node-REDu do Node-REDu v cloudovom prostredí pomocou komunikačného protokolu MQTT. V cloudovom Node-REDe dáta čítame, čiže prijímame pomocou protokolu MQTT, a následne ich zobrazujeme v grafickom rozhraní. Na zobrazenie dát v grafickom rozhraní využívame knižnicu *node-red-dashboard 3.1.6* a *node-red-contrib-ui-led 0.4.11*, nakoľko uzly, ktoré nám to umožňujú, nie sú súčasťou základnej inštalácie Node-REDu a je potrebné ich nainštalovať samostatne. Tabuľka č. 2 bližšie opisuje obrázok č. 93, kde za pomoci týchto uzlov je možné zobrazovať dáta v grafickom rozhraní.

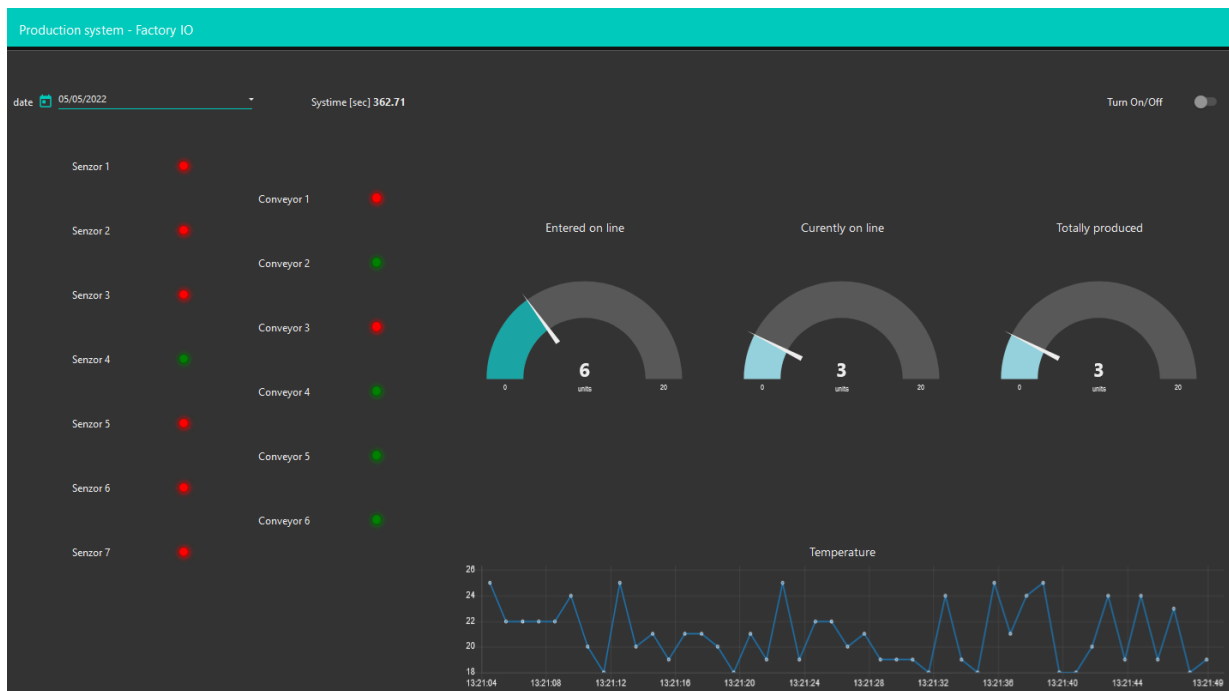
Tabuľka č. 2: Premenné v lokálnom Node-REDe [66]

Názov uzla	Nami pomenovaný uzol
led	S1-S7 , C1-C6
gauge	Totally produced, Entered on line, Curently on line
text	Systime
chart	Temperature
button	Turn On/Off
date picker	date



Obrázok č. 93: Node-RED v cloudde [66]

Naše výsledné grafické rozhranie (dashboard) je vidieť na obrázku č. 94). Je dôležité uviesť, že premenné je možné nielen monitorovať, ale opäť je možné aj núdzovo zasahovať do výrobného procesu.



Obrázok č. 94: Dashboard v Node-RED [66]

Videá k tejto edukačnej prípadovej štúdií je možné nájsť na tejto adrese:

- <http://bit.ly/30hmDyU>

Ďalšie informácie, návody a programové projekty je možné nájsť na e-learningovej webovej stránke <https://elearning.mechatronika.cool/?p=8344>.

Zoznam použitej literatúry

- [1] ASAD, U., KHAN, M., KHALID, A., A LUGHMANI, W. A. Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. *Sensors* 23, 8 (2023).
- [2] ASHTON, K., ET AL. That 'Internet of Things' thing. *RFID journal* 22, 7 (2009), 97–114.
- [3] BENEŠOVÁ, A., A TUPA, J. Requirements for education and qualification of people in industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 11 (2017), 2195 – 2202. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.366>.
- [4] BEŇO, L. *Moderné metódy ovládania mechatronických zariadení s využitím hlasových povelov založené na technológii Edge computingy*. Dizertačná práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2022. 106 s.
- [5] BEŇO, L., PRIBIŠ, R., A DRAHOŠ, P. Edge Container for Speech Recognition. *Electronics* 10, 19 (2021). DOI: 10.3390/electronics10192420.
- [6] BOURKE, K. *What is CODESYS and Why is it Important?* Real Pars. [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/instruction-lists-ils-plc-programming/>.
- [7] BRECKO, A., KAJÁTI, E., A PAPCUN, P. Industry 5.0 – technológie: bio-inšpirované technológie a inteligentné materiály. *ATP Journal* 02/2022 (2022).
- [8] BRECKO, A., KAJÁTI, E., A ZOLOTOVÁ, I. Industry 5.0 – technológie: interakcie medzi človekom a strojom. *ATP Journal* 01/2022 (2022), 40–41.
- [9] BRIŠ, L. *Využitie formalizmov Petriho sietí v riadení laboratórnych systémov*. Diplomová práca (Vedúci práce: Alena Kozáková; Konzultant: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2016. 58 s.
- [10] BUCSAI, S. *Ovládanie a monitorovanie IoT zariadení s využitím zmiešanej reality*. Diplomová práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2019.
- [11] BUCSAI, S., KUČERA, E., HAFFNER, O., A DRAHOŠ, P. Control and Monitoring of IoT Devices Using Mixed Reality Developed by Unity Engine. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I)* (2020), pp. 1–8.

- [12] BURGER, A., KOZIOLEK, H., RÜCKERT, J., PLATENIUS-MOHR, M., A STOMBERG, G. Bottleneck Identification and Performance Modeling of OPC UA Communication Models. In *Proceedings of the 2019 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering* (Apr. 2019), ICPE '19, ACM. DOI: 10.1145/3297663.3309670.
- [13] CARTWRIGHT, A. *OPC-UA: the Flow of Data*. [online]. [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://medium.com/ai-build-techblog/opc-ua-the-flow-of-data-7c3e5c870a4c>.
- [14] CAVALIERI, S., SALAFIA, M. G., A SCROPPO, M. S. Integrating OPC UA with web technologies to enhance interoperability. *Computer Standards & Interfaces* 61 (Jan. 2019), 45–64. DOI: 10.1016/j.csi.2018.04.004.
- [15] CHAUDHRY, T., JUNEJA, A., A RASTOGI, S. AR Foundation for Augmented Reality in Unity. *International Journal of Advances in Engineering and Management* 3, 1 (2021), 1–7.
- [16] CIOLACU, M. I., SVASTA, P., BERG, W., A POPP, H. Education 4.0 for Tall Thin Engineer in a Data Driven Society. *2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* (2017), 432–437.
- [17] COITO, T., MARTINS, M. S., VIEGAS, J. L., FIRME, B., FIGUEIREDO, J., VIEIRA, S. M., A SOUSA, J. M. A Middleware Platform for Intelligent Automation: An Industrial Prototype Implementation. *Computers in Industry* 123 (Dec. 2020), 103329. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103329.
- [18] CROATTI, A., A RICCI, A. Towards the Web of Augmented Things. In *Software Architecture Workshops (ICSAW), 2017 IEEE International Conference on* (2017), IEEE, pp. 80–87.
- [19] DEAN, JAMES. *First-of-its-kind 3D-printed home blends concrete, wood*. [online]. [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://news.cornell.edu/stories/2022/09/first-its-kind-3d-printed-home-blends-concrete-wood>.
- [20] DRATH, R., MOSCH, C., HOPPE, S., FAATH, A., BARNSTEDT, E., FIEBIGER, B., A SCHLÖGL, W. Diskussionspapier–interoperabilität mit der verwaltungsschale, opc ua und automationml. *Technical Report. AutomationML eV and Industrial Digital Twin Association (IDTA) and OPC Foundation and VDMA* (2023).
- [21] DVOŘÁK, J. *Integrace měřičů spotřeby energií do SCADA systému, zpracování a vyhodnocení dat*. Diplomová práce (Vedúci práce: Jan Holub). Praha: ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2017. 68 s.

- [22] EUROPEAN COMMISSION - DIRECTORATE GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION. *Industry 5.0: towards a sustainable, human centric and resilient European industry*. Publications Office, 2021. DOI: 10.2777/308407.
- [23] FISCHERTECHNIK. *Indexed Line with two Machining Stations 24V - Simulation*. [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.fischertechnik.de/en/products/simulating/training-models/96790-sim-indexed-line-with-two-machining-stations-24v-simulation>.
- [24] FISCHERTECHNIK. *Punching Machine with Conveyor Belt 24v*. [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.fischertechnik.biz/punching-machine-with-conveyor-belt-24v>.
- [25] FORTUNATO, D., A BERNARDINO, J. Progressive Web Apps: An Alternative to the Native Mobile Apps. In *2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) (2018)*, IEEE, pp. 1–6.
- [26] GALLASCH, A. ThingWorx–Plattform zur Integration herausfordernder Anforderungen auf dem Shopfloor. *Produktions-und Verfügbarkeits-optimierung mit Smart Data Ansätzen (2018)*, 83–92.
- [27] GREŇČÍKOVÁ, A., KORDOŠ, M., A NAVICKAS, V. The Impact of Industry 4.0 on Education Contents. *Business: Theory and Practice* 22, 1 (Jan. 2021), 29–38. DOI: 10.3846/btp.2021.13166.
- [28] GUINARD, D., TRIFA, V., PHAM, T., A LIECHTI, O. Towards Physical Mashups in the Web of Things. In *Networked Sensing Systems (INSS), 2009 Sixth International Conference on (2009)*, IEEE, pp. 1–4.
- [29] HABIB, K., SAAD, M. H. M., HUSSAIN, A., SARKER, M. R., A ALAGHBARI, K. A. An Aggregated Data Integration Approach to the Web and Cloud Platforms through a Modular REST-Based OPC UA Middleware. *Sensors* 22, 5 (2022). DOI: 10.3390/s22051952.
- [30] HAFNER, O., A KUČERA, E. Multiplatform Mobile Application for Identification and Localization of Objects in Space. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) (2020)*, pp. 1–9. DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039849.
- [31] HALLIWELL, R. *Programmable Logic Controllers*. op-tec. [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://op-tec.co.uk/knowledge/using-programmable-logic-controllers/>.

- [32] HRÚZ, B., A MRAFKO, L. *Modelovanie a riadenie diskretných udalostných systémov: s využitím Petriho sietí a iných nástrojov*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2003. ISBN: 80-227-1883-1.
- [33] HUBA, M., A KOZÁK, Š. From e-Learning to Industry 4.0. In *2016 International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)* (Nov 2016), pp. 103–108. DOI: DOI: 10.1109/ICETA.2016.7802083.
- [34] IMTIAZ, J., A JASPERNEITE, J. Scalability of OPC-UA down to the chip level enables “Internet of Things”. In *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (July 2013), IEEE. DOI: 10.1109/indin.2013.6622935.
- [35] KAJÁTI, E., A ZOLOTOVÁ, I. Industry 5.0 – revolúcia alebo evolúcia? *ATP Journal* 12/2021 (2021), 36–37.
- [36] KOLEKTÍV ADVANTECH. *Quick Guide to OPC UA and Advantech IT/OT Convergent Solutions*. [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://page.advantech.com/en/global/industrial-automation/industrial-io/opc-ua>.
- [37] KOLEKTÍV AUTOMATIZÁCIA 365. *Ktoré PLC programovacie jazyky najviac používame?* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.automatizacia365.sk/2021/04/13/ktore-plc-programovacie-jazyky-najcastejsie-pouzivame>.
- [38] KOLEKTÍV AUTOROV WWW.OPTO22.COM. *Ako preklenúť medzeru medzi IT a OT*. *ATP Journal* 1/2017 (2017), 32–33.
- [39] KOLEKTÍV FIRMATA. *Firmata firmware for Arduino*. *GitHub*. 2016. [online]. [cit. 2020-08-20]. Dostupné z: <https://github.com/firmata/arduino>.
- [40] KOLEKTÍV HIVEMQ. *MQTT Essentials*. [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/tags/mqtt-essentials/>.
- [41] KOLEKTÍV NODE-RED. *About Node-RED*. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://nodered.org/about/>.
- [42] KOLEKTÍV NODE-RED. *Node-RED User Guide*. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://nodered.org/docs/user-guide/>.
- [43] KOLEKTÍV OPENPLC PROJECT. *Modbus Address Mapping*. [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://www.openplcproject.com/reference/modbus/>.
- [44] KOLEKTÍV PRODUKTION 2030. *Ingenjör4.0*. [online]. [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://produktion2030.se/en/ingenjor-4-0>.

- [45] KOLEKTÍV RANDED.COM. *Information Technologies (IT) Vs Operational Technologies (OT)*. *Webranded*. [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://randed.com/information-technologies-it-vs-operational-technologies-ot/?lang=en>.
- [46] KOLEKTÍV REALITY REFLECTION. *Virtual, Augmented, Mixed-Reality; What is these all about?*. *Medium.com*. [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://medium.com/@realityreflection/vr-virtual-augmented-mixed-reality-what-is-these-all-about-25762bfda62a>.
- [47] KOLEKTÍV THE FOUNDRY. *VR? AR? MR? Sorry, I'm confused*. *The Foundry*. [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.foundry.com/insights/vr-ar-mr/vr-mr-ar-confused>.
- [48] KOLEKTÍV ÚRADU PODPREDSEDU VLÁDY SLOVENSKEJ REPUBLIKY PRE INVESTÍCIE A INFORMATIZÁCIU. *Cloud computing*. *Informatizácia - Úrad podpredsedu vlády Slovenskej republiky pre investície a informatizáciu*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.informatizacia.sk/cloud-computing/22841s>.
- [49] KOSTOLÁNI, M., MURÍN, J., A KOZÁK, Š. Intelligent Predictive Maintenance Control Using Augmented Reality. In *2019 22nd International Conference on Process Control (PC19) (2019)*, pp. 131–135. DOI: 10.1109/PC.2019.8815042.
- [50] KOZÁK, Š., A HYPÍUSOVÁ, M. *Moderné metódy a algoritmy riadenia*. Bratislava: Slovenská chemická knižnica, 2016. ISBN: 978-80-89597-44-4.
- [51] KOZÁK, Š., RUŽICKÝ, E., ŠTEFANOVIČ, J., A SCHINDLER, F. Research and Education for Industry 4.0: Present Development. In *2018 Cybernetics & Informatics (K&I) (Feb 2018)*, pp. 1–7.
- [52] KUČERA, E., HAFFNER, O., DRAHOŠ, P., CIGÁNEK, J., LESKOVSKÝ, R., A ŠTEFANOVIČ, J. New Software Tool for Modeling and Control of Discrete-Event and Hybrid Systems Using Timed Interpreted Petri Nets. *Applied Sciences* 10, 15 (2020), 5027. DOI: 10.3390/app10155027.
- [53] KUNBUS GMBH. *Open Source IPC based on Raspberry Pi*. *Revolution Pi*. [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://revolution.kunbus.com/>.
- [54] KUČERA, E. *Využitie Petriho sietí na modelovanie a riadenie skladových systémov*. Diplomová práca (*Vedúci práce: Leo Mraško; Konzultant: Branislav Hrúz*). Bratislava: FEI STU, 2013. 81 s.

- [55] KUČERA, E. *Modelovanie a riadenie hybridných systémov s využitím Petriho sietí vyšších úrovní*. Dizertačná práca (Vedúci práce: Štefan Kozák). Bratislava: FEI STU, 2016. 121 s.
- [56] KUČERA, E. *Digitálne technológie a systémy pre Industry 4.0*. Habilitačná práca. Bratislava: FEI STU, 2020. 224 s.
- [57] KUČERA, E. *Internet of Things - slajdy z prednášok Virtuálna a zmiešaná realita pre Industry 4.0*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://vzri.mechatronika.cool/sites/default/files/Prednaska%2010%20IoT.pdf>.
- [58] KUČERA, E. *Prehľad cloudových služieb Microsoft Azure - slajdy z prednášok Virtuálna a zmiešaná realita pre Industry 4.0*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://vzri.mechatronika.cool/sites/default/files/Prednaska%208%20Azure.pdf>.
- [59] KUČERA, E. *Virtuálna, rozšírená a zmiešaná realita - slajdy z prednášok Virtuálna a zmiešaná realita pre Industry 4.0*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://vzri.mechatronika.cool/sites/default/files/Prednaska%207%20VR.pdf>.
- [60] KUČERA, E., HAFFNER, O., DRAHOŠ, P., A KOZÁKOVÁ, A. Modeling and Control of Discrete Event and Hybrid Systems Using Petri Nets and OPC Unified Architecture. *IEEE Access* 10 (2022), 120735–120751. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3222828.
- [61] KUČERA, E., HAFFNER, O., DRAHOŠ, P., LESKOVSKÝ, R., A CIGÁNEK, J. PetriNet Editor + PetriNet Engine: New Software Tool For Modelling and Control of Discrete Event Systems Using Petri Nets and Code Generation. *Applied Sciences* 10, 21 (2020). DOI: 10.3390/app10217662.
- [62] KÉPEŠIOVÁ, Z. *Monitorovanie a riadenie mechatronických systémov s využitím digitálneho dvojčata a zmiešanej reality*. Písomná práca k dizertačnej skúške (Vedúci práce: Danica Rosinová; Konzultant: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2019.
- [63] LESKOVSKÝ, R. *Moderné metódy ovládania a diagnostiky mechatronických zariadení s využitím IoT a zmiešanej reality*. Písomná práca k dizertačnej skúške (Vedúci práce: Danica Rosinová; Konzultant: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2020.
- [64] LEWICKI, P. *Controlling lights with the Hololens and Internet of Things*. htmlfusion.com/jgfbso2. [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/jgfbso2>.
- [65] LIANG, Q., A LI, L. The Study of Soft PLC Running System. *Procedia Engineering* 15 (2011), 1234–1238. CEIS 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.228>.

- [66] LOPATNIKOVÁ, S. *Modelovanie a riadenie udalostného systému s využitím PLC a cloudového riešenia*. Diplomová práca (Vedúci práce: Oto Haffner; Konzultant: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2022. 81 s.
- [67] MAHNKE, W., LEITNER, S.-H., A DAMM, M. *OPC Unified Architecture*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [68] MARTON, M. *Riadenie udalostných systémov s využitím Petriho sietí a OPC UA*. Diplomová práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2022. 44 s.
- [69] MIKSAD, M. *Prepojenie open-source PLC s počítačom generovanou realitou*. Diplomová práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2023.
- [70] MILGRAM, P., A KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77, 12 (1994), 1321–1329.
- [71] OPENBCI. *Ultracortex "Mark IV" EEG Headset*. [online]. [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://shop.openbci.com/collections/frontpage/products/ultracortex-mark-iv>.
- [72] ORGANIZÁCIA SPOJENÝCH NÁRODOV (OSN). *17 cieľov udržateľného rozvoja*. [online]. [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: https://unis.unvienna.org/unis/sk/topics/sustainable_development_goals.html.
- [73] PAJPACH, M., HAFFNER, O., KUČERA, E., A DRAHOŠ, P. Low-Cost Education Kit for Teaching Basic Skills for Industry 4.0 Using Deep-Learning in Quality Control Tasks. *Electronics* 11, 2 (2022). DOI: 10.3390/electronics11020230.
- [74] PAJPACH, M., PRIBIŠ, R., DRAHOŠ, P., KUČERA, E., A HAFFNER, O. Design of an Educational-development Platform for Digital Twins using the Interoperability of the OPC UA Standard and Industry 4.0 Components. In *2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICEC-CME)* (2023), pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICECCME57830.2023.10252941.
- [75] PAPCUN, P., MIČKO, K., A KAJÁTI, E. Industry 5.0 – technológie: bezpečný prenos, ukladanie a analýza údajov. *ATP Journal* 04/2022 (2022), 52–53.
- [76] PAVLOVIČ, D. *Riadenie udalostného systému s využitím PLC a mobilnej aplikácie*. Diplomová práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2023.
- [77] POHANKA, P. *Internet věcí*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://i2ot.eu/internet-of-things/>.

- [78] POPJÁKOVÁ, D., A MINTÁLOVÁ, T. Priemysel 4.0, čo mu predchádzalo a čo ho charakterizuje - geografické súvislosti. *Acta Geographica Universitatis Comenianae* 63, 2 (2019), 173–192.
- [79] PRIBIŠ, R., BEŇO, L., A DRAHOŠ, P. Asset Administration Shell Design Methodology Using Embedded OPC Unified Architecture Server. *Electronics* 10, 20 (2021). DOI: 10.3390/electronics10202520.
- [80] RAMBACH, J., PAGANI, A., STRICKER, D., ALEKSY, M., SCHMITT, J., LANGFINGER, M., SCHNEIDER, M., SCHOTTEN, H., MALIGNAGGI, A., KO, M., ET AL. Augmented Things: Enhancing AR Applications leveraging the Internet of Things and Universal 3D Object Tracking. In *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (2017), vol. 22, p. 25.
- [81] RIESZ, M. *PNEditor - a Petri Net editor*. *PNEditor*. 2014. [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.pneditor.org/>.
- [82] ROMERO, D., BERNUS, P., NORAN, O., STAHERE, J., A FAST-BERGLUND, Å. The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. In *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World* (Cham, 2016), I. Nääs, O. Vendrametto, J. Mendes Reis, R. F. Gonçalves, M. T. Silva, G. von Cieminski, a D. Kiritsis, Eds., Springer International Publishing, pp. 677–686.
- [83] STARK, E. *Moderné metódy ovládania a monitorovania mechatronických systémov s využitím počítačom generovanej reality*. Dizertačná práca (Vedúci práce: Peter Drahoš; Konzultant: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2019. 120 s.
- [84] STARK, E., KUČERA, E., HAFFNER, O., DRAHOŠ, P., A LESKOVSKÝ, R. Using Augmented Reality and Internet of Things for Control and Monitoring of Mechatronic Devices. *Electronics* 9, 8 (2020), 1272.
- [85] STERLING, I., A SWAROOP, P. *Control with your smart devices by staring and gesturing*. Arduino. [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://blog.arduino.cc/2016/07/26/control-with-your-smart-devices-by-staring-and-gesturing/>.
- [86] TIEGELKAMP, M., A JOHN, K.-H. *IEC 61131-3: Programming industrial automation systems*, vol. 166. Springer, 2010.
- [87] TRIFA, V., GUINARD, D., A CARRERA, D. *Web Thing Model*. W3C. [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://model.webofthings.io/>.

- [88] UNIPi.TECHNOLOGY. *Automatizace Jednoduše. Unipi.* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.unipi.technology/cs/>.
- [89] UNITY TECHNOLOGIES. *Create a marker-based AR app.* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://learn.unity.com/project/create-a-marker-based-ar-app>.
- [90] VIGANÒ, G. P. *M2MQTT for Unity.* GitHub. [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://github.com/gpvigano/M2MqttUnity>.
- [91] VORÁČOVÁ, V., PĚNIČKA, M., A VESELÝ, J. *Úvod do modelování procesů Petriho sítěmi.* Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008, 126 s. ISBN 978-80-01-03979-3.
- [92] WIPRO. *Edge Computing - Understanding the User Experience.* [online]. [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.wipro.com/infrastructure/edge-computing-understanding-the-user-experience/>.
- [93] ZHANG, Q., LIU, L., PU, C., DOU, Q., WU, L., A ZHOU, W. A Comparative Study of Containers and Virtual Machines in Big Data Environment. In *2018 IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD) (2018)*, pp. 178–185. DOI: 10.1109/CLOUD.2018.00030.
- [94] ZOLOTOVÁ, I., KAJÁTI, E., A POMŠÁR, L. Industry 5.0 – koncept, technológie, ciele. *ATP Journal 11/2021 (2021)*, 42–43.
- [95] ČESKÝ INSTITUT INFORMATIKY, ROBOTIKY A KYBERNETIKY ČVUT. *Testbed pro Průmysl 4.0. České vysoké učení technické v Praze.* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.ciirc.cvut.cz/cs/teams-labs/testbed/>.
- [96] ČEŠEK, P. *Riadenie DEDES pomocou mikrokontrolérov s využitím Petriho sietí.* Diplomová práca (Vedúci práce: Alena Kozáková; Konzultant: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2016.
- [97] ČÍŽEK, J. *Počítačový master/slave je spoločensky nekorektní. Pripomína otroctví, a proto zmizí.* [online]. [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/pocitacovy-master/slave-je-spolecensky-nekorektni-pripomina-otroctvi-a-proto-zmizi/sc-3-a-204378/default.aspx>.
- [98] ŠTETÁKOVÁ, M. *Riadenie udalostného systému s využitím PLC a webovej aplikácie.* Diplomová práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2023.

- [99] ŠTĚPÁNEK, M. *Multiplatformová aplikácie pre získavanie dát o lokalitách s bezbariérovým prístupom*. Diplomová práca (Vedúci práce: Erik Kučera). Bratislava: FEI STU, 2018. 40 s.
- [100] ŽEMLA, F., CIGÁNEK, J., ROSINOVÁ, D., KUČERA, E., A HAFFNER, O. Smart Platform for Monitoring and Control of Discrete Event System in Industry 4.0 Concept. *Applied Sciences* 13, 19 (2023). DOI: 10.3390/app131910697.

doc. Ing. Erik Kučera, PhD.

DIGITÁLNE A INTELIGENTNÉ TECHNOLOGIE PRE INDUSTRY 4.0

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM
STU, Bratislava, Vazovova 5, v roku 2024.

Edícia vysokoškolských učebníc

Rozsah 283 strán, 213 obrázkov, 7 tabuliek, 22,654 AH, 22,942 VH,
1. vydanie, edičné číslo 6199.

85 – 217 – 2024

ISBN 978-80-227-5430-9

DOI: 10.61544/GYSJ2849