



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ
FAKULTA**

Ing. Lenka Halenárová

Autoreferát dizertačnej práce

**Monitorovanie stavu výrobného procesu
s využitím Edge Computing pre potreby
prediktívnej údržby**

na získanie akademického titulu: doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 2621 Automatizácia a informatizácia procesov

v študijnom odbore: kybernetika

Forma štúdia: denná

Trnava, 13.8.2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na: Katedre aplikovanej informatiky
a automatizácie a Ústave aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky

Predkladateľ Ing. Lenka Halenárová
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ prof. Ing. Pavol Tanuška, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa ohod. na
Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave, J. Bottu 25, 917
24, Trnava**

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan Materiálovotechnologickej
fakulty STU

SÚHRN

HALENÁROVÁ, Lenka: *Monitorovanie stavu výrobného procesu s využitím Edge Computing pre potreby prediktívnej údržby*. [Dizertačná práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky. – Školiteľ: prof. Ing. Pavol Tanuška, PhD. – Trnava: MTF STU, 2025. 139s.

Dizertačná práca je zameraná na monitorovanie technického stavu zariadení s cieľom zabezpečiť ich plnohodnotnú prevádzkyschopnosť v prostredí výrobného celku. Súčasťou práce je návrh senzorickej vrstvy a identifikácia relevantných parametrov pre monitorovaný systém. V ďalšom texte sa práca zaoberá výberom senzorických prvkov na základe ich technických charakteristík a kompatibility s použitým výrobným systémom, v spojení s výberom vyhodnocovacieho prvku nasadeného na hrane siete. Jadro práce tvorí návrh systémovej architektúry pre integráciu fyzického výrobného systému so senzoricou vrstvou a edge vrstvou. Výsledný návrh riešenia je schopný reagovať na poruchy zariadenia v reálnom čase a včasnou reakciou signalizovať daný stav. Na tento účel sú v rámci systému navrhované trigger, ktoré umožňujú aktiváciu rozhodujúcich postupov pri výskyte definovaných prevádzkových stavov. Daný prístup ponúka možnosť okamžitého spracovania údajov na mieste jeho zberu prostredníctvom princípov Edge Computing. Práca je celistvo spracovaná vrátane názorných ukážok použitia, realizovaných v laboratórnom prostredí automatizovaného hybridného systému Festo AFB Factory. Návrh je vhodný a predstavuje základný komponent pre pokročilý systém prediktívnej údržby v prostredí Industry 4.0.

Kľúčové slová: Industry 4.0, monitorovanie, diagnostika, Edge Computing, zber dát, trigger

ABSTRACT

HALENÁROVÁ, Lenka: *Production process condition monitoring using Edge Computing for predictive maintenance*. [Dissertation thesis] – Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Materials Science and Technology; Institute of Applied Informatics, Automation and Mechatronics. – Supervisor: prof. Ing. Pavol Tanuška, PhD. – Trnava: MTF STU, 2025. pp 139.

The dissertation focuses on monitoring the technical condition of devices to ensure their full operability within a production unit environment. It includes the design of a sensor layer and the identification of relevant parameters for the monitored system. The subsequent sections address the selection of sensor elements based on their technical specifications and compatibility with the production system, along with the choice of an evaluation component deployed at the network edge. The core of the work lies in designing a system architecture that integrates the physical production system with both the sensor and edge layers. The proposed solution is capable of detecting equipment failures in real time and signalling the corresponding state with a timely response. To achieve this, the system incorporates triggers that activate specific procedures when predefined operating conditions are met. This approach enables immediate data processing at the point of collection, leveraging the principles of Edge Computing. The dissertation is fully developed and includes illustrative use cases implemented in the laboratory environment of the automated hybrid system Festo AFB Factory. The concept is aptly designed and serves as a foundational component for an advanced predictive maintenance system within the Industry 4.0 framework.

Keywords: Industry 4.0, monitoring, diagnostic, Edge Computing, data collection, trigger

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRÁCE A PREHLAD KLÚČOVÝCH POJMOV..	9
1.1 Industry 4.0.....	9
1.2 Edge Computing.....	10
1.3 Monitorovanie a diagnostika zariadení.....	10
1.4 Údržba.....	11
2 NÁVRH TECHNICKEJ INFRAŠTRUKTÚRY A VÝBER KOMPONENTOV A POSTUPOV PRE NAVRHOVANÉ RIEŠENIE.....	12
2.1 Postupnosť návrhu v súlade so štandardom	12
2.2 Špecifikácia parametrov pre výber senzorických prvkov.....	13
2.3 Výber senzorických prvkov pre navrhované riešenie.....	14
2.3.1 Pracovná stanica – Vibračný dopravník	15
2.3.2 Pracovná stanica – Dávkovač s váhou.....	16
2.3.3 Pracovná stanica – Vybaľovacia stanica.....	18
2.3.4 Pracovná stanica – Recyklačná stanica	19
2.4 Špecifikácia parametrov pre výber EC zariadenia	21
2.5 Výber EC zariadenia pre navrhované riešenie	21
2.5.1 Revolution Pi.....	22
2.5.2 M5Station/M5Stick.....	23
2.6 Fyzické zariadenie, jeho popis, špecifikácia technických parametrov	24
3 NÁVRH ARCHITEKTÚRY SYSTÉMU	25
3.1 Popis architektúry s integráciou senzorickej vrstvy a spracovania údajov prostredníctvom Edge zariadenia.....	26
4 IMPLEMENTÁCIA A TESTOVANIE NAVRHOVANÉHO RIEŠENIA V LABORATÓRNOM PROSTREDÍ	30
4.1 Testovanie navrhovaného riešenia v rámci stanice Vibračný dopravník	30
4.2 Testovanie navrhovaného riešenia v rámci stanice Dávkovač s váhou	34
4.3 Návrh používateľského rozhrania	38
5 ZHODNOTENIE NAVRHNUTÉHO RIEŠENIA	40

6	KONCEPTUÁLNY RÁMEC METODIKY	42
7	PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	48
	ZÁVER A ĎALŠIE SMEROVANIE VÝSKUMU	48
	VÝBER Z BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	51
	ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	53

ÚVOD

Aktuálny technologický a informačný pokrok transformuje priemyselnú sféru a prináša nové požiadavky a kritériá v oblasti efektivity, automatizácie, kvality a rýchlosti výroby. Začlenením digitalizácie, monitorovania zariadení a zberu údajov je podnik schopný získať prehľad o kľúčových parametroch, činnostiach a v konečnom dôsledku o celkovom stave určených zariadení alebo výrobného procesu. Vďaka týmto komponentom je možné aktívne pracovať na detailných analýzach, úpravách, predpovediach a optimalizácii výroby. Dohľad nad výrobnými systémami z hľadiska zlepšenia kondície zariadení a ich efektívneho využitia vo výrobnom procese je aktuálne zásadnou súčasťou priemyslu. Monitorovaním a následnou diagnostikou je výroba schopná manažmentu zdrojov, ktoré do výroby vstupujú. Nie každý podnik však disponuje možnosťou vykonať rozsiahle investície, a preto je nutné hľadať nové, dostupnejšie a menej náročné prístupy na implementáciu komplexných systémov.

Cieľom predkladanej dizertačnej práce s názvom „Monitorovanie stavu výrobného procesu s využitím Edge Computing pre potreby prediktívnej údržby“ je návrh systému monitorovania stavu zariadení pre reálne výrobné systémy, ktorý je vhodný na implementáciu do systému prediktívnej údržby. Navrhovaný systém predstavuje začiatočnú fázu pre návrh systému prediktívnej údržby založeného na stave zariadení. V rámci systému je potrebné vytvorenie infraštruktúry pre senzorickú vrstvu, implementácia základných komponentov pre vyhodnocovanie dát z prostredia výrobnéj linky pomocou Edge Computing, následné zabezpečenie transformácie údajov a návrh vizualizačného prostredia s generovaním alertov.

Tvorba návrhu prebiehala po nasledovných etapách: prvou fázou bol výskum existujúcich riešení a technológií v oblasti monitorovania výrobných systémov. Druhou časťou práce bolo stanovenie požiadaviek na technickú infraštruktúru, montáž a zabezpečenie komunikácie nových technických a senzorických prvkov a zároveň návrh prvku pre zber a spracovanie údajov. V následnosti v ďalších kapitolách práca pozostáva z komplexného návrhu architektúry systému s využitím EC a návrhu rozhrania pre vizualizáciu. V neposlednom rade prebiehala implementácia a overenie navrhovaného riešenia v laboratórnych podmienkach. Poslednými kapitolami, ktoré dizertačná práca zahŕňa sú zhodnotenie navrhnutého riešenia a návrh metodiky pre implementáciu konceptu v priemyselnom využití.

Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je:

Návrh konceptu systému pre monitorovanie výrobného procesu s využitím technológie Edge Computing pre potreby prediktívnej údržby.

Splnenie hlavného cieľa spočívalo v splnení čiastkových cieľov, ktoré boli definované nasledovne:

- výskum existujúcich riešení a technológií v oblasti monitorovania a detekcie anomálií výrobného procesu pre prediktívnu údržbu,
- návrh technickej infraštruktúry a výber komponentov pre dohľadový systém s využitím Edge Computing,
- návrh architektúry systému s využitím EC pre prediktívnu údržbu vrátane rozhrania pre vizualizáciu stavu zariadení a generovanie triggerov,
- implementácia navrhovaného riešenia a overenie funkčnosti v laboratórnom výrobnom systéme,
- zhodnotenie navrhnutého riešenia,
- návrh metodiky pre využitie navrhovaného riešenia v priemysle.

1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRÁCE A PREHEAD KĽÚČOVÝCH POJMOV

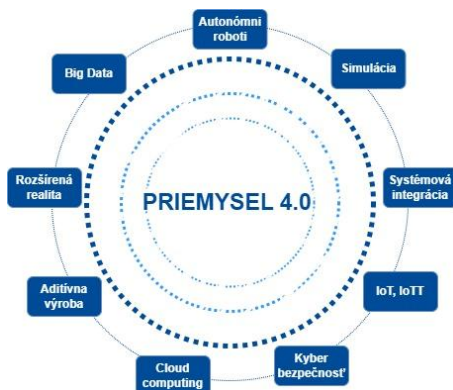
Úvodná kapitola je venovaná základným teoretickým poznatkom súvisiacich s monitorovaním dát, zberom dát, diagnostikou dát s predikovaním, alarmovacími zobrazeniami a Edge Computingom v kontexte riadenia Industry 4.0.

1.1 Industry 4.0

Projekt technológie Priemyslu 4.0 (I 4.0) koncipoval prof. Kagermann s kolektívom v r. 2013 (KAGERMANN 2013) a bol zostavený na základe neustále sa vyvíjajúcej potrebe digitalizácie priemyselnej výroby. Cieľom tohto konceptu bolo prepojenie a komunikácia systémov v rámci celého výrobného procesu, bez prítomnosti človeka. Zároveň dôležitou súčasťou I4.0 bolo jasne identifikovať, lokalizovať, nájsť (historicky, aktuálne) produkty/výrobky v štruktúre výrobného systému (získať obraz o životnom cykle produktu) na základe predošlého prepojenia procesov a spolupráce zariadení. Súčasne koncept prihliadal na zlepšenie produktivity, kvality výrobku, efektívnosti a flexibility výroby.

Implementácia všetkých navrhovaných prvkov smeruje podniky k vytvoreniu k tzv. „Smart factory“ alebo „Inteligentných tovární“, kde nielenže ľudia, stroje a systémy priamo komunikujú a spolupracujú, ale podniky získavajú širšie množstvá dát, ktoré prispievajú k ďalším analýzám, presnejšiemu rozhodovaniu a prípadným predpovediam budúcich udalostí a trendov. V tomto koncepte sa I 4.0 spolieha na niekoľko základných prvkov, ako sú Big Data IoT/IloT, Cloud Computing, Digitálne dvojča, Kyber-fyzikálne systémy, Simulácia, Interoperabilita.

Vzhľadom k využitým technológiám I 4.0 (SILVA 2020) zasahuje a transformuje odvetvia (Obrázok 1), ktoré sa zaoberajú robotizáciou, simuláciou, automatizáciou, rozšírenou realitou, AI a získavajú vysoký potenciál pre inteligentné infraštruktúry.



Obrázok 1 Oblasti využitia Industry 4.0 (SILVA 2020)

1.2 Edge Computing

Vzhľadom k masívnemu nárastu objemu údajov, inteligentných zariadení a požiadavkám využitia priemyselných údajov v reálnom čase, nie je možné v mnohých prípadoch pre zber, spracovanie a ukladanie dát využiť tradičné výpočtové modely. Preto nastupujú technológie, ktoré sú decentralizované, s minimálnym preťažením siete a vysokou škálovateľnosť. Takýmto princípom je Edge Computing (EC) (CAO 2020), ktorý prináša možnosť spracovávať údaje na okraji siete, teda čo najbližšie k zdroju dát. Dátové spracovanie sa uskutočňuje priamo na zariadeniach, ako sú napr. senzory, kamery alebo IoT zariadenia alebo na veľmi blízkych lokálnych serveroch. Vzhľadom ku komplikáciám s prenosom údajov do rôznych úložísk, je výhodnejšie ich spracovať tam, kde sa zhromažďujú. EC významnú úlohu zohráva v prípadoch, kde nie je dobrá funkčnosť pripojenia, sieť je preťažená alebo šírka pásma je obmedzená. Tento princíp je veľmi vhodným a efektívnym nástrojom pre údaje, ktoré nevieme získať priamo, kvalita dát je pri bežných postupoch zlá, bezpečnosť slabá, alebo tým porušujeme pravidlá a postupy danej organizácie. Inými slovami EC presúva výpočtové, úložné kapacity a zdroje na okraj siete, a poskytuje relevantnejšie údaje pre okamžité spracovanie. Tým pádom odbúrava starosti s nákladmi na prenos, nákladmi na energiu, nákladmi na skladovanie, bezpečnosťou pri prenose a ďalšími. A preto tento model radíme medzi využiteľný spôsob zberu a prenosu údajov v priemysle.

Využitie EC v monitorovaní výrobného procesu prináša mnoho výhod – zlepšenie kvality výrobkov, optimalizácia výrobných procesov, okamžitá reakcia na anomálie alebo odchýlky vo výrobnom systéme. Napriek výzvam (obmedzený výpočtový výkon, komplexná správa zariadení, bezpečnosť a ochrana), ktoré sú spojené s implementáciou tejto technológie do výroby, jej výhody predstavujú značné zlepšenia v oblasti monitorovania výrobných procesov a priemyselnej automatizácie.

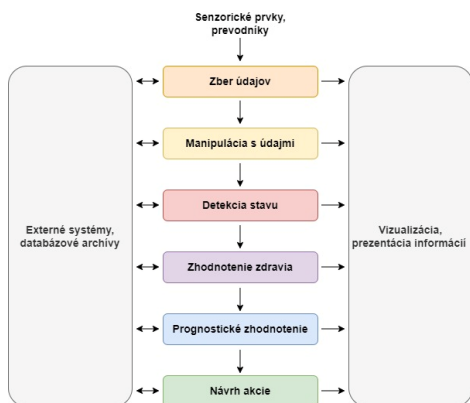
1.3 Monitorovanie a diagnostika zariadení

Zvyšovaním potreby pokročilej výroby sa výrobné procesy stávajú komplexnejšími, komplikovanejšími a náročnejšími. Implementáciou digitalizácie, automatizácie, IoT prvkov a AI do výroby získavame síce širší priestor na časovo a priestorovo/produktovo efektívnu výrobu, viac zdrojov údajov, vyššiu kvalitu výrobkov. V tejto postupnosti je ale nevyhnutné rátať i s väčším počtom kritických situácií, abnormalít a porúch. Preto je potrebné zabezpečiť monitorovanie výrobného procesu ako celku a zároveň monitorovanie zariadení jednotlivito s ich najjednoduchšími súčastami. Monitorovaním sme schopní zaručiť sledovanie stavu na rôzne procesy výroby – monitorovanie elektrických častí, monitorovanie mechanických častí, monitorovanie automatizovaných častí, monitorovanie technických častí. Jasné a cielené monitorovanie jednotlivých častí strojov a následné posúdenie, vyhodnotenie a zlepšenie ich stavu je dôležitou súčasťou globálneho obrazu o zariadení vo výrobnom procese.

V rámci návrhu systému pre monitorovanie stavu výrobných procesov budeme postupovať v súlade s ISO normou 13374-1,2, zabezpečujúcou „Monitorovanie stavu a diagnostiku

strojov“ a zároveň, s ktorou korešponduje štandard „Open System Architecture for Condition-Based Maintenance“ (OSA-CBM), od „Machinery Information Management Open System Alliance“ (MIMOSA).

Norma ISO 13374 (Obrázok 2) definuje 6 blokov funkčnosti v systémoch, ktoré zabezpečujú monitorovanie stavu a určuje všeobecné vstupné a výstupné prvky z týchto blokov. Hlavné bloky môžu byť rozšírené o dva bloky, ktoré na jednej strane definujú externé systémy, databázové archívy, ktoré vstupujú/vystupujú do procesu, a na strane druhej definujú vizualizačné a reprezentačné prvky na výstupe z procesu.



Obrázok 2 Štandard - Monitorovanie stavu a diagnostika strojov (ISO 13374)

1.4 Údržba

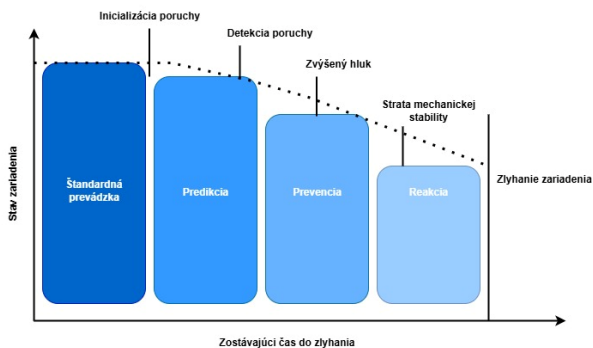
Súčasťou udržiavateľného priemyselného podniku založeného na údajoch je spoľahlivý a optimalizovaný koncept údržby. V podnikoch s masívnou účasťou výrobných systémov je údržba neoddeliteľnou zložkou nielen technického zázemia výroby, ale i manažérskych plánov a plnenia cieľov celej organizácie. Žiadna spoločnosť si neželá pasívne odstavenie prevádzky, ktoré sú spôsobené poruchami zariadení a pôsobia výpadok celého alebo časti výrobného cyklu. Cieľená optimalizácia údržby posúva podnik nielen do výroby s vyššou kvalitou, nižšími prestojmi, výraznou úsporou nákladov, ale i do úrovne adekvátnych rozhodnutí a plánovania rôznych súčastí organizácie.

Dôvodom pre údržbu sú poruchy. A tie sa adekvátnym monitorovacími systémami a včasnou diagnostikou snažíme eliminovať. A preto základnou charakteristikou údržby je odstránenie vzniknutej chyby alebo poškodenia a navrátenie zariadenia alebo jeho časti do prevádzkového stavu. Dosiahnutie tohto stavu je možné rôznymi spôsobmi a preto je nevyhnutné správny a cieľový výber stratégie údržby.

Dnes je vo vysokej miere využívaným typom údržby, údržba na základe stavu „Condition Based Maintenance“ (CBM) (TEIXEIRA 2020). Ideológiou danej údržby je predpoklad, že poruchy sa nevyskytujú okamžite, ale sme schopní ich zistiť ešte v počiatočnom štádiu. Primárna výzva sa upriamuje na stanovenie momentu, v ktorom sa údržba má vykonať.

Ďalším využívaným typom údržby je prediktívna údržba (PATEL 2023). S týmto typom sa spája monitorovanie zariadení v reálnom čase, analýza údajov a predpovede pre rôzne zariadenia alebo typy porúch. Na základe sústavného monitorovania a diagnostiky sme schopní odstrániť skryté poškodenia ešte pred krízovým stavom. Čiže tento typ údržby nie je pevne stanovený a je riadený reálnym opotrebením a zhoršovaním sa stavu zariadenia.

Obrázok 3 poukazuje na prechod zariadenia cez stratégie údržby od inicializácie poruchy až po jeho zlyhanie. Demonštruje zmenu stavu zariadenia v čase.



Obrázok 3 Údržba založená na stave zariadenia (TEIXEIRA 2020)

2 NÁVRH TECHNICKEJ INFRAŠTRUKTÚRY A VÝBER KOMPONENTOV A POSTUPOV PRE NAVRHOVANÉ RIEŠENIE

Základnou podmienkou pre tvorbu dohľadového systému je adekvátne technické zázemie a stanovenie požiadaviek na použité prvky a členy, ktoré prispievajú k identifikácii zariadení v reálnom výrobnom systéme. V tejto kapitole budú popísané prostriedky a postupy, ktoré boli použité pri navrhovanom systéme, a ktorý zabezpečuje monitorovanie a detekciu chýb v rámci výrobného systému Festo AFB Factory.

2.1 Postupnosť návrhu v súlade so štandardom

Navrhovaný koncept monitorovacieho systému bude v súlade s normalizáciou ISO 13374 a súvisiacim štandardom OSA-CBM (MIMOSA). Tento štandard sme si zvolili preto, že pokrýva modulárnu architektúru, ktorá zasahuje od zberu údajov, ich manipuláciu a spracovanie, cez bloky s prognostikou, generovaním výstrah a vizualizáciou. V rámci

postupnosti krokov (Tabuľka 1) sa budeme zaoberať prvými tromi úrovňami a následne siedmou úrovňou z uvádzanej architektúry. Zvolenú architektúru rozšírime o nultú úroveň - pred samotnou úrovňou zberu údajov – návrh pre rozloženie senzorických prvkov, komunikačnú infraštruktúru.

Tabuľka 1 Použité úrovne z OSA-CBM pre návrh konceptu (MIMOSA)

Úroveň z OSA-CBM		Popis
0.	Návrh senzorickej vrstvy	Rozloženie senzorov pre ucelený obraz o zariadení.
1.	Zber údajov	Prístup k údajom z fyzických senzorov (EC).
2.	Manipulácia s údajmi	Manipulácia s údajmi, ich predspracovanie na analýzu, transformácia signálov/údajov.
3.	Detekcia stavu	Porovnanie údajov, vyhodnocovanie údajov, stanovenie limitov, generovanie výstrah.
7.	Ľudské rozhranie	Prezentácia údajov.

2.2 Špecifikácia parametrov pre výber senzorických prvkov

Zber údajov sa spravidla skladá z údajov, ktoré zhromažďujeme z viacerých zdrojov. Jedným zo zdrojov, ktorý poskytuje značné množstvo údajov, je zber zo senzorov. Na základe typu výstupu je možné použiť analógové alebo digitálne senzory. Niektoré senzorické prvky neposkytujú údaje, ktoré je možné okamžite využiť a preto je potrebná úprava signálu alebo použitie analógového alebo digitálneho prevodu. Analógové snímače na vstupe snímajú určenú fyzikálnu veličinu, na výstupe poskytujú analógový signál, ktorý je spojitý v hodnote a v čase. Sú bežne využívané v prognostike mechanických systémov a poskytujú informácie o teplote, napätí, rýchlosti, vibráciách. Digitálne snímače poskytujú hodnoty, ktoré sú reprezentované číselne pomocou signálu diskrétného v čase a hodnote (0/1). V niektorých systémoch, kde nie je možné priame prepojenie s mikrokontrolérom (napr. prostredníctvom sériového rozhrania RS232), je nevyhnutné použiť analógovo-digitálny prevodník s vysokým rozlíšením pre prevod výstupu z analógového senzora do digitálneho formátu. Každý senzor môže pozostávať z rôzneho druhu napájania, inej komunikácie s kontrolérom, iného počtu pinov.

Na základe typu snímanej veličiny je možné nasadiť senzory pre meranie rôznych elektrických, mechanických, tepelných veličín. Základný prehľad je možné nájsť v Tabuľke 2.

Tabuľka 2 Prehľad typov senzorov

Typ veličiny	Snímanie
Elektrické veličiny	Elektrické napätie, prúd, odpor, indukčnosť.
Mechanické veličiny	Tlak, sila, vibrácie, prietok, poloha.

Teplné veličiny	Teplota, tepelná kapacita.
Magnetické veličiny	Elektromagnetické žiarenie, kompas, magnetické pole.
Chemické senzory	PH, koncentrácia.
Biologické senzory	Zrak, chuť, hmat.
Optické a akustické senzory	Zvuk, svetlo.
Špecializované senzory	RFID čítačka, gyroskop.

Pri výbere senzorov je nevyhnutné stanoviť si presné požiadavky na ich funkčnosť. Základnými požiadavky pre senzorické prvky je prevádzková presnosť, vysoká citlivosť, vysoká spoľahlivosť, jednoduchá konštrukcia a zapojenie, nízka závislosť na okolitých vplyvoch, dostatočný merací rozsah. Prehľad minimálnych požadovaných parametrov pre rôzne typy senzorov v návrhu dizertačnej práce je možné nájsť v Tabuľke 3.

Tabuľka 3 Prehľad minimálnych požadovaných parametrov senzorov

Typ snímača	Presnosť	Citlivosť	Rozsah
Teplota	0,5 % *	0,1 °C	-20 : +70 °C
Vibrácie	1,5 % *	0,1 g	10 : 1600 Hz
Vlhkosť	+/-1 % RH	0,1 % RH	0 : 100 % RH
Tlak	0,5 % *	0,1 % *	0 : 100 bar

(*Percentuálne vyjadrenie z rozsahu daného snímača)

Prehľad požadovaných minimálnych parametrov závisí na meranej veličine, pre ktorú je stanovený senzorický prvok použitý. Pretože hodnoty pre niektoré veličiny sme schopní získať zo senzorov bezprostredne, len odčítaním, ako napr. teplota. Tu sme schopní na základe nameranej hodnoty okamžite identifikovať, či je v poriadku alebo nie. Samozrejme je nevyhnutné hodnotu porovnať so stanovenými kritériami. Avšak hodnoty pre iné veličiny je nutné sledovať a na základe ich priebehu v čase a vyhodnotiť, či je veličina v bežnom stave alebo je potrebný zásah pre kritickosť hodnoty. Do tejto kategórie spadajú napr. vibrácie. V časovom priebehu nameraných hodnôt je dôležité stanoviť si bežný chod zariadenia, aby bolo následne možné rozlíšiť prípadné anomálie.

2.3 Výber senzorických prvkov pre navrhované riešenie

Vybrané senzory pre jednotlivé merania v rámci určených pracovísk boli zhrnuté do tabuliek (Tabuľka 4, 5, 6, 7, 8, 9) s typom určeného snímača, s odôvodnením nášho výberu a s nákupnou cenou. Ich výber je stanovený na základe analýzy z podobne zameraných literárnych zdrojov, praktických znalostí nadobudnutých počas štúdia a povahy navrhovaného riešenia. Prostredníctvom doplnkových senzorov sme schopní získať širší prehľad o monitorovanom zariadení a na základe údajov zachovať jeho pracovnú kontinuitu v čo najdlhšom stave.

Vybrané pracoviská automatizovaného výrobného systému Festo AFB Factory, ako Vybalňovacia stanica, FM dopravník a Váha sú čiastočne senzorycky pokryté. Recyklačná stanica však neposkytuje údaje využiteľné pre navrhované riešenie.

2.3.1 Pracovná stanica – Vibračný dopravník

Prvá stanica – FM dopravník - je zameraná na presun sypkého materiálu do po nej nasledujúcej stanice. Jej súčasťou je zásobník materiálu a fluidný sval (FM), ktorý slúži ako zdroj energie použitý pre presun. V súčasnosti sú na danej stanici umiestnené tri kapacitné snímače, ktoré zabezpečujú snímanie prítomnosti materiálu. Dva z nich sú umiestnené vo vstupnej nádrži, tretí je umiestnený na výstupnom potrubí. Výstupné potrubie je možné vyprázdniť prostredníctvom tlaku vzduchu. Momentálne nie sú zabezpečené žiadne údaje pre vyhodnocovanie a plánovanie súčastí pre PdM (Predictive Maintenance). Preto bolo nevyhnutné zabezpečiť ďalšie senzorycké prvky pre monitorovanie stavu hnacieho prvkú, tlaku vzduchu a dopravníka. Výber senzorov Tabuľka 4 bol zvolený účelovo na tri zvolené oblasti – pre monitorovanie tlaku vzduchu v systéme bol zvolený snímač tlaku vzduchu SPTE-P10R-S4-V-2,5K (FESTO) od spoločnosti Festo, na sledovanie stavu dopravníka bol zvolený snímač vibrácií RS-WZ3/WZ1-*-1 (SHANDONG), ktorý je založený na technológii MEMS. Tento snímač sme súčasne použili i pre monitorovanie teploty, konkrétne monitorovanie teploty prostredia. Všetky snímače spĺňali minimálne požadované parametre, ktoré boli stanovené. Snímač tlaku bol kompatibilný s existujúcim systémom, čo bola nesmierna výhoda. Veľkosti boli kompaktné pre montáž v navrhovanom prostredí a zároveň cena zodpovedala našim možnostiam.

Tabuľka 4 Prehľad vybraných senzorov pre FM dopravník

FM dopravník				
Meraná veličina	Typ snímača	Popis	Dôvod výberu	Cena
Teplota	Súčasťou snímača pre vibrácie	Presnosť $\pm 1,5\%$ rozsahu (@1 kHz, 10 mm/s)) Frekvenčný rozsah (10 Hz-1600 Hz)	Dostatočný rozsah, prijateľná cena, primeraná veľkosť.	Od 50 €
Tlak	Festo SPTE-P10R-S4-V-2,5K	Rozsah tlaku 0-1 MPa, Rozsah výstupu 0-10V	Kompatibilný s existujúcim výrobným systémom.	Od 75 €
Vibrácie	RS-WZ3/WZ1-*-1 (MEMS)	Presnosť $\pm 1,5\%$ rozsahu (@1 kHz, 10 mm/s))	Priemyselný snímač vhodný pre navrhované	Od 50 €

		Frekvenčný rozsah (10 Hz-1600 Hz)	riešenie s dostupnou cenou.	
--	--	--------------------------------------	--------------------------------	--

2.3.2 Pracovná stanica – Dávkovač s váhou

Stanica – Váha – je rovnako ako FM dopravník, zameraná na presun sypkého materiálu do po nej nasledujúcej stanice. V rámci tejto stanice je dávkovanie sypkých materiálov umožnené prostredníctvom váženia s následným transportom. Jej súčasťou je zásobník materiálu a váha s extrúderom, ktorá je poháňaná DC servomotorom. V súčasnosti je snímanie prítomnosti a objemu materiálu zabezpečené prostredníctvom troch kapacitných snímačov. Dva z nich sú umiestnené vo vstupnom zásobníku a tretí vo výstupnom potrubí. Rovnako ako pri FM dopravníku, výstupné potrubie je možné vyprázdniť prostredníctvom tlaku vzduchu. V tomto prípade bolo doplnkové monitorovanie zamerané na snímanie stavu elektromotora, prevodovky a ložísk. Preto výber snímačov Tabuľka bol navrhnutý na monitorovanie parametrov tlaku vzduchu, vibrácií, teploty prevodovky a prúdového zaťaženia motora. Pre monitorovanie tlaku vzduchu bol použitý rovnaký snímač ako pri FM dopravníku, konkrétne SPTE-P10R-S4-V-2,5K (FESTO) od spoločnosti Festo. Pre snímanie vibrácií bol zvolený digitálny MEMS mikrofón (M5STACK), ktorý je na báze kremíka. Tento snímač využíva signalizáciu pulznej hustoty modulácie (PDM). Jeho výber bol stanovený kvôli vysokej citlivosti, presnosti a odolnosti voči RF rušeniu. Prostredníctvom snímača PT100 (DEHOU) sme zastrešili monitorovanie teploty prevodovky. Je rozsahovo, presnosťou a cenou prijateľný pre navrhované riešenie. Prostredníctvom elektromera SKU086 (M5STACK1) sme zabezpečili meranie prúdu pre motor BG65X25SI (bezkomutátorový DC motor s integrovaným kódovačom). Použitý snímač je vhodný pre zvolený prúdový rozsah a disponuje I2C zbernicou a integrovaným I2C izolátorom.

V rámci danej pracovnej stanice – Váha – sme sa rozhodli rozdeliť vyhodnotenie získaných údajov do dvoch zariadení. A to - Revolution Pi (REVOLUTION PI) (Tabuľka 5) a M5Station (M5STACK2) (Tabuľka 6). RevPi je zariadenie, ktoré slúži pre zber, spracovanie a vyhodnocovanie údajov zo snímačov teploty a tlaku. M5Station je samostatné zariadenie, ktoré slúži pre zber, spracovanie a vyhodnocovanie údajov zo snímačov vibrácií a prúdového zaťaženia motora. M5Station je operátorská stanica s viacúčelovým integrovaným ovládačom E32 SEMpressif s integrovaným programom ESP Wifi riešenie, s dvojjadrovým nízkoenergetickým mikroprocesorom Xtensa 32 bit LX6. Disponuje servisným programom na zachytávanie údajov v nastavených cykloch a ich prvotného spracovania na prípadnú identifikáciu porúch. Transport údajov zo senzorov je smerovaný priamo ku serveru. Z dôvodu priameho prenosu dát a nezahľtenia komunikačnej infraštruktúry smerom k RevPi. (Viac o daných zariadeniach je možné nájsť v kapitole 3.4) Komunikácia M5Station so serverom je zabezpečená prostredníctvom Ethernetu.

Dôvodom pre toto rozhodnutie bolo, že navrhnuté snímače MEMS mikrofón a Elektromer SKU086 disponujú zbernicou I2C. Revolution Pi touto zbernicou síce disponuje, ale ju využíva pre PiBridge na prepojenie modulov. A vhodným a dostupným zariadením pre

navrhované riešenie je zariadenie M5Station, ktoré nám poskytuje pripojenie oboch snímačov cez zbernicu I2C.

Tabuľka 5 Prehľad vybraných senzorov pre Váhu (RevPi)

Váha				
Meraná veličina	Typ snímača	Popis	Dôvod výberu	Cena
Teplota	PT100	Tepl. rozsah 0-150°C Presnosť $\pm 0,2$ % FS	Prevádzkový rozsah a presnosť spĺňajú požadované kritériá.	Od 10 €
Tlak	Festo SPTE-P10R-S4-V-2,5K	Rozsah tlaku 0-1 MPa, Rozsah výstupu 0-10V	Kompatibilný s existujúcim výrobným systémom.	Od 75 €

Tabuľka 6 Prehľad vybraných senzorov pre Váhu (M5Station)

Váha				
Meraná veličina	Typ snímača	Popis	Dôvod výberu	Cena
Vibrácie	MEMS mikrofón	Citlivosť a odstup signálu od šumu 94 dB SPL @ 1kHz, -22 dBFS, Spotreba energie 600 μ A, Je na báze kremíka	Využíva signalizáciu pulznej hustoty modulácie. Má vysokú citlivosť, nízku spotrebu energie, odolnosť voči rušeniu a hladkú frekvenčnú odozvu.	Od 20 €
Prúdové zaťaženie motora	Elektromer SKU086 (meranie prúdu)	Presnosť 0,1 % FS, ± 1 počet, Rozlíšenie 0,3mA, Vstavaný I2C izolátor CA-IS30205	Spĺňa vhodnosť pre špecifikovaný prúdový rozsah, I2C zbernicu a integrovanú I2C izolátor.	Od 20 €

2.3.3 Pracovná stanica – Vybalňovacia stanica

Ďalšou použitou stanicou pre zakomponovanie senzorickej vrstvy je Vybalňovacia stanica – je východiskovou stanicou recyklačnej stanice. Je zameraná na vybalenie fliaš z palety/prepravky, ktoré boli uložené v sklade. Prostredníctvom dvojosého manipulátora s upínačom sú tri fľaše súčasne premiestnené z palety na pás. Fľaše s obsahom a uzáverom putujú do recyklačnej stanice. Momentálne je stanica zabezpečená indukčnými snímačmi pre kontrolu polohy a optickými snímačmi pre detekciu fliaš. Pre získanie širšieho spektra údajov pre dané pracovisko, obsahuje náš návrh doplnkové senzorické prvky. V tomto prípade sme sa zamerali na monitorovanie teploty na motoroch a na zdvihu ramena, monitorovanie elektrického prúdu na vertikálnych motoroch a motore horizontálneho posunu, monitorovanie vibrácií na vysunutom ramene a monitorovanie plošného tlaku na ramene manipulátora.

Pre monitorovanie teploty na motoroch a motore horizontálneho posunu bol použitý snímač PT100 (DEHOU), ktorý sa nám osvedčil pri iných meraniach a jeho prevádzkový rozsah a presnosť spĺňali požadované kritériá. Prostredníctvom snímača tlaku Festo SPTE-P10R-S4-V-2,5K (FESTO) sme zabezpečili monitorovanie tlaku na ramene manipulátora. Výhodou je kompatibilita s existujúcim výrobným systémom. Pre snímanie hodnoty prúdu zaťaženia na motoroch sme stanovili snímač prúdu SKU086 (M5STACK1), ktorý spĺňa požadovaný merací rozsah a poskytuje komunikáciu cez I2C protokol. Prostredníctvom snímača Mini Unit PDM UO89 (M5STACK) sme zastrešili monitorovanie vibrácií. Digitálny mikrofón je založený na báze kremíka a disponuje vysokou citlivosťou. MEMS mikrofón je využitý na spektrálnu analýzu vibrácií vo forme zvukových vln vo frekvenčnom rozsahu 100 Hz -10 kHz.

I v tomto prípade sme sa rozhodli vyhodnotenie a spracovanie údajov zo senzorov rozdeliť na dve rôzne zariadenia. RevPi slúži ako zariadenie pre zber, vyhodnotenie a spracovanie údajov z teplotného, tlakového senzora (Tabuľka 7). Stanica M5Stick (M5STACK3) slúži ako zariadenie pre zber a spracovanie údajov zo snímača vibrácií a prúdového senzora (Tabuľka 8). M5Stick je menšia verzia programovateľného kontroléra, ktorý je možné využiť pre rôzne aktivity. Napr. ako senzorické zariadenie, terminálový ovládač, EC zariadenie pre zber a vyhodnotenie údajov na okraji siete, zariadenie pre bezpečnostný systém. V našom prípade stanica M5Stick slúži ako nezávislé zariadenie určené na zber, spracovanie a vyhodnotenie údajov zo senzorickeho prvku pre vibrácie. Dátový tok je smerovaný priamo na server, s cieľom minimalizovať zaťaženie komunikačnej infraštruktúry vedúcej k EC zariadeniu. Komunikačné prepojenie so serverom prebieha prostredníctvom Ethernetu.

Tabuľka 7 Prehľad vybraných senzorov pre Vybaľovaciu stanicu (RevPi)

Vybaľovacia stanica				
Meraná veličina	Typ snímača	Popis	Dôvod výberu	Cena
Teplota	PT100	Tepl. rozsah 0-150°C Presnosť $\pm 0,2$ % FS	Prevádzkový rozsah a presnosť spĺňajú požadované kritériá.	Od 10 €
Tlak	Festo SPTE-P10R-S4-V-2,5K	Rozsah tlaku 0-1 MPa, Rozsah výstupu 0-10V	Kompatibilný s existujúcim výrobným systémom.	Od 75 €

Tabuľka 8 Prehľad vybraných senzorov pre Vybaľovaciu stanicu (M5Stick)

Vybaľovacia stanica				
Meraná veličina	Typ snímača	Popis	Dôvod výberu	Cena
Vibrácie	Mini Unit PDM mikrofón UO89	Citlivosť a odstup signálu od šumu 94 dB SPL @ 1kHz, -22 dBFS, Spotreba energie 600 μ A, Váha 4 g.	Digitálny mikrofón založený na báze kremíka. Disponuje vysokou citlivosťou, nízkou spotrebou energie, anti-rádiofrekvenčné rušenie.	Od 5 €
Prúd	Elektromer SKU086 (meranie prúdu)	Presnosť 0,1 % FS, ± 1 počet, Rozlíšenie 0,3mA, Vstavaný I2C izolátor CA-IS30205	Spĺňa vhodnosť pre špecifikovaný prúdový rozsah, I2C zbernicu a integrovaný I2C izolátor.	Od 20 €

2.3.4 Pracovná stanica – Recyklačná stanica

Daná stanica – Recyklačná stanica – je zameraná na recykláciu surovín a použitých komponentov pred budúcim vstupom do obehu výrobného systému. Úlohou tejto stanice je

odstránenie uzáveru/vrchnáka z fľaše a jeho posunutie do ďalšej stanice (Distribučná stanica). Zároveň zabezpečuje odsatie tekutého materiálu prostredníctvom pumpy a sypkého materiálu z fliaš prostredníctvom vákuovej pumpy. Primárnym prvkom recyklačnej stanice je priemyselný robot Mitsubishi RV-2SDB so šiestimi stupňami voľnosti. Robot slúži na odstránenie uzáverov z fliaš a odsatie materiálov. Prázdne fľaše bez uzáveru sú po dopravníkovom páse smerované do rotačnej plničky. Momentálne sú na pracovisku umiestnené indukčné snímače pre kontrolu polohy, optické snímače pre detekciu fliaš a RFID snímače pre identifikáciu fliaš na výstupe zo stanice. Recyklačná stanica a jej riadiace PLC poskytuje určité množstvo údajov, ktoré sme schopní získať prostredníctvom Teach pendantu. Tieto údaje, ako monitorovanie pohybu robota, monitorovanie prevádzky, monitorovanie signálu nie sú pre náš systém zaujímavé v takej miere ako parametre súvisiace s prevádzkou robota, napr. napätie, prúd, výkon. A preto je nevyhnutné doplnkové senzorické pokrytie pre poskytnutie celistvých údajov o zariadeniach v rámci daného pracoviska.

Pre monitorovanie stavu na dopravníkovom páse sme použili vibračný snímač RS-WZ3/WZ1-*-1, ktorý je založený na technológii MEMS. Rovnako ako v prípade použitia na FM dopravníku, bol využitý súčasne na snímanie teploty. V tomto prípade výstup zo snímača zabezpečuje doplnkové informácie o teplote snímačov robota. Tretím doplnkovým senzorom bol snímač tlaku vzduchu, konkrétne SPTE-P10R-S4-V-2,5K od spoločnosti Festo, ktorý slúžil na detekciu úniku tlaku vzduchu, poruchy ventilu a regulátora. Vybrané senzorické prvky zapadali do konceptu navrhovaného riešenia a poskytovali požadované parametre (Tabuľka 9).

Tabuľka 9 Prehľad vybraných senzorov pre Recyklačnú stanicu

Recyklačná stanica				
Meraná veličina	Typ snímača	Popis	Dôvod výberu	Cena
Teplota	Súčasťou snímača pre vibrácie	Presnosť $\pm 1,5\%$ rozsahu (@1 kHz, 10 mm/s)) Frekvenčný rozsah (10 Hz-1600 Hz)	Dostatočný rozsah, prijateľná cena, primeraná veľkosť.	Od 50 €
Tlak	Festo SPTE-P10R-S4-V-2,5K	Rozsah tlaku 0-1 MPa, Rozsah výstupu 0-10V	Kompatibilný s existujúcim výrobným systémom.	Od 75 €
Vibrácie	RS-WZ3/WZ1-*-1 (MEMS)	Presnosť $\pm 1,5\%$ rozsahu (@1 kHz, 10 mm/s)) Frekvenčný rozsah (10 Hz-1600 Hz)	Priemyselný snímač vhodný pre navrhované riešenie s dostupnou cenou.	Od 50 €

2.4 Špecifikácia parametrov pre výber EC zariadenia

Výber prvku pre Edge Computing je špecifikovaný účelom, na ktorý je stanovený. Prostredníctvom EC zabezpečíme zber, spracovanie, transformáciu a vyhodnotenie údajov na najnižšej vrstve, a to na úrovni senzorov. Tým zachováme plynulé zhromažďovanie údajov s minimálnym zaťažením siete a nízkou latenciou.

Zo širokého spektra momentálne dostupných mechanizmov, sme hľadali taký, ktorý je prijateľný pre navrhované riešenie – vykonávanie úloh na okraji siete. Pri posudzovaní výkonnostných, funkčných, veľkostných, technických požiadaviek sme za kľúčové aspekty určili zachovanie dostatočného výkonu zariadenia v celom priebehu testovania, modulárnosť a flexibilitu v rámci konektivity a I/O prvkov, jednoduchú manipuláciu pri montáži i prevádzke, otvorený prístup pre technickú podporu, kompaktnosť a prijateľné rozmery. V poslednom rade dôležitým prvkom pre posúdenie bola i cena a dostupnosť oficiálneho predajcu.

Po preskúmaní všetkých parametrov, ako sú konektivita, flexibilita, modularita, podpora systémov a integrácia do existujúceho výrobného procesu, sme pre účely navrhovaného riešenia zvolili zariadenie Revolution Pi (REVOLUTION PI). RevPi podporuje široké spektrum komunikačných protokolov, ako sú Modbus, RS485, RS232, Profinet, čím vyhovie požiadavkám a špecifikám navrhovaného riešenia. Vďaka modulárnosti, je možné ho rozšíriť o vstupno-výstupné jednotky bez potreby vývoja vlastných hardvérových riešení alebo zložitého prepájania externých zariadení. Má zabezpečenú kvalitnú technickú podporu s prístupom k otvorenej platforme. Zariadenie je navrhnuté pre nasadenie do polopriemyselného až priemyselného prostredia kvôli svojej robustnosti a odolnosti. Svojím výkonom a funkcionalitou je vhodný ako zariadenie pre monitorovanie procesov, ktorého súčasťou je komunikácia so senzorickou vrstvou, zber a spracovanie údajov na lokálnej úrovni, a transport údajov do rozhodovacích systémov.

V súlade so zámerom implementácie navrhovaného riešenia do praxe sme následne posudzovali i využiteľnosť v priemyselnom prostredí. Za splnenia určitých podmienok je zariadenie RevPi využiteľné i v reálnom výrobnom prostredí. Je nevyhnutné však prihliadať na robustnosť celého výrobného systému, množstvo zariadení, senzorov a objem získaných údajov, ktoré by bolo nutné na zariadení spracovať. Zariadenie je koncipované tak, aby bolo schopné obsiahnuť viacero senzorických prvkov a poskytovalo adekvátny výkon pre spracovanie hodnôt z nich. V našom prípade vstupuje do výrobného celku ako sekundárny prvok, rozširujúci možnosti monitorovania a spracovania údajov na lokálnej úrovni.

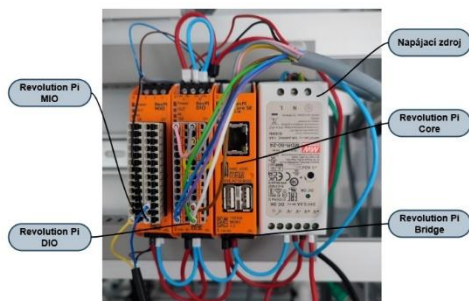
2.5 Výber EC zariadenia pre navrhované riešenie

Na základe odlišnosti komunikačného rozhrania niektorých vybraných senzorických prvkov sme sa v našom návrhu rozhodli využiť nakoniec dve zariadenia, ktoré sú schopné zabezpečovať zber, spracovanie a vyhodnocovanie údajov. Tento zámer sme uvádzali už v kapitole 2.3 pri výbere senzorických prvkov. Obe zvolené zariadenia – Revolution Pi a M5Station/M5Stick umožňujú zhromaždiť, analyzovať a interpretovať údaje na lokálnej

úrovni, t.z. na edge vrstve a transportovať predspracované informácie do cloud vrstvy pre vykonanie podrobných analýz. Na základe analytického vyhodnotenia dát je následne eventuálny rozhodovací systém schopný vyvodit' adekvátne závery a trendové rozhodnutia pre ďalšie celky podniku.

2.5.1 Revolution Pi

Prvým zariadením, ktoré sme v práci zvolili pre zber a vyhodnocovanie údajov zo senzorickej vrstvy je Revolution Pi (REVOLUTION PI) (Obrázok 4). Je to otvorené, modulárne priemyselné PLC založené na Raspberry Pi s procesorom ARM Cortex-A7 od spoločnosti Kunbus. Výhodou tohto zariadenia je dostačujúca odolnosť pre prácu v laboratórnych prostrediach a ponuka širokého spektra komunikačných rozhraní pre priemyselnú automatizáciu. Podporuje rôzne protokoly a štandardy používané v priemyselných aplikáciách, ktoré vedú k monitorovaniu a automatizácii. Prostredníctvom modulárneho systému a následného rozšírenia možností pre rôzne typy vstupov/výstupov sa z neho stáva flexibilné riešenie pre priemyselné aplikácie. Má silnú technickú podporu s otvoreným prístupom, čo poskytuje profesionálne služby pre začiatočníkov i pokročilých vývojárov tejto sféry. Existuje niekoľko modelov RevPi, ktoré sa líšia typom činností, ktoré umožňujú; výkonom a vstupmi/výstupmi, ktoré poskytujú.



Obrázok 4 Identifikácia častí zariadenia Revolution Pi

Pre účely dizertačnej práce sme zvolili model RevPi Core. Z dôvodu, že základný modul je možné rozšíriť o ďalšie moduly s digitálnym a analógovým rozšírením na základe potreby pripojenia vybraných senzorov a akčných členov. Výber tohto prvku do veľkej miery súvisí s možnosťou využitia početných komunikačných rozhraní vrátane Profinet, Profibus a RS485. Platforma je založená na Linuxe, čo umožňuje využitie ďalších technológií (Node-RED, Python, C jazyk), ako aj spúšťanie aplikácií, ktoré sú podporované komunikáciou

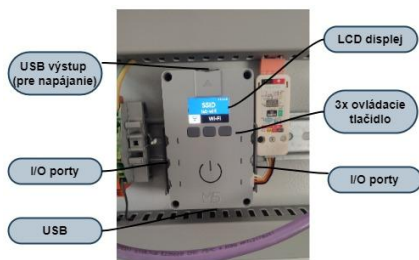
STU

MQTT a OPC UA. Je jednoduchý na ovládanie, rozšíriteľný v rámci potrebnosti vstupov/výstupov a cenovo dostupný pre naše účely.

Vybraný základný model RevPi Core sme rozšírili o ďalšie dva moduly, konkrétne RevPi DIO a RevPi MIO. Na rozšírenie funkčnosti a pripojenie externých modulov sme použili špeciálny konektor PiBridge. Konektor je navrhnutý tak, aby poskytoval možnosť pripojenia rôznych príslušenstiev a rozširovacích modulov, ktoré môžu rozšíriť RevPi v oblasti priemyselnej automatizácie a IoT prvkov. Okrem rozširovacieho charakteru PiBridge zabezpečuje aj napájanie a prenášanie údajov medzi RevPi a modulmi, čím zjednodušuje integráciu a minimalizuje potrebu ďalších káblov a napájacích zdrojov.

2.5.2 M5Station/M5Stick

Druhým použitým zariadením pre vyhodnocovanie a spracovanie údajov je M5Station (M5STACK1) (Obrázok 5) alebo M5Stick (M5STACK3) od spoločnosti M5Stack. M5Station je programovateľné priemyselné zariadenie využiteľné na monitorovanie prostredia, ako IoT uzol, na zber a spracovanie údajov ako okrajové zariadenie, HMI panel pre ovládanie iných zariadení. Disponuje čipom ESSP32 s dvojjadrovým procesorom, zabudovanou Wifi, pamäťou 16GB, displejom 1,14" IPS LCD, portami USB Typ-C a RS485 pre napájanie. Tri tlačidlá je možné naprogramovať pre príslušné ovládanie a interakciu so zariadením. 6 Grove portov sme schopní využiť ako digitálny vstup/výstup, I2C vstup (senzor vlhkosti, teploty...) a UART (sériová komunikácia s perifériami). Ďalšie vstupy získavame prostredníctvom GPIO pinov, kde sme schopní analógovo pripojiť rôzne senzorické prvky s analógovým výstupom a signály previesť na digitálne hodnoty vhodné



Obrázok 5 Identifikácia častí zariadenia M5Station

pre spracovanie na zariadení (ADC prevod). Podporuje prostredia ako Arduino Ide, UIFlow, PlatformIO, ESP-IDF. Rozmerovo je kompaktný, zariadenie je robustné do priemyselného prostredia a konštrukčne zodpovedajúce potrebám navrhovaného riešenia.

M5Stick je mini verzia programovateľného zariadenia. Je ľahko prenosné, ale výkonné. V porovnaní s M5Station má menší displej, menej robustné telo a disponuje menším počtom portov. Zároveň jeho menšie rozmery sú vhodnejšie pre umiestnenie ako pohybový snímač na miesta, kde iné robustnejšie zariadenia nie sú vhodné. V našom návrhu je M5Stick

zariadenie zvolené ako zariadenie pre zber a vyhodnotenie údajov z určených senzorov. K ovládaniu zariadenia nám slúži jedno programovateľné tlačidlo.

2.6 Fyzické zariadenie, jeho popis, špecifikácia technických parametrov

Návrh riešenia je fyzicky realizovaný v laboratórnom prostredí na modeli výrobného systému Festo Didactic AFB (FESTO1) (Obrázok 6). Model danej linky je vytvorený z reálnych prvkov používaných v komerčnom priemysle. Zariadenie je schopné pracovať ako celok, ale môže byť rozdelené do jednotlivých systémov. Jednou z výhod navrhovaného riešenia je, že testovanie navrhovaných riešení a postupov nie je obmedzené výrobou, ako v reálnom prostredí.



Obrázok 6 Hybridný modulárny automatizovaný systém Festo AFB Factory

Modulárny hybridný automatizovaný výrobný systém Festo AFB Factory je variabilný a rozširiteľný systém pracovných staníc, ktoré sú schopné spolupracovať a zároveň fungovať samostatne. Prostredníctvom zabudovaných technológií je možné skúmať a pracovať s dôležitými prvkami z oblasti riadenia a automatizácie. Prostredníctvom výrobného systému sme schopní skúmať používanie a programovanie PLC, zosieťovanie snímačov a akčných členov, programovanie a pohyb robotického ramena, meranie elektrických a procesných veličín, monitorovanie procesov, riadenie systému a mnoho ďalších. Systém je možné spustiť v manuálnom alebo automatickom režime.

Úlohou výrobného systému, v rámci produkčného charakteru, je naplnenie fliaš sypkým alebo tekutým obsahom a dopravenie uzatvorených fliaš s patričným obsahom do paletového skladu. Proces začína v dvoch fázach. Na jednej strane prípravou a dávkovaním materiálu pre plnenie fliaš - v prípravných staniciach – príprava sypkej zmesi (v našom prípade granulátu) a príprava tekutej zmesi (v našom prípade voda). Na strane druhej, prípravou fliaš pre plnenie.

3 NÁVRH ARCHITEKTÚRY SYSTÉMU

V súlade s rastúcimi nárokmi na priemyselný sektor je nevyhnutné prihliadať na aspekty, ktoré významne ovplyvňujú všetky články výrobného podniku. Najmä v prípade, ak plánovaná transformácia a digitalizácia výroby smeruje ku konceptu a princípom Industry 4.0, poprípade Industry 5.0. Z tohto dôvodu je nevyhnutné koncipovať návrh riešenia v súlade s jasne stanovenými kritériami.

Prvým predpokladom je systém so sledovaním procesov. Zásadnou požiadavkou pre systém tohto typu je krátka reakčná odozva na vzniknuté podnety. Vďaka prvkom v režime „Just in Time“ je podnik schopný vyrábať bez častých odstávok výroby, keďže poruchy alebo zlyhania zariadení sú identifikované a odstránené v krátkom časovom horizonte. Systém tak dokáže promptne detegovať chybu a vyvarovať sa kritickým situáciám. Druhým predpokladom, v súlade s princípmi Industry 4.0, je spracovanie údajov, čo najbližšie k zdrojom. Okrajové zariadenia čiastočne preberajú funkcionality riadiacich prvkov, avšak ich umiestnenie je priamo v lokalite zberu. Tento model je obzvlášť vhodný v prípadoch nevyhnutnosti rýchlej reakcie, napr. pri detekcii anomálií v prevádzkovom režime výroby. Tretou súčasťou celku je integrácia dohľadového systému so systémom údržby. Na základe historických, štatistických a aktuálnych údajov podnik získava silný nástroj pre optimalizáciu prevádzky zariadení, predikciu spôsobilosti a spoľahlivosti výroby a kvalitný plán údržby.

Pred samotnou realizáciou návrhu systému je nevyhnutné pristúpiť k niekoľkým krokom, ktorých cieľom je identifikovať, špecifikovať a konkretizovať procesy, stavy a priebehy výroby z rôznych hľadísk. V počiatočnej fáze prípravy systému je vhodné venovať pozornosť analýze poruchových trendov v kontexte údržby. V danom bode je nevyhnutné analyzovať nastávajúce poruchové hlásenia, identifikovať vznikajúce problémové stavy a ich vplyv na prevádzkyschopnosť výrobného procesu. Zároveň je nutné vytvoriť mapu rizikových zariadení/komponentov z hľadiska frekvencie odstávok a náročnosti údržby. V nadväznosti na analýzu z predošlého uvedeného kroku by mal podnik špecifikovať potreby, ktoré budú tvoriť základ pre návrh monitorovacieho systému. Súčasťou tohto procesu je ekonomicko-finančná analýza, ktorá umožní vyhodnotiť očakávané prínosy a úspory vyplývajúce z implementácie systému vo vybranej výrobnej prevádzke. Na základe výstupov z predošlých bodov je potrebné definovať požiadavky podniku na nastávajúci monitorovací systém pre efektívne pokrytie údržbových požiadaviek a optimalizáciu plánovania zásahov. V rámci ďalšej etapy návrhu je nevyhnutné pristúpiť ku komplexnej a detailnej analýze stavu existujúcej technickej a organizačnej štruktúry podniku, vrátane identifikácie všetkých existujúcich funkčných a technologických zložiek a procesov. Ďalším krokom v rámci návrhu systému je špecifikácia zariadení a stanovenie relevantných procesných a technických parametrov, ktoré sú predmetom monitorovania. V nasledujúcom kroku pristupujeme už k samotnému návrhu architektúry a systému pre zber, spracovanie a archiváciu údajov, ktorý berie na zreteľ integráciu s existujúcou infraštruktúrou a poskytuje výkonný, bezpečný a spoľahlivý systém. Cieľom ďalšieho kroku je samotná a cielená

implementácia systému navrhovaného systému do existujúceho prostredia, pričom sú zohľadňované technické, organizačné a prevádzkové aspekty výrobného podniku. Súčasťou daného bodu je pilotná prevádzka systému s cieľom optimalizovať a odstrániť prípadné nedostatky. Po nasadení systému do plnej prevádzky prebieha sledovanie a optimalizácia systému v dlhodobom meradle. Vykonáva sa kontrola správnosti a presnosti systému, zabezpečenie podpory a vyhodnocovania. Všetky uvedené kroky sú súčasťou prikladaného konceptuálneho rámca metodiky, ktorého cieľom je poskytnúť podniku komplexný základ pre nasadenie dohľadového systému pre potreby prediktívnej údržby.

3.1 Popis architektúry s integráciou senzorickej vrstvy a spracovania údajov prostredníctvom Edge zariadenia

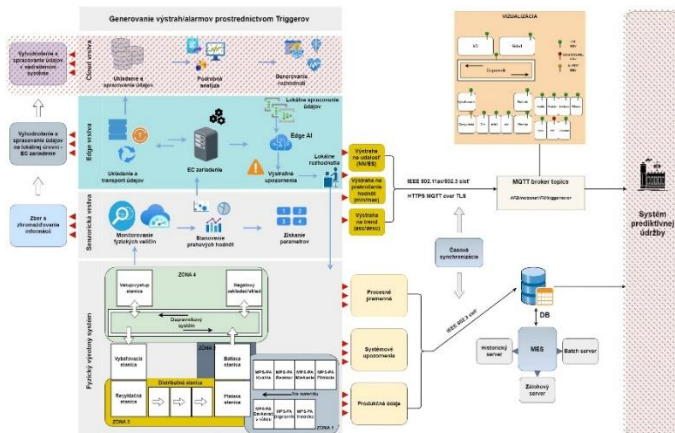
Navrhovaný systém je schopný pracovať na princípe decentralizovaného spracovania dát s využitím Edge Computingu. Prostredníctvom senzorickej vrstvy (zakoňponovaných senzorov) na výrobnom zariadení je možné zaznamenávať parametre dôležité pre špecifikáciu daného zariadenia. Pomocou senzorov sme schopní získať údaje zo zariadení a zhromaždiť ich na okrajové zariadenie, kde sa vykoná spracovanie a vyhodnotenie. Ak sú údaje v bežných medziach systém ďalej monitoruje. V prípade, ak sú prekročené určené hranice a zistená abnormalita vo výrobnom procese, systém na základe určených pravidiel generuje trigger – alarm o skutočnosti, ktorá nastala. V prípade, ak je zakoňponovaný nadradený systém, jedná sa už o hybridný model. Nakoľko sa využíva decentralizovaná senzorická vrstva s centralizovaným rozhodovaním. Riadiace centrum v tomto prípade určuje vykonanie potrebných krokov pre riešenie vzniknutej situácie. V našom prípade sa budeme zaoberať decentralizovaným systémom v senzorickej vrstve, ale naznačíme prepojenie aj s centrálnym prvkom. Vo výslednom efekte bude abnormalita vo výrobnom systéme oznámená triggerom/alarmom prostredníctvom Node-Red.

Dané riešenie v spolupráci s normalizáciou ISO 13374 a architektúrou OSA-CBM berie do úvahy prvé tri vrstvy a následne siedmu vrstvu. V prípade prvých troch sa jedná o vrstvy - pre prístup k fyzickým senzorom; pre manipuláciu, predspracovanie údajov a transformáciu signálov; pre vyhodnotenie údajov a nastavenie prahových hodnôt. Dané vrstvy sú realizované prostredníctvom EC zariadenia (Revolution Pi) a implementované pomocou jeho softvéru. Nasledujúce vrstvy OSA-CBM architektúry, ktoré pokrývajú zhodnotenie zdravotného stavu; prognostické hodnotenie do budúcnosti; a podpora pre rozhodovanie, nie sú súčasťou navrhovaného riešenia. Interakcia (reakcia na vzniknutú situáciu/alarm) je riešená na úrovni obsluhujúceho personálu a to manuálne. Trigger chybovej udalosti je sprostredkovaný prostredníctvom vizualizačného subsystému Node-Red, v jednoduchšej a zrozumiteľnej forme pre obsluhujúci personál. Navrhované riešenie je vstupným elementom pre budúci systém PdMS (Predictive Maintenance System), kde nadradený systém bude obsahovať prvky pre podporu rozhodovania a generovanie akcií pre údržbu. Údaje, ktoré reprezentujú výstupy z EC vrstvy budú prezentované ako výstrahy, ktoré je možné označiť ako „trigger/spúšťače“. Logická „0“ (FALSE) naznačuje bežný chod výrobného systému bez identifikácie komplikácie/chyby/anomalie. Parametre z prevádzky monitorovaného

zariadenia podliehajú nastaveným prahovým hodnotám. Logická „1“ (TRUE) naznačuje vznikajúcu komplikáciu na prevádzkovanom zariadení, chod výrobného systému sa do určitej miery vymyká bežnému stavu a definovaným hraničným hodnotám.

Ako sme naznačili v kapitole 2.2 spôsob spracovania údajov pre triggerovací systém závisí od konkrétneho druhu sledovaného parametra. Prvou skupinou, na základe ktorej sme schopní určiť poruchu sú priamo namerané veličiny. Základom priameho merania je získanie okamžitej hodnoty meranej veličiny. Priamo získaná veličina nám postačuje na posúdenie poruchového stavu a pri prekročení stanovených limitov je systém schopný bezprostredne spustiť „trigger“. Takto získané hodnoty vieme využiť pre okamžité odčítanie a identifikáciu stavu, ale i ďalšiu prácu, prípadné porovnania. Druhou skupinou sú veličiny, ktoré nie sme schopní priamo odčítať a použiť, ale v slede monitorovania výrobného systému sme schopní ich získať. Základom nepriameho merania je identifikácia časového priebehu nameraných hodnôt a ich vyhodnotenie prostredníctvom súboru pravidiel. Zvolené parametre je možné identifikovať a spracovať prostredníctvom adekvátne zvoleného typu AI (napr. neurónová sieť) v použitom EC zariadení. Prostredníctvom NN sme schopní pomocou výstupu, logická „0“ (FALSE) – nie je zistená porucha a logická „1“ (TRUE) – je zistená porucha - určiť stav, v ktorom sa zariadenie nachádza.

Navrhované architektonické riešenie (Obrázok č. 7 – Schematické znázornenie navrhovaného systému) znázorňuje trojvrstvovú architektúru využívajúcu EC prvok. Táto architektúra zabezpečuje prepojenie fyzického výrobného systému so senzorkovou vrstvou a edge vrstvou. Pre komplexnejšiu interpretáciu sme do schematického znázornenia zahrnuli i cloudovú vrstvu (4 vrstva). V našom navrhovanom systéme však táto vrstva zatiaľ nie je implementovaná.



Obrázok 7 Schematické znázornenie navrhovaného systému

STU

Každá z vrstiev slúži ako špecifická zóna systému na získavanie údajov a ich vzájomný prenos. Konceptia blokovej schémy je orientovaná na integráciu a plynulý tok dát medzi jednotlivými vrstvami.

Základným elementom vrstvovej architektúry je fyzický výrobný systém alebo zariadenie, ktoré je predmetom monitorovania. Tento systém predstavuje najnižšiu vrstvu architektúry. Výrobný systém Festo AFB Factory disponuje 4 zónami, kde každá z nich zabezpečuje jednu oblasť činnosti – príprava materiálu; plnenie a balenie; rozbaľovanie a recyklácia; logistika. Každá zo staníc v danej zóne je schopná pracovať samostatne a zároveň kolaborovať s ostatnými pracoviskami v iných zónach. V rámci systému sme schopní narábať s produkčnými údajmi, procesnými premennými a systémovými upozoreniami. Proces výrobného systému je riadený prostredníctvom priemyselných PLC Siemens S7-300 pripojených k regulovanej technológii cez 24-pinový konektor zbernice 488. Vizualizácia je zabezpečená cez externé rozhranie, konkrétne HMI operátorské panely. Komunikácia systému a prenos údajov je založený na protokoloch TCP/IP a Ethernet. Pripojenie z vonkajšieho prostredia je možné prostredníctvom VPN siete (Virtual private network), nakoľko vnútorná sieť je zabezpečená priemyselným firewallom Scalance S612. Jednotlivé zariadenia sú konfigurované prostredníctvom statických privátnych IP adries (192.168.10.0/24), ktoré sú firewallom rozpoznateľné. Bezdrôtová komunikácia medzi prvkami je zabezpečená prostredníctvom zariadenia Scalance W788, ktorý v režime prístupového bodu zabezpečuje šifrovanie WPA2.

Nad fyzickým systémom je navrhovaná vrstva senzorického pokrytia. Daná vrstva zabezpečuje implementáciu senzorických prvkov pre komplexné monitorovanie fyzického systému. Je charakterizovaná ako centrálny zdroj údajov z fyzického systému. Tvoria ju rôzne druhy senzorických prvkov, ktoré slúžia na zhromažďovanie údajov o prevádzke/stave jednotlivých strojov, skupiny zariadení, alebo prostredia, v ktorom sa zariadenia nachádzajú. Senzorická vrstva nám poskytuje hodnoty z monitorovaných fyzických veličín, z ktorých prostredníctvom určenia prahových limitov získame prevádzkové parametre. Tieto výstupy sú priamo využiteľné v regulačných systémoch na riadenie a optimalizáciu požadovaného stavu výroby. Takýto systém na základe údajov zo senzorickej vrstvy je schopný prostredníctvom PLC alebo DCS (Distributed Control System) vykonávať aktivity pre ciele udržanie a adaptáciu systému na požadovaných hodnotách.

Tretou vrstvou navrhovaného architektonického riešenia je edge vrstva. Spracovanie získaných parametrov rôznych veličín je vykonávané na najnižšej vrstve, a to vo forme Edge Computing-u prostredníctvom vyhodnocovacieho zariadenia. EC prvok je implementovaný priamo ku zdroju. Zodpovedá za zber a prvé spracovanie údajov, filtrovanie šumu a prípadný prenos relevantných informácií do centrálného servera/systému. Zároveň je schopný vyhodnocovať vznikajúce situácie a generovať výstrahy a upozornenia na lokálnej úrovni. Tým pomocou EC zariadenia odbúravame problémy s komplikovaným a vzdialeným prenosom, napr. do cloudu alebo vzdialeného servera, s ochranou získaných údajov pri prenose, a so zaťažením siete. Získavame priestor pre rýchlejšie (real-time)

STU

reakcie na základe spracovaných údajov v blízkosti miesta zberu. Pri prípadnom zakomponovaní EAI (napr. neurónových sietí, expertných systémov) prostredníctvom EC zariadenia sme schopní vykonávať nielen analýzy priamo na mieste, ale i adekvátne rozhodnutia na základe dát. Tento fakt umožňuje ešte rýchlejšiu detekciu anomálií alebo rozhodovacie úkony bez straty času, ktoré by sme vkladali do prenosu.

V návrhu obdobného riešenia je možné zakomponovať i návrh databázy pre archiváciu získaných údajov. V našom navrhovanom systéme využívame priame prepojenie s MQTT serverom a identifikujeme chyby bez ukladania do DB. Cieľom takého prístupu je minimalizovať objem prenášaných údajov na úrovni senzorickej vrstvy. Z tohto dôvodu sa v našom riešení výsledky spracovania ukladajú výhradne vo forme spúšťačích udalostí (triggerov) v rámci MQTT. I v tomto prípade je počas prenosu údajov nevyhnutné zachovanie časovej synchronizácie pre zabezpečenie ich aktuálnosti a konzistencie. Zároveň využitie štandardizovaných protokolov zachováva dostatočnú mieru bezpečnosti a spoľahlivosti pri prenose údajov jednotlivými vrstvami systému i ďalšími subsystémami.

Vizualizačné prostredie Node-RED ponúka vizualizačnú prezentáciu aktivít monitorovaného systému na základe procesných údajov. Uľahčuje interpretáciu údajov získaných zo senzorickej vrstvy vo forme udalostí pre obsluhujúci personál. V prípade dashboard-ov, HMI panelov alebo ovládacích terminálov má operátor možnosť priameho ovládania alebo zobrazenia aktivít výrobného systému dotykovo. Výberom konkrétneho zariadenia s výstrahou je možné, aby si obsluhujúci personál detailne zobrazil informácie o alarme, z akého miesta pochádzajú, z akého merania bol alarm vygenerovaný a kde nastala chyba. Popríklad získať historický záznam upozornení, na základe ktorého je schopný stanoviť dlhodobý trend, plus plán údržby. Táto forma vizualizácie prostredníctvom Node-RED umožňuje prehľadnú a konštruktívnu interpretáciu výrobných celkov bez potreby vývoja zložitých systémov.

Aplikácia prvkov využívaných v návrhu vychádza z princípov konceptu Industry 4.0, kde nevyhnutnou úlohou je zníženie záťaže centrálnej infraštruktúry a čiastočné presmerovanie rozhodovacích aktivít do nižších vrstiev. Zároveň s tendenciou nárastu objemu získaných výrobných údajov, je nutné zakomponovanie analytických nástrojov pre účelnú a aktuálnu identifikáciu prevádzkových stavov. Preto implementácia senzorickej vrstvy a prepojenie s edge zariadením umožňuje zvýšenie efektivity výroby, spoľahlivosti celého výrobného procesu a okamžitých reakcií na lokálne výstrahy. A to bez potreby zasahovať do centrálneho rozhodovacieho systému. Integrácia uvedených prvkov posilňuje digitálnu infraštruktúru podniku a iniciuje prediktívne údržbové zásahy. Za dostatočnej kontroly a zabezpečenia prístupových mechanizmov je navrhovaný systém chránený pred nedovoleným prístupom.

4 IMPLEMENTÁCIA A TESTOVANIE NAVRHOVANÉHO RIEŠENIA V LABORATÓRNOM PROSTREDÍ

Systém pre identifikáciu parametrov a predbežnú diagnostiku priemyselného pracoviska na základe údajov z doplnkových senzorov (doplnkový monitorovací systém) je dôležitou súčasťou v prípade absencie základných/rozširujúcich údajov. Prostredníctvom vytvorenej senzorickej vrstvy sme schopní získať komplexnejší obraz o stave daného pracoviska. Dôležitou súčasťou monitorovania výrobného pracoviska je zber dát a ich vyhodnotenie. Každá časť výrobného systému alebo zariadenia nám poskytuje priestor na monitorovanie, prehľad a prípadné detegovanie abnormalít alebo anomálií v bežnom chode výroby.

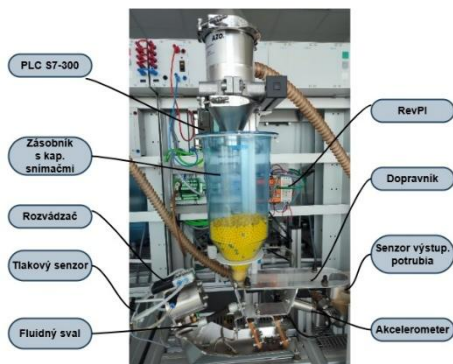
Prvou časťou práce je návrh senzorickej vrstvy pre komplexný obraz o fyzickom zariadení. Pre každý stroj, ktorý máme v úmysle monitorovať, je nevyhnutné navrhnuť samostatnú schému vrstvenej architektúry pre zber dát. Navrhovaný systém zohľadňuje aktuálny stav zariadenia, rozpoznáva nezvyčajné správanie a abnormality v toku zaznamenaných údajov. Pomocou doplnkových senzorov (senzorická vrstva) sme schopní prostredníctvom RevPi (prvok technológie EC) získať údaje, čo najbližšie k zdroju, čo nám znižuje čas potrebný na presun údajov do úložiska, ich spracovanie a analýzu.

Pre účely nulte fázy – senzorické rozloženie prvkov (tvorba senzorickej vrstvy) - bola použitá vybaľovacia stanica a recyklačná stanica, ktorej súčasťou je robotické rameno. Pre účely prvej, druhej a tretej fázy – infraštruktúry pre senzorickú vrstvu a implementáciu základných komponentov pre inteligentné vyhodnocovanie dát z prostredia výrobnéj linky prostredníctvom EC – boli použité dve stanice pre dávkovanie sypkých materiálov s vibračným dopravníkom a s váhou.

4.1 Testovanie navrhovaného riešenia v rámci stanice Vibračný dopravník

Momentálne sa monitorovanie v rámci danej stanice zameriava na výšku hladiny zásobníka materiálu (snímanie prítomnosti a objemu materiálu prostredníctvom kapacitných snímačov). Pneumatický dopravník je založený na princípe Venturiho trubice s filtrom na filtrovanie prachu z prepravovaného granulátu. Nachádza sa tam snímač na výstupe dopravníka a dva aktívne prvky – vzduchové regulačné ventily. Tie sa využívajú pre sledovanie pohybu fluidných svalov - Fluidic Muscle od Festa a pre presun materiálu na nasledujúcu stanicu. Aktívne prvky sú ovládané prostredníctvom príslušných PLC. A keďže nie sú k dispozícii informácie o stave kľúčových elementov pre PdM, získavame priestor na tvorbu doplnkového monitorovania prostredníctvom aditívnych senzorických prvkov.

Zvolili sme tri doplnkové snímače za účelom jednoduchého testovania. Jedná sa o snímač tlaku pre monitorovanie stavu vzduchu v systéme a senzor pre snímanie vibrácií dopravníka, ktorého súčasťou je teplotný snímač na monitorovanie teploty prostredia. Pre potreby monitorovania stavu vibračného dopravníka sme konkrétne zvolili tlakový senzor SPTE-P10R-S4-V-2.5K od spoločnosti Festo. Zvolený senzor má tlakový rozsah od 0-1 MPa, čo je vhodný rozsah pre naše účely, pretože tlak v pneumatickej sústave je okolo 0,6 MPa a my v tomto prípade vieme pokryť prípadné výkyvy. Senzor spĺňa aj požiadavku vhodného pripojenia k RevPi, kde sa vyžaduje analógový vstup pre priame napojenie k modulu. Presnosť merania daného snímača je výrobcom stanovená na $\pm 3\%$, čo je primeraná hodnota pre naše potreby. Na meranie vibrácií sme použili akcelerometer, konkrétne RS-WZ3/WZ1-*-1. Zvolený snímač je priemyselný snímač založený na technológii MEMS. Jeho technické parametre (presnosť rýchlostí vibrácií $\pm 1,5\%$ z rozsahu (@1 kHz, 10 mm/s), frekvenčný rozsah (10 Hz-1600 Hz) zodpovedajú požiadavkám navrhovaného riešenia. Súčasťou snímača pre monitorovanie vibrácií je snímač teploty, ktorým pokryjeme monitorovanie teploty prostredia v okolí vibračného dopravníka. Vizualný popis pracoviska s umiestnením senzorických prvkov je znázornený na Obrázku 8.



Obrázok 8 Popis pracoviska FM dopravník

Schopnosť detekcie chýb v akomkoľvek systéme (v našom prípade v pneumatickom systéme pracovnej stanice „Vibračný dopravník“ sme schopní získať na základe niekoľkých ukazovateľov. Prvým krokom je analýza bežného chodu testovaného systému. Na základe, ktorého získame referenčný obraz o štandardnom správaní sa prvkov v systéme vrátane identifikácie ustálených hodnôt a obvyklých prechodových dejov. Následným krokom je simulácia alebo testovanie anomálneho/abnormálneho stavu, kde na základe porovnania s bežným stavom, vieme identifikovať odchýlky a chyby pri vzniknutom úniku vzduchu alebo porušení integrity pneumatického potrubia.

Na základe porovnania štandardných a simulovaných priebehov, sme pristúpili k návrhu algoritmov pre detekciu porúch. Z testovaných situácií sme prišli k záveru, že je nutné

algoritmy rozdeliť na dve samostatné oblasti. Algoritmus na identifikáciu netesnosti pneumatického svalu a algoritmus na odhalenie poruchy rozvádzača.

V prípade návrhu algoritmu pre detekciu netesnosti pneumatického svalu vychádzame z poznatku, že fluidný sval pracuje v pravidelných cykloch a tlak vzduchu sa v priebehu prevádzky zariadenia prostredníctvom prepínania rozvádzača ustáli na rovnakých hodnotách. Ak daný stav nenastane a hodnoty, na ktorých sa tlak stabilizuje sú rozdielne, sme nútení na túto situáciu prihliadať ako na poruchu alebo chybu v systéme, ktorá evokuje únik vzduchu. Navrhovaný algoritmus je nastavený tak, že porovnávame hodnoty tlaku, ktoré sa stabilizujú počas prvej fázy cyklu dopravníka s hodnotami tlaku, ktoré sa stabilizujú v nasledujúcej fáze cyklu dopravníka. Tolerančnú hranicu pri meraní hodnôt sme nastavili na 0,01 MPa. Pokiaľ sú hodnoty v rámci stanovenej tolerancie, cyklus prebehne bez chýb a systém pokračuje v štandardnej prevádzke. V prípade, ak vyhodnotenie troch po sebe nasledujúcich kontrol cyklu vyústi do indikácie poruchového stavu, trigger na tlakovom potrubí je reprezentovaný hodnotou TRUE a tá sa uloží do MQTT témy.

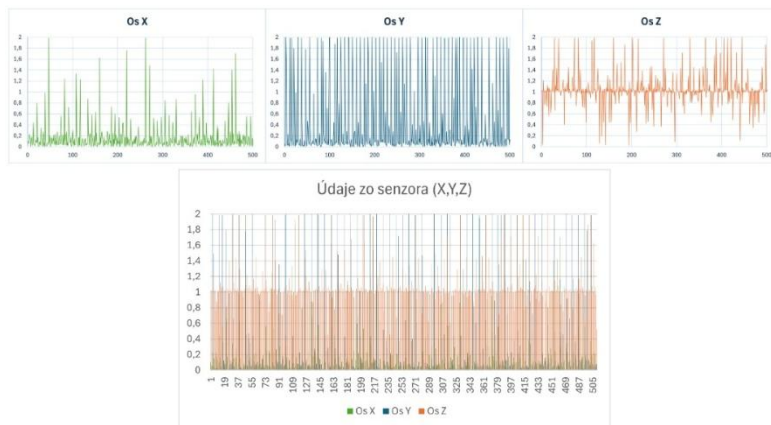
V druhom prípade – pri návrhu algoritmu na detekciu poruchy rozvádzača vychádzame z poznatku, že správne fungujúci rozvádzač pri zapnutí tlak zvýši na maximálnu bežnú hodnotu a pri vypnutí poklesne na minimálnu bežnú hodnotu. Funguje v pravidelných cykloch. Navrhovaný algoritmus je koncipovaný pre sledovanie minimálnej a maximálnej hodnoty tlaku počas prevádzkového cyklu a vyhodnocuje, či nastáva odchýlenie od nominálnych hodnôt. V prípade, ak zaznamenané hodnoty korešpondujú s vymedzenou toleranciou, cyklus je považovaný za bezporuchový a výrobný systém pokračuje v štandardnej prevádzke. V prípade, ak odchýlky prekročia stanovené tolerančné parametre a to po troch po sebe nasledujúcich kontrolách cyklu, a systém vyústi do indikácie poruchového stavu, vygeneruje sa upozornenie (trigger) signalizujúce poruchu na rozvádzači pracovnej stanice.

Do overenia navrhovaného riešenia sme v uvádzanej pracovnej stanici zaradili i návrh AI a to neurónovej siete (NN). V tomto prípade ju môžeme označiť ako Edge AI, nakoľko v návrhu riešenia je príprava jej realizácie v rámci EC zariadenia, ktoré je umiestnené na hrane siete. Konkrétne sme využili Multilayer perceptron neural network/Viacvrstváva perceptrónová neurónová sieť (MLP). Daná NN je umelá neurónová sieť s doprednou architektúrou, ktorá je trénovaná pomocou algoritmu spätného šírenia chýb.

Zozbierané údaje z priebehu prevádzky vibračného dopravníka prostredníctvom zariadenia RevPi boli spracované a prešli procesmi kontroly, čistenia, filtrácie a uloženia do formátu kompatibilného pre softvér Matlab (programovacia a numerická platforma od Mathworks) (MATWORKS). Použitý softvér a konkrétne jeho toolbox/nástroj pre neurónové siete nám poskytol prostredie na analýzu údajov a identifikáciu hodnôt pre požadovanú toleranciu.

STU

Pre účely sledovania vplyvu fluidných svalov na pohyb dopravníka sme zakomponovali na vibračný dopravník akcelerometer, ktorý slúži na zaznamenávanie jeho vibračného pohybu. Monitorovanie je vykonávané v troch priestorových osiach – X, Y a Z (Obrázok 9).



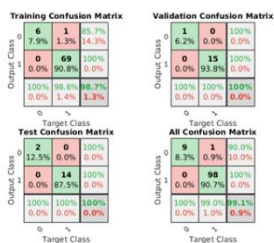
Obrázok 9 Údaje z akcelerometra v troch rozmeroch X,Y,Z

Vzhľadom na miesto, kde sa akcelerometer na konštrukcii dopravníka nachádza, najrelevantnejšie sú výstupy z osi Y (Obrázok 10). Tá zachytáva kľúčové pozdĺžne pohyby počas jeho prevádzky. Synchronizácia nadobudnutých údajov prebieha v súlade s prebiehajúcimi pracovnými cyklami dopravníka. Získané údaje sú ukladané do databázy za účelom budúcich analýz a spracovaní.

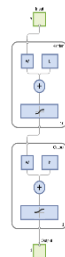


Obrázok 10 Dátové vzory pre vyhodnotenie NN

Tvorba a testovanie NN v prostredí Matlab potvrdilo, že použitie funkcie TRAINSCG bolo zvolené správne a poskytlo pre požadované riešenie adekvátne a spoľahlivé výsledky (Obrázok 11,12). Výsledný model je možné z prostredia Matlab exportovať vo formáte C++ a následne integrovať do zariadenia RevPi. Výstup z NN je uchovaný v MQTT téme pre potreby dostupnosti nadradeným alebo rozhodovací systémom. Pre vizuálnu interpretáciu je možné využiť notifikačné zvýraznenie neštandardnej udalosti alebo farebné upozornenie indikácie anomálneho stavu. Dohľadový systém s využitím AI (konkrétne neurónovej siete) získava prvky priemyselnej automatizácie pre efektívne monitorovanie a včasnú detekciu porúch v rámci výrobného systému.



Obrázok 12 Kontingenčná matica trénovanej NN



Obrázok 11 Architektúra trénovanej NN

4.2 Testovanie navrhovaného riešenia v rámci stanice Dávkovač s váhou

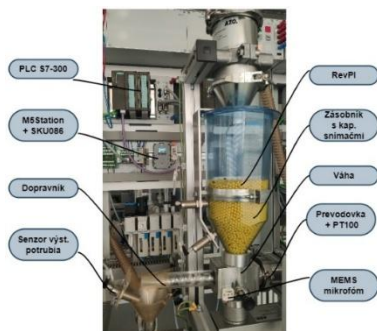
Druhou testovacou stanicou v implementácii doplnkových senzorických prvkov a EC prvku bola stanovená stanica dávkovača s váhou. Stanica je založená na dávkovaní a kontrole granulátu prostredníctvom časového riadenia alebo vážením s následných transportom na operáciu plnenia. Snímanie prítomnosti a objemu materiálu je zabezpečené prostredníctvom kapacitných snímačov. Materiál je dávkovaný pomocou extrúdera, ktorý je poháňaný DC servomotorom, aby bolo možné riadiť systém v otvorenej i uzatvorenej slučke.

Momentálne je monitorovanie zamerané na monitorovanie hladiny a objemu materiálu. Dva snímače sú umiestnené vo vstupnej nádrži a jeden je využívaný pre detekciu plnenia výstupného potrubia. Vyprázdňovanie výstupného potrubia je zabezpečené pomocou stlačeného vzduchu, ktorý je ovládaný v manuálnom alebo automatickom režime. Aktuálne je výhradne využívaný manuálny spôsob ovládania. Riadenie aktívnych prvkov, konkrétne regulačných vzduchových ventilov, je zabezpečené prostredníctvom riadiaceho PLC. I v tomto prípade nie sú k dispozícii informácie o stave kľúčových prvkov pre PdM, a preto i na tejto stanici sa otvára možnosť rozšírenia systému o doplnkové senzorické riešenie pre účely monitorovania.

Zvolili sme tri aditívne senzorické prvky pre rozšírené monitorovanie. Na základe sledovania funkčnosti danej stanice, by sa mala venovať pozornosť elektrickému motoru BG65X2SSI (bezkartáčový jednosmerný (DC) motor s integrovaným enkodérom, schopný

STU

prenášať 4096 signálov na reguláciu otáčok). Motor vykonáva pohybovú činnosť, ktorá by mala byť predmetom monitorovania vzhľadom na predikciu stavu. Preto sme sa, v jeho prípade, zamerali na sledovanie niekoľkých parametrov nevyhnutných pre štandardnú funkčnosť. Pre monitorovanie teploty prevodovky sme zvolili teplotný snímač PT100, ktorý je nákladovo efektívnym prvkom pre jasne definovaný cieľ. Zakomponovali sme ho na puzdro motora, nakoľko má dostatočnú kontaktnú plochu pre snímanie. Pre monitorovanie prúdového zaťaženia motora sme zvolili merací prístroj SKU086. Jeho využitie je kompatibilné so sledovaným zámerom – získavanie údajov o prechádzajúcom prúde motorom a využitie aktuálnych hodnôt pre detekciu preťaženia. V prípade monitorovania vibrácií sme využili digitálny MEMS mikrofón na báze kremíka, nakoľko snímanie vibrácií v prevodovom mechanizme stanice „Váha“ sa líši od stanice „Vibračný dopravník“. V tomto prípade sme sa zamerali na nepriame sledovanie zmien na základe zvukových prejavov. Je využiteľný pre sledovanie hlučnosti zariadení, ktorého výsledkom sú mechanické vibrácie. Pre monitorovanie tlaku vzduchu pri prenose granulátu na vstupe a výstupe z pracovnej stanice sme zvolili tlakový snímač SPTE-P10R-S4-V-2.5K od spoločnosti Festo. Vizualný popis pracoviska s umiestnením senzorických prvkov je znázornený na Obrázku 13.



Obrázok 13 Popis pracoviska Dávkovač s váhou

Pri tejto testovanej stanici nastal rozdiel v pripojení senzorických prvkov do vyhodnocovacích zariadení. Pre dva s uvedených aditívnych senzorov (teplota, tlak) sme zvolili priame prepojenie so zariadením RevPi a pre dva (vibrácie, prúd) so stanicou M5Station. Senzor tlaku vzduchu a teplotný senzor sú pripojené k RevPi prostredníctvom analógových vstupov. MEMS mikrofón a merací prístroj prúdu sme pripojili k operátorskej stanici M5Station prostredníctvom digitálnych vstupov. Táto stanica vykonáva zber údajov prostredníctvom nastavených cyklov, umožňuje predspracovanie údajov a následne je možné ju využiť i na identifikáciu porúch. Komunikácia medzi RevPi a M5Station prebieha bezdrôtovo.

I v tomto prípade je prvým krokom pre vyhodnocovanie prevádzky systému - analýza štandardného priebehu. Na základe nej získame vzorový obraz bežného správania sa

STU

základných prvkov, vrátane stabilných hodnôt a dynamických zmien. Druhým krokom je testovanie abnormálneho stavu alebo simulácia chyby na zariadení, na základe ktorého sme schopní určiť odchýlky v porovnaní s bežným priebehom. Prostredníctvom porovnania oboch stavov získame schopnosť identifikovať poruchy systému a detegovať anomálne správanie sa testovanej stanice alebo zariadenia počas bežnej výroby prevádzky.

Po inicializácii systému, ktorá zahŕňa kontrolu všetkých funkčných prvkov vstupujúcich do systému, vrátane diagnostiky senzorických prvkov, pripojenia riadiacich a dodatočných zariadení, prípadne pripojenia MQTT brokerov pre prenos údajov, nastáva aktivácia dávkovacieho mechanizmu.

Materiál sa pomocou stlačeného vzduchu presúva prostredníctvom potrubia zo zásobníka predchádzajúcej stanice do oddeľovača, ktorý smeruje sypký materiál do zásobníka testovanej stanice. Prostredníctvom kapacitných snímačov získavame informácie o prítomnosti materiálu – v hornej časti, ktorý udáva hodnoty plnosti zásobníka; v dolnej časti, ktorý udáva hodnoty pre minimálny alebo prázdny stav zásobníka; v lieviku, ktorý udáva hodnoty plného stavu lievika pre ďalší presun materiálu. Počas prevádzky pracovnej stanice dochádza k monitorovaniu priebehu prostredníctvom určených senzorov tlaku (4-6 bar), teploty (20-30 °C), vibrácií (v pravidelnom rozsahu), prúdu (bez výkyvov) a kontrola nameraných hodnôt so stanovenými medzami. Ukončením štandardného správania sa cyklu môžeme považovať vyprázdnenie výstupného potrubia, kde materiál prechádza do nasledujúcej stanice a kontrola tlaku kapacitným snímačom na výstupe. Namerané veličiny sprostredkujúcich senzorických prvkov sú v norme, dávkovací cyklus prebehne v štandardnom režime a bez prerušení.

V rámci neštandardných alebo simulovaných situácií v rámci testovanej stanice, môže dôjsť k niekoľkým univerzálnym scenárom – napr. únik vzduchu v rámci pneumatického potrubia, porucha výpustného potrubia, prehriatie motora, vibračná nestabilita.

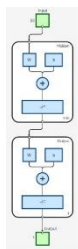
Na testovanej stanici „Dávkovač s váhou“ sme sa zamerali na monitorovanie zvukových vibrácií na prevodovke. V rámci tejto časti práce ukážka demonštruje zakomponovanie Edge AI (konkrétne neurónovej siete) pri trénoch na získanej množine údajov a využitie RevPi ako prídavného prvku pre dynamický zber, spracovanie údajov a rozhodovanie na základe výstupov z NN. Využívame údaje z MEMS mikrofónu, kde sme schopní určiť tzv. vibračnú nestabilitu v systéme. Snímač sme umiestnili na prevodový mechanizmus testovanej stanice „Dávkovač s váhou“.

V prvom rade pracujeme s množinou údajov, ktorá demonštruje štandardný (bezchybný) priebeh. Daný set údajov slúži na vytvorenie vzorového dátového toku, ktorý reprezentuje normálny a korektný stav. Na základe tejto vzorky je NN trébovaná – učí sa rozpoznávať štruktúrne a frekvenčné vlastnosti dátového toku. V druhom kroku poskytneme množinu údajov, ktorá demonštruje neštandardný priebeh. Záznam v rámci danej testovacej množiny obsahuje rôzne odchýlky a chyby od normálneho priebehu. NN sieť na základe porovnania

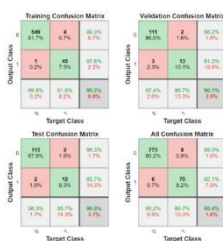
korektného dátového toku a chybového dátového toku indikuje anomálie/poruchy v zachytenom priebehu.

Prvou časťou využitia získaných údajov (na začiatku vo forme zvukového záznamu z mikrofónu) je jeho rozdelenie na menšie segmenty/časti pre lepšiu prehľadnosť zvukového signálu a optimálne nastavenie parametrov učenia. Zvukový záznam prostredníctvom funkcie audioread importujeme do Matlab skriptu. Zadáme požadovanú dĺžku jedného segmentu (v našom prípade 50 ms), ktorý na základe vzorkovacej frekvencie určí počet vzoriek. Prostredníctvom cyklu for a príkazov nachádzajúcich sa v jeho tele, sa dátový signál rozdelí na rovnomerné segmenty. Priebehy jednotlivých segmentov vykresľujeme prostredníctvom spektrogramov. Pre lepšiu identifikáciu, každý vykreslený segment má vlastné označenie. Následne každý segment uložíme do výslednej matice, kde každý jeden riadok predstavuje jeden 50 ms časový úsek zvukového záznamu. Stĺpce predstavujú nadobudnuté hodnoty v priebehu stanoveného časového úseku. Maticu uložíme do kompatibilného súboru pre ďalšie spracovanie, vhodného ako vstup do neurónovej siete. V našom prípade .xls. Do vzniknutého súboru ako posledný stĺpec určíme stav, v ktorom sa jednotlivé segmenty nachádzajú – v prípade štandardného bezchybného priebehu (stav OK - 0), v prípade neštandardného chybného priebehu (stav NOK - 1). Tento stav nám pomôže s jednoznačnou klasifikáciou každého priebehu a zjednodušiť tréningovanie NN.

Na základe stanovených požiadaviek, sme porovnávali jednotlivé segmenty zvukového signálu prostredníctvom extrahovaných numerických údajov zo spektrogramov. Extrahované údaje sú usporiadané do matice ako vstup pre NN. Na klasifikáciu segmentov sme zvolili neurónovú sieť typu Pattern Recognition Multilayer Perceptron (MLP). NN obsahuje 50 vstupných neurónov (50 ms zvukového signálu) s použitou skrytou vrstvou o veľkosti 100 neurónov. Model bol tréňovaný na vzorke cca 1000 dátových vzoriek s rozdelením – 70% tréningová množina, 15% validačná množina a 15% testovacia množina. Výstupom klasifikácie bol pravdepodobnostný odhad zaradenia príslušného segmentu do kategórie OK a NOK (Obrázok 14).



Obrázok 15
Architektúra trénovanej NN



Obrázok 14 Kontingenčná
matica trénovanej NN

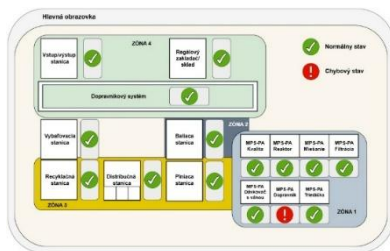
Priebeh tvorby a testovania NN v prostredí Matlab potvrdili, že výber optimalizačného algoritmu trérovacej funkcie trainscg bol zvolený správne, deklaroval stabilné a spoľahlivé výsledky, ktoré zodpovedali navrhovanému riešeniu (Obrázok 15). Výsledný model je možné exportovať do formátu C++, ktorý je kompatibilný pre použitie a integráciu do zariadenia RevPi. V návrhu je výstup z NN zverejnený prostredníctvom MQTT kanála, čo umožňuje ďalšie použitie v rozhodovacích/nadradených systémoch. V rámci vizuálneho zobrazenia výsledku neštandardného priebehu systému, je možné využiť farebnú indikáciu chybového stavu priamo z MQTT brokeru. Systém technickej diagnostiky s podporou umelej inteligencie umožňuje efektívne monitorovanie prevádzky a včasnú klasifikáciu anomálnych prejavov, ktoré nie je možné bežnými metódami zachytiť.

Prostredníctvom testovania sme overili funkčnosť systému s pomocou zariadenia RevPi, avšak s možnosťou implementácie nových prístupov k spracovaniu rozšírených údajov z výrobného procesu. Inštalácia aditívnych senzorov pre senzorickú vrstvu s implementáciou EC má výrazný vplyv na získanie širšieho spektra údajov v reálnom časovom úseku. Použitie triggerov v dohľadových systémoch zvyšuje automatizáciu, efektívnosť a rýchlosť procesov, pretože spoľahlivo a presne zachytáva udalosti s okamžitými výstrahami.

4.3 Návrh používateľského rozhrania

Do systému pre monitorovanie a dohľad nad stavom zariadení je vhodné zakomponovať i vizuálnu interpretáciu údajov. Najčastejším spôsobom využitia pre grafické znázornenie veličín, priebehov a prípadných upozornení je dashboard. Dashboard vo výrobnom kontexte je grafickým rozhraním, ktorý zobrazuje kľúčové informácie o stave zariadení prostredníctvom grafov, tabuliek, dynamických farieb. Takýmto spôsobom je možné napr. grafické znázornenie monitorovania výkonnosti; sledovanie teploty, tlaku, vlhkosti; detekciu anomálií.

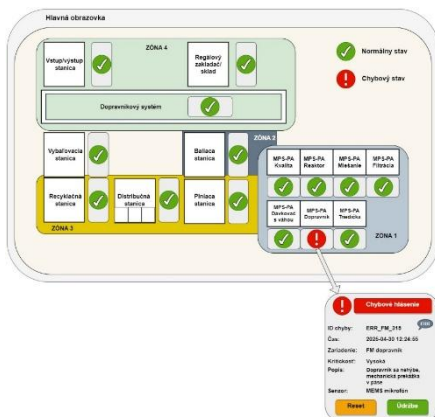
Univerzálny návrh centrálnej obrazovky (Obrázok 16) znázorňuje jednoduché grafické zobrazenie automatizovanej výrobnéj linky Festo AFB Factory. Vstupom pre danú aplikáciu sú hlásenia generované z triggerov, ktoré získavame prostredníctvom MQTT brokeru. Hlásenia sú na obrazovke vizuálne indikované ako farebné upozornenia – zelený kruh s



Obrázok 16 Centrálna obrazovka používateľského rozhrania

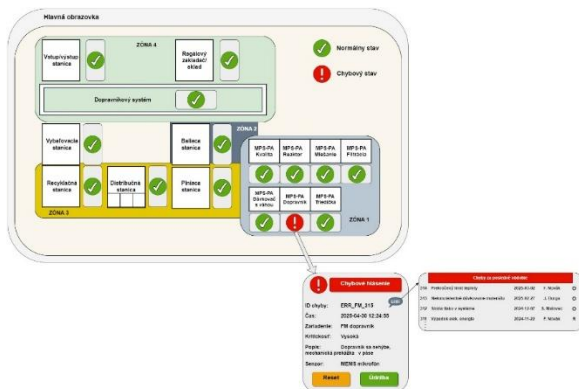
fajkou indikuje zariadenie v normálnom stave a červený kruh s výkričníkom indikuje zariadenie v chybovom stave.

Pre bližšiu špecifikáciu vzniknutého chybového stavu je možné zakomponovať rozkliknutie ikony, kde sa zobrazí okno s detailnými informáciami o druhu, čase, kritickosti, popise chyby, plus druhu snímača, ktorý chybu zachytil (Obrázok 17). Vhodným doplnkom takéhoto okna sú tlačidlá „Reset“ pre resetovanie systému pri nezávažnej (hneď odstrániteľnej) chybe alebo tlačidlo „Údržba“ pre naplánovanie servisného zásahu pri závažnej chybe.



Obrázok 17 Obrazovka s bližšou špecifikáciou chybového hlásenia

Ďalšou vhodnou súčasťou obrazovky je zobrazenie chýb za posledné časové obdobie (Obrázok 18). V danom okne je dôležitý popis, dátum a náprava vzniknutej chyby, poprípadne meno alebo iniciály personálu, ktorý údržbu/výmenu zariadenia (časti zariadenia, náhradného dielu) vykonal a označenie nápravy (O-Oprava/R-Reset). Prostredníctvom uvedených údajov získa obsluhujúci personál bližší prehľad o predchádzajúcich chybách a ich náprave. Pri podobnosti chýb môže byť jednoducho nastolený rovnaký scenár nápravy. Poprípadne pri často sa opakujúcich chybách rovnakého charakteru je vhodné preverenie neúspešnosti nastolených opráv, preverenie využitých náhradných dielov a technik údržby a zvolenie trvalejšieho a spoľahlivejšieho riešenia.



Obrázok 18 Bližšia špecifikácia chýb za posledné obdobie

Na ilustráciu používateľského rozhrania navrhujeme v našom návrhu využiť platformu Node-RED. Daným používateľským rozhraním by sa v tomto prípade nahrádzal HMI panel. Vizualný charakter zobrazovaného zariadenia je možné vložiť do Node-RED prostredníctvom SVG objektov. Dané prostredie funguje na vkladaní a prepájaní dátových tokov prostredníctvom uzlov. Spojením uzlov vzniká logický tok údajov, kde dátová správa prechádza určenými uzlami, postupne sa spracováva a reaguje na základe nastavenej logiky. Na základe uvedeného sme schopní čítať hodnoty zo snímača, posilať parametre do rôznych vizuálnych grafických prvkov, poprípade simulovať reálnu výrobu.

5 ZHODNOTENIE NAVRHNUTÉHO RIEŠENIA

Primárnym zámerom predkladanej dizertačnej práce bolo posunúť monitorovanie a diagnostiku výrobných podnikov na vyššiu úroveň použitím inovatívnych technológií a postupov. V súlade so zmysľaným cieľom boli stanovené čiastkové ciele:

- Rozšírenie spektra monitorovaných parametrov prostredníctvom senzorickej vrstvy.
- Implementácia sekundárneho výpočtového prvku na hrane siete.
- Vypracovanie a overenie praktického rámca pre modernizáciu podnikov.
- Koncept konzistentného základu pre dátovo riadenú prediktívnu údržbu.

V rámci návrhu boli definované hardvérové komponenty senzorickej vrstvy a spôsob ich preporenia prostredníctvom vhodných komunikačných protokolov. Prostredníctvom kľúčových prvkov sme schopní transformácie získaných údajov a systematizácie rôznych prístupov k určovaniu stavu zariadenia. Dané prístupy sú určované na základe charakteru meraných veličín, spôsobu ich spracovania a významu pre výrobný proces. Zároveň s

využitím technológie Edge Computing a neurónových sietí získava monitorovací systém možnosť priameho zberu a vyhodnotenia dát na najnižšej procesnej úrovni. Použitý prístup výrazne redukuje zataženie komunikačnej infraštruktúry, vyžadovaného výkonu na databázový systém a systém PdM. Záverečná práca prezentuje príklady detekcie kritických stavov prostredníctvom technológie EC a neurónových sietí, vrátane praktických ukážok a výstupov z experimentov. Na základe dosiahnutých výstupov je možné skonštatovať, že všetky stanovené ciele dizertačnej práce boli splnené.

V porovnaní s konvenčnými prístupmi monitorovania stavu výrobných zariadení sme posunuli sledovanie a vyhodnocovanie technického stavu strojov smerom k automatizovanému postupu. Zároveň sme pristúpili k dátovo riadenému odhaľovaniu porúch. Tento fakt má za následok včasnú identifikáciu anomálií, zníženie neplánovaných výpadkov výroby a údržbu na základe dát. Z ekonomického hľadiska koncept návrhu prispieva k efektívnemu využitiu výrobných prostriedkov, odstraňuje efekt nadmernej údržby a nežiaducej výmeny dielov. Z environmentálneho hľadiska dochádza k optimalizácii zdrojov – nedochádza v takej miere k plytvaniu energií, materiálov a ľudských zdrojov. Z hľadiska bezpečnosti sa stáva výrobné prostredie bezpečnejším prostredníctvom včasnej detekcie porúch a zamedzeniu neočakávaného výskytu poruchového stavu.

Zásadnú úlohu v navrhovanom koncepte zohráva využitie sekundárneho zberného prvku (EC zariadenia), ktorý poskytuje systému možnosť lokálneho a rýchleho zberu a spracovania údajov. Zároveň s využitím Edge AI na lokálnej úrovni návrh ponúka efektívny nástroj pre analýzy a rozhodovanie v reálnom čase. V spolupráci s výstražnými triggermi dodáva návrh mieru istoty včasnej identifikácie nežiaducich stavov na základe preddefinovaných pravidiel. Navrhovaný systém alebo obdobne zamerané riešenie výrazne zvyšuje celkovú úroveň podniku a cielene ho smeruje k dlhodobej udržateľnosti.

Nevýhodou v rámci navrhovaného riešenia sa môže javiť počiatočná investícia do komplexnejšej modernizácie výroby. Prvotné investície sa týkajú hlavne digitalizácie výrobného celku, zaobstarania a implementácie potrebných zariadení a prvkov, zaškolenia príslušného personálu. Neodmysliteľnou súčasťou investície v rámci implementácie navrhovaného riešenia je i dôkladné nastavenie systémových parametrov, čo z časového hľadiska predstavuje významnú náročnosť.

V súčasnosti nie je vhodné tvrdiť, že navrhované riešenie je možné implementovať do každého podniku. Momentálne je návrh hardvérových komponentov a spôsobov zberu údajov pre monitorovanie procesov, rovnako princípy pre identifikácie porúch, aplikovateľný na iné pracoviská v rámci testovanej výrobnéj linky Festo AFB Factory. Po účelnej modifikácii je možné návrh implementovať do iných systémov v reálnom prostredí. Vyžadovalo by si to však nemalé investície do ľudských a finančných zdrojov. Zároveň je navrhované riešenie využiteľné v iných priemyselných odvetviach, kde si nájdu uplatnenie vyvinuté algoritmy pre generovanie triggerov vo všeobecnosti.

6 KONCEPTUÁLNY RÁMEC METODIKY

Cieľom tejto práce je poskytnúť ucelený postup k monitorovaniu technického stavu zariadení, ktorý prispieva k identifikácii a spracovaniu údajov v reálnom čase, a poskytuje výrobným sféram značné uľahčenie. A preto je nevyhnutné, aby každý výrobný podnik disponoval praktickým rámcom, ktorý je aplikovateľný pri rôznych výrobných systémoch a v rôznych východiskových podmienkach. Tento rámec zároveň poskytuje postupnosť krokov pre rozšírenie a modernizáciu výroby v súlade s princípmi Industry 4.0. Na základe nášho riešenia poskytujeme konceptuálnu metodiku, ktorá je schopná smerovať podnik do zakomponovania takých prvkov, ktoré ho vedú k modernizácii, ale i efektívnemu využitiu všetkých zdrojov (personálnych, materiálnych, organizačných, finančných).

Postupnosť krokov, ktoré je potrebné, aby podnik vykonal pred zavedením dohľadového systému na základe dát je nasledujúca:

1. Analýza problémov zariadení z pohľadu údržby

Cieľom uvedeného kroku je identifikácia a mapovanie problémov výrobných zariadení z hľadiska údržbových požiadaviek. Výstupy z danej analýzy tvoria základ pre kvantifikáciu poruchových trendov a identifikáciu slabých miest komponentov v súlade so strategickým plánom údržby. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Analýza poruchových hlásení** – prebieha detailná analýza záznamov o poruchách a odstávkach zariadení z hľadiska ich výskytu, frekvencie, trvania udalosti, príčiny a dopadov na prevádzku.
- **Identifikácia problémových stavov** – na základe porovnania aktuálnych a historických dát sa identifikujú zariadenia alebo komponenty so zvýšenou frekvenciou poruchových stavov. Výsledkom je zoznam poruchových/kritických zariadení, ktoré si vyžadujú systematické monitorovanie v rámci údržby.
- **Analýza vplyvu na prevádzkyschopnosť výroby** – vyhodnotia sa dopady identifikovaných problémov na prevádzkyschopnosť, produktivitu, kvalitu a bezpečnosť výroby. Prihliada sa na dopad z hľadiska časových strát, ekonomických nákladov a materiálového toku.
- **Vytvorenie mapy rizík** – na základe výstupov z predošlých krokov sa vypracuje kvantitatívna a vizuálna analýza rizikovosti zariadení a komponentov z hľadiska frekvencie odstávok a náročnosti údržby.

2. Špecifikácia potrieb pre nasadenie systému

Cieľom uvedeného kroku je identifikácia potrieb podniku na monitorovací systém so zameraním na údržbu na základe údajov. Výstupy z tohto kroku zabezpečia efektívne

naplánovanie, návrh a implementáciu systému na základe stanovených potrieb. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Definovanie potrieb monitorovacieho systému** – definuje sa účel implementácie systému (napr. zvýšenie efektivity výroby, detekcia anomálií, zníženie výrobných nákladov, analýza trendov a podpora rozhodovania), spolu s požiadavkami na výstupy z hľadiska výroby, ale i manažmentu podniku.

3. Ekonomicko-finančná analýza

Cieľom uvedeného kroku je vyhodnotiť finančnú realizovateľnosť a prínosy implementácie systému, vrátane analýzy nákladov, zhodnotenia úspor a rizík s cieľom poskytnúť jasný prehľad o ekonomickej výhodnosti navrhovaného riešenia s prihliadnutím na zvolenú integračnú stratégiu a stanovené ciele monitorovania prevádzky.

- **Analýza nákladov na súčasnú údržbu** – vykoná sa detailná a kompletná analýza nákladov na údržbu, vrátane nákladov na materiál, pracovnú silu, externé služby, finančné straty vyplývajúce z odstávok prevádzky.
- **Analýza nákladov na implementáciu systému** – realizuje sa analýza investičných nákladov na kompletnú implementáciu navrhovaného systému, zahŕňajúca investície do hardvéru, softvéru, integrácie a prevádzky systému.
- **Prognóza úspor a prínosov** – vyčíslí sa očakávané zníženie nákladov na opravy, minimalizáciu odstávok a predĺženie životnosti zariadení a celková kvantifikácia úspor. Súčasťou daného kroku je stanovenie efektívnosti využitých prostriedkov a ich ekonomická návratnosť.
- **Vyhodnotenie finančných rizík** – identifikujú sa potenciálne riziká a neistoty súvisiace s implementáciou a prevádzkou systému. Súčasťou daného bodu je vhodné identifikovať a vyhodnotiť nepredvídané náklady v rámci dodatočných zmien alebo úprav systému.

4. Špecifikácia požiadaviek pre nasadenie systému

Cieľom uvedeného kroku je definovanie požiadaviek podniku na monitorovací systém na základe výstupov z predošlých bodov. Výstupy z tohto kroku zabezpečia efektívne pokrytie údržbových požiadaviek a optimalizáciu plánovania zásahov. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Definovanie funkčných požiadaviek** – špecifikujú sa požadované funkcionality monitorovacieho systému na podporu údržby založenej na údajoch. Funkčné požiadavky definujú funkcie systému (operácie, procesy, služby, ktoré systém musí zabezpečiť), správanie systému (očakávané reakcie na podnety, podmienky) a výstupy systému (formát, obsah, frekvencia).

- **Definovanie nefunkčných požiadaviek** – zdefinujú sa požiadavky na spoľahlivosť, dostupnosť, škálovateľnosť, bezpečnosť a užívateľskú prívetivosť.
- **Analýza dátových požiadaviek** – určujú sa požiadavky na typ, kvalitu, spracovanie a archiváciu údajov nevyhnutných pre efektívnu prevádzku systému.
- **Zabezpečenie správy požiadaviek** – vytvorí sa prehľadný, ucelený a aktualizovaný súbor požiadaviek v súlade s prevádzkovými potrebami podniku, ktorý bude slúžiť ako podklad pre ďalšie fázy návrhu a implementácie.

5. Analýza súčasného stavu existujúcej infraštruktúry

Cieľom uvedeného kroku je vykonať komplexnú a detailnú analýzu existujúceho stavu technickej a organizačnej štruktúry s cieľom identifikovať východiskové podmienky pre implementáciu systému monitorovania a zberu dát. Daný prehľad tvorí základ pre návrh funkčne a technologicky realizovateľného riešenia. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Identifikácia výrobných zariadení** – zrealizuje sa systematická identifikácia a evidencia všetkých výrobných zariadení zapojených do výrobného procesu, vrátane vyhodnotenia ich technického stavu a schopnosti generovať alebo sprístupňovať relevantné prevádzkové údaje.
- **Identifikácia existujúcich informačných systémov** – vykoná sa analýza súčasných informačných a riadiacich systémov využívaných v rámci výrobného procesu (napr. MES, SCADA, ERP, CRP), vrátane posúdenia ich funkčného stavu.
- **Analýza komunikačnej infraštruktúry** – preskúma sa architektúra prepojenia medzi jednotlivými systémami, vrátane analýzy použitých komunikačných protokolov, prenosových technológií a sieťovej infraštruktúry.
- **Zmapovanie prepojení na podnikové systémy** – vykoná sa analýza úrovne integrácie technologických zariadení s nadradenými podnikovými informačnými systémami, so zameraním na dátové toky, rozhrania, kompatibilitu integračných mechanizmov.
- **Analýza medziodborovej dátovej výmeny** – identifikujú sa interné jednotky, ktoré aktuálne využívajú výrobné údaje, pričom sa zohľadní ich požiadavka o rozšírený rozsah a detailnosť získavaných údajov na podporu rozhodovacích, analytických a optimalizačných procesov.
- **Zhodnotenie pripravenosti podniku** – vyhodnotí sa priestorová, organizačná, technická a ekonomická pripravenosť podniku na úspešnú implementáciu systému.

6. Špecifikácia zariadení a parametrov monitorovania

Cieľom uvedeného kroku je definovať zariadenia, ktoré podnik plánuje integrovať do dohľadového systému. Daný prehľad tvorí základ pre určenie komplexnej typológie výrobných zariadení a stanovenie relevantných procesných a technických parametrov určených na monitorovanie. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Identifikácia dostupnosti zariadení** - definuje sa spôsob integrácie existujúcich zariadení z hľadiska ich dostupnosti, vhodnosti a technickej pripravenosti pre účely implementácie monitorovacieho systému.
- **Identifikácia kľúčových zariadení** – vykoná sa identifikácia kľúčových zariadení a technologických uzlov výrobného procesu, ktorých prevádzka má zásadný vplyv na kontinuitu a bezpečnosť výroby.
- **Identifikácia kritických zariadení** – realizuje sa identifikácia kritických zariadení, ktorých zlyhanie má priamy dopad na plynulosť, bezpečnosť a kvalitu výroby.
- **Identifikácia parametrov** – identifikujú sa konkrétne procesné a technické parametre, ktoré sú predmetom zberu údajov, a sú relevantné pre hodnotenie stavu zariadení a priebehu výroby.
 - a) Identifikujú sa parametre, ktoré sú predmetom zberu, ale zostávajú nevyužívané v dôsledku absencie analytických, systémových a spracovateľských nástrojov.
 - b) Identifikujú sa parametre, ktoré sú predmetom zberu, ale nie je zabezpečené systematické ukladanie a archivácia v dátovom úložisku.
 - c) Identifikujú sa parametre, ktoré nie sú predmetom zberu, no s vysokou prevádzkovou alebo analytickou relevanciou.
 - d) Identifikujú sa parametre, ktoré nie sú predmetom zberu, ale poskytujú doplnkové údaje prostredia relevantné pre interpretáciu výrobných dát.
- **Identifikácia existujúceho úložiska** – vykoná sa identifikácia a posúdenie aktuálneho spôsobu realizácie databázového úložiska pre zber a archiváciu údajov z výrobných zariadení.

7. Návrh architektúry a systému pre zber, spracovanie a archiváciu údajov

Cieľom uvedeného kroku je definovať technický, architektonický a funkčný charakter systému monitorovania a zberu dát vychádzajúci z predchádzajúcich analýz. Návrh zohľadňuje požiadavky na integráciu s existujúcou infraštruktúrou a zabezpečuje výkonnosť, škálovateľnosť a udržiateľnosť. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Výber architektúry systému** – určí sa koncepcia systému zberu dát (napr. centralizovaná, decentralizovaná alebo hybridná), pričom sa prihliada na

topológiu výrobných zariadení, štruktúru komunikácie a požiadavky na výkon, dostupnosť a rozšíriteľnosť.

- **Špecifikácia hardvérových komponentov** – identifikujú sa potrebné hardvérové komponenty na zber a prenos údajov (senzory, PLC, Edge jednotky, I/O moduly, komunikačné brány, priemyselné PC), vrátane ich technických parametrov, umiestnenia a kompatibility s existujúcimi zariadeniami.
- **Návrh dátovej vrstvy a úložisk** – definujú sa spôsoby získavania, uchovávanía a spracovania údajov vrátane výberu vhodných databázových riešení (napr. SQL, relačné databázy, TSDB) a to s ohľadom na požiadavky pre rýchlosť prístupov, objem dát a možnosti škálovania. Určia sa integračné rozhrania a metódy (napr. OPC UA, MQTT, REST API) na komunikáciu s ostatnými systémami.
- **Návrh softvérovej vrstvy** – navrhne sa aplikačná logika systému vrátane výberu rozhrania na vizualizáciu údajov, správu reportov a analytické funkcie (napr. SCADA, MES, BI nástroje, dashboard).
- **Návrh bezpečnostnej politiky** – navrhne sa spôsob zabezpečenia komunikácie a prístupov k systému, vrátane autentifikácie, autorizácie, šifrovania, a logovania prístupov.

8. Implementácia systému monitorovania a zberu údajov

Cieľom uvedeného kroku je zabezpečiť efektívne a spoľahlivé nasadenie navrhnutého systému do reálneho výrobného prostredia. Základným krokom implementácie je prechod z teoretického návrhu k praktickej implementácii, pričom sa zohľadňujú technické, organizačné a prevádzkové aspekty. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Príprava inštaláčného plánu** – vypracuje sa detailný inštaláčny a implementáčny plán, ktorý definuje časový harmonogram, sled činností, nutné zdroje a spôsob koordinácie medzi jednotlivými divíziami podniku a zohľadňuje technické normy a legislatívne požiadavky.
- **Inštalácia hardvérových komponentov** – realizuje sa fyzické nasadenie senzorických prvkov, riadiacich a zberových jednotiek, komunikačných zariadení a naviazaných jednotiek v súlade s navrhovanou koncepciou a so špecifikáciou výrobných pracovísk.
- **Nastavenie a konfigurácia systému** – vykoná sa konfigurácia softvérových komponentov, vrátane inicializácie aplikačnej vrstvy, vizualizačných nástrojov, integračných rozhraní a bezpečnostných politik.
- **Testovanie systému a verifikácia funkčnosti** – realizuje sa komplexné testovanie systému – testovanie zberu údajov, spracovania údajov, vizualizácie, exportu do nadradených systémov. Overuje sa konzistentnosť a rýchlosť zberu, spoľahlivosť ako aj funkčnosť bezpečnostných prvkov.

- **Zaškolenie personálu** – zabezpečí sa odborné zaškolenie personálu, ktorý bude systém obsluhovať, monitorovať a manipulovať s údajmi, vrátane technických a praktických aspektov práce so systémom.
- **Pilotná prevádzka systému** – systém sa uvedie do testovacej prevádzky na vybranom pracovnom úseku alebo zariadení s cieľom optimalizovať nastavenia a eliminovať nedostatky pred nasadením do plnej prevádzky. Vyhodnotí sa úspešnosť pilotnej prevádzky na základe určených požiadaviek – napr. skrátenie reakčného času, kvalitný zber údajov, dostatočná detekcia anomálií.
- **Nasadenie do plnej prevádzky** – systém sa po otestovaní a vyhodnotení systému v pilotnej prevádzke nasadí do plnej prevádzky v určenej časti výroby alebo v celom podniku. Implementácia sa ukončí s odovzdaním dokumentácie, potvrdením funkčnosti a určením technickej a organizačnej správy systému.

Po implementácii systému do plnej prevádzky je vhodné zastrešiť systém v ďalšom kroku, a to:

9. Prevádzkové sledovanie, optimalizácia a údržba

Cieľom uvedeného kroku je zabezpečiť plnohodnotnú a bezchybnú prevádzku systému monitorovania stavu zariadení v dlhodobom charaktere. Kľúčovým bodom prevádzkového sledovania je zabezpečiť výkonnosť systému, funkčnosť všetkých jednotiek, dátovú konzistentnosť a spoľahlivosť získaných údajov. Súčasťou kroku sú nasledujúce aktivity:

- **Kontrola presnosti a kvality údajov** – vykoná sa kontrola správnosti a konzistencie zbieraných údajov v dlhodobom horizonte a zabezpečí sa validácia výstupov s odhalením technických alebo metodických nepresností.
- **Optimalizácia parametrov a algoritmov** – po overení údajov v časovom horizonte dlhodobej prevádzky sa vykoná optimalizácia technických a analytických parametrov systému (napr. rozsah sledovaných premenných, frekvencia zberu, prahové hodnoty, algoritmy pre generovanie triggerov).
- **Definovanie údržbového rozvrhu** – stanoví sa plán technickej údržby systému, hlavne funkčnosti senzorických prvkov, kontrolných prvkov, databázových riešení a aktualizácií softvérových komponentov.
- **Zriadenie systému periodického vyhodnocovania** – vytvorí sa mechanizmus pre pravidelné hodnotenie systému zo strany používateľov (napr. manažérov, technikov, operátorov) pre zlepšovanie účelnosti, konzistencie a vizualizácie údajov.
- **Zabezpečenie technickej a metodickej podpory** – zabezpečí sa dostatočné množstvo kompetentného interného a externého personálu pre podporu systému (hardvérová, softvérová), riešenie incidentov a plánovanie rozvoja systému.

Ponúkaný praktický rámec sa v krátkodobom horizonte môže javiť ako veľmi rozsiahly, nákladný a obmedzený na určitý druh výrobných systémov. V dlhodobom meradle však pri

adekvátnej špecifikácii potrieb podniku predstavuje presné, systematické a racionálne riešenie. Jeho zavedením získa podnik moderný a komplexný základ pre účelové monitorovanie výrobného procesu s generovaním triggerov pre potreby prediktívnej údržby. Táto investícia sa zhodnotí v podobe vyššej spoľahlivosti, zníženia odstávok a prestojov, a adresného plánovania údržby.

7 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Téma dizertačnej práce je mimoriadne aktuálna, najmä v kontexte narastajúceho zavádzania princípom Industry 4.0 a Industry 5.0 v priemyselnej praxi. Monitorovanie technického stavu zariadení predstavuje rozsiahlu problematiku, ktorá vyplýva z technologickej rôznorodosti systémov používaných na zber, spracovanie a vyhodnocovanie údajov z výrobných systémov. Hlavným cieľom záverečnej práce bol návrh monitorovacieho systému s využitím technológie Edge Computing pre potreby prediktívnej údržby. Na základe úspešného splnenia čiastkových cieľov je možné konštatovať, že hlavný cieľ záverečnej práce bol naplnený.

Prínosy dizertačnej práce pre teóriu:

- Rozvoj v oblasti monitorovania a diagnostiky stavu výrobných zariadení.
- Rozvoj v oblasti využitia technológie Edge Computing.
- Rozvoj v oblasti prístupov k fyzikálnym veličinám pre diagnostické účely.
- Rozvoj v možnostiach využitia AI pri identifikácii poruchových stavov.

Prínosy dizertačnej práce pre prax:

- Riešenie senzorického pokrytia a komunikačnej infraštruktúry.
- Prostriedok pre spracovanie značných objemov dát na lokálnej úrovni.
- Výber konkrétnych komponentov pre konkrétne využitie.
- Včasná identifikácia anomálnych stavov v procese výroby.
- Praktické experimenty a ukážky pre možnosti využitia navrhovaného systému.

Prínosy dizertačnej práce pre vedu:

- Interdisciplinárne prepojenie poznatkov z rôznych oblastí vedy.
- Možnosti využitia EC prvku pre inteligentné monitorovanie technického stavu strojov.
- Možnosti využitia aplikovaného strojového učenia v technických systémoch.
- Základ pre budúci výskum na vývoj diagnostických modelov s vyššou mierou prenositeľnosti.

ZÁVERA ĎALŠIE SMEROVANIE VÝSKUMU

Výrobné podniky sa pri samotnej výrobe rôznia v dôležitosti úloh, ktoré sú zásadné pre splnenie cieľov a ukončenie výroby na vysoko kvalitatívnej úrovni. Na jednej strane zástupcovia priemyslu uvádzajú, že cieľom výrobného podniku je ukončená kvalitná výrobná dávka, na strane druhej sa uznávajú ďalšie prvky, ktoré prispievajú k softvérovému/hardvérovému monitorovaniu pre relevantné informácie o zariadeniach. A v

neposlednom rade veľa spoločností využíva nástroje pre automatizáciu a organizáciu výroby s cieľom využiť údaje pre vyšší manažment. Je overené, že využitie mechanizmov pre komplexné monitorovanie, dohľad a spúšťanie hlásení pre výrobný systém znižuje riziko výpadkov, prestojov a odstávok na základe znalostí zo získaných údajov.

Cieľom dizertačnej práce bol návrh systému pre komplexné monitorovanie stavu výrobného procesu na základe dát. Návrh riešenia vychádza z potreby zabezpečiť dostatočne široké spektrum relevantných údajov, ktoré umožňujú presný a spoľahlivý obraz o technickom stave zariadení. Tieto údaje zároveň predstavujú vstup pre nadväzujúce procesy, najmä v oblasti prediktívnej údržby a optimalizácie výroby. Návrh reflektuje na aktuálne potreby priemyselných podnikov v rámci konceptu Industry 4.0, ale zachováva otvorené (open-source), ekonomicky dostupné a flexibilne škálovateľné prístupy.

Prvá časť práce bola zameraná na získanie dostatočného prehľadu v oblasti monitorovania a diagnostiky systémov v spolupráci so životným cyklom údajov, ktoré je možné v procese zberu získať. Súčasťou tejto časti je výskum existujúcich riešení v rámci sledovania stavu zariadení pre určenie adekvátnej stratégie údržby. V tejto kapitole je upriamená pozornosť i na technológiu Edge Computing, ktorá významne prispieva k dynamickému zberu a vyhodnocovaniu údajov bez potreby centrálného riadiaceho člena. Zároveň vizualizácia v spolupráci so signalizačnými triggermi zabezpečuje včasnú informovanosť o nežiadúcich javoch vo výrobe. Druhá časť práce bola venovaná samotnej formulácii riešeného problému a čiastkovej postupnosti zvoleného návrhu. Tretia kapitola pojednáva o výbere hardvérových komponentov a návrhu technickej infraštruktúry. Jej súčasťou je špecifikácia zariadení v súlade s navrhovaným štandardom a následný výber konkrétnych senzorických komponentov pre vybrané pracovné stanice a sekundárneho zberného zariadenia. Zároveň, časť kapitoly je venovaná špecifikácii fyzického zariadenia (a jeho procesov) - automatizovaného hybridného výrobného systému Festo AFB Factory – ktorý vstupuje do návrhu ako testovacie zariadenie. Štvrtá kapitola pozostáva z návrhu architektúry monitorovacieho systému. Kľúčovým bodom danej kapitoly je schematické znázornenie architektúry s integráciou senzorickej vrstvy a spracovania údajov prostredníctvom EC zariadenia. Piata kapitola pojednáva o implementácii senzorických prvkov a zberného prvku (RevPi) v rámci laboratórneho prostredia. Súčasťou je testovanie funkčnosti všetkých zakomponovaných prvkov a komunikácia medzi jednotlivými komponentami. Zároveň je časť kapitoly venovaná návrhu vizualizačného rozhrania, kde sú vstupom pre danú aplikáciu hlásenia generované z triggerov, ktoré získavame prostredníctvom MQTT brokera. Táto časť pozostáva i z praktických ukážok grafického znázornenia meradiel a priebehu z testovacích zariadení. Nevyhnutnou súčasťou dizertačnej práce je zhodnotenie navrhovaného riešenia, čo je súčasťou kapitoly šesť. Na záver – kapitola sedem - príkladáme systematický postup pre realizáciu navrhovaného riešenia do priemyselného podniku. Daná kapitola obsahuje postupnosť krokov, ktoré umožnia výrobnému podniku metodicky realizovať navrhovaný systém s cieľom komplexného monitorovacieho priestoru nad výrobou. Osmá kapitola pojednáva o prínosoch pre rozličné oblasti.

Vzhľadom na fakt, že každý výrobný podnik je jedinečný, nie je možné absolútne všeobecné využitie navrhovaného konceptu. Navrhnuté riešenie vychádza z technických a prevádzkových predpokladov, ktoré zodpovedajú menším až stredne veľkým výrobným

podnikom. Zvolená architektúra systému, ako aj výber použitých technológií, reflektujú na typické požiadavky danej skupiny podnikov. Využitie návrhu v širšom priemyselnom kontexte môže byť možné po jeho prispôbení špecifickým požiadavkám a potrebám jednotlivých výrobných pracovísk, čo otvára priestor pre ďalší vývoj alebo spoluprácu v rámci komplexnejších riešení.

VÝBER Z BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

CAO, K. – LIU, Y. – MENG, G. – SUN, Q. 2020. An Overview on Edge Computing Research. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2991734.

DEHOU Electronic Technology Co., Ltd. 2025. Špecifikácia teplotného senzora PT100. [cit. 2025-02-14]. Dostupné online: <https://www.radar-leveltransmitter.com/sale-18495373-blue-rtd-temperature-transmitter-sensor-pt100-polypropylene-0-5v-4-5v.html>

FESTO SE & Co. KG. 2024. Návod na obsluhu SPTE-EN. [cit. 2025-02-13]. Dostupné online: <https://www.festo.com/assets/attachment/en/659713>.

FESTO1 SE & Co. KG. 2025. Automatizovaný hybridný výrobný systém Festo AFB Factory a jeho dokumentácia. [cit. 2025-02-28]. Dostupné online: https://www.festodidactic.com/ov3/media/customers/1100/afb_en_monitor_056961.pdf

KAGERMANN, H. – WAHLSTER, W. – HELBIG, J. 2013. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Forschungsunion, Arbeits-kreis Industrie 4.0. [cit. 2025-01-20]. Dostupné online: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Abschlussbericht_Industrie4.0_barrierefrei.pdf

M5STACK, 2025. Špecifikácia senzora PDM Unit SKU089. [cit. 2025-02-17]. Dostupné online: <https://docs.m5stack.com/en/unit/pdm>

M5STACK1, 2025. Špecifikácia jednotky M5STack SKU086. [cit. 2025-02-17]. Dostupné online: <https://docs.m5stack.com/en/unit/Ameter%20Unit>

M5STACK2. 2025. Špecifikácia jednotky M5Stack Station K-124B. [cit. 2025-02-21]. Dostupné online: https://docs.m5stack.com/en/core/station_bat

M5STACK3. 2025. Špecifikácia jednotku M5Stick Station. [cit. 2025-02-21]. Dostupné online: https://docs.m5stack.com/en/core/m5stickc_plus

MIMOSA OSA-CBM. 2025. Architektúra otvoreného systému pre údržbu založenú na stave. [cit. 2025-02-07]. Dostupné online: www.mimosa.org/mimosa-osa-cbm/

NODE-RED. 2025. Nadácia OpenJS a prispievatelia, dokumentácia Node-RED. [cit. 2025-05-12]. Dostupné online: <https://nodered.org/docs/user-guide>

PATEL, M. – VASA, J. – PATEL, B. 2023. Predictive Maintenance: A Comprehensive Analysis and Future Outlook. 1-7. 10.1109/INCOFT60753.2023.10425122.

REVOLUTION PI. 2025. Dokumentácia k modulu Revolution Pi. [cit. 2025-02-20]. Dostupné online: https://revolutionpi.com/fileadmin/downloads/datasheets/Technical_Datasheet_RevPi-Core-SE.pdf

SHANDONG Renke Control Technology Co., Ltd., 2025. Špecifikácia priemyselného snímača IP67 RS-WZ3/WZ1-*-1. [cit. 2025-02-13]. Dostupné online: <https://www.renkeer.com/product/industrial-vibration-sensor/>

SILVA, C. E. – NARCIZO, R. – CARDOSO, R. – GONCALVES, L. – CARVALHO, Y. 2020. Industry 4.0: Proposing a Framework. Society and Business Review. 8. 250-267. 10.14738/abr.86.8541.

STN EN ISO 13374-1,2: 2023. Monitorovanie stavu a diagnostika strojov – spracovanie údajov, komunikácia a prezentácia 2023. [cit. 2025-02-06]. Dostupné v akademickej knižnici MTF STU.

TEIXEIRA, H.N. – LOPES, I. – BRAGA, A.C. 2020. Condition-based maintenance implementation: a literature review, Procedia Manufacturing, Volume 51, 2020, Pages 228-235, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.033>.

THE MATHWorks. 2025. Nástroje pre hlboké učenie R2024. [cit. 2025-03-10] Dostupné online: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/index.html> (prístup 12. novembra 2024).

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

V2_01 BURČIAR, Fedor - JUHÁS, Martin - JUHÁSOVÁ, Bohuslava - VAŽAN, Pavel - HALENÁR, Igor - HALENÁROVÁ, Lenka. Automated Production Data Integration and Processing via Simulation Based Digital Twin. In 21st Mechatronika 2024 : Proceedings of the 21st International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 4-6 December 2024, Brno, Czech Republic. 1. vyd. Praha : Czech Technical University in Prague, 2024, S. 144-147. ISBN 979-8-3503-9489-4 (USB). V databáze: DOI: 10.1109/ME61309.2024.10789722.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_02 HALENÁR, Igor - JUHÁSOVÁ, Bohuslava - JUHÁS, Martin - HALENÁROVÁ, Lenka. Design of a Smart Condition Monitoring System of Equipment in the Production Process. In 21st Mechatronika 2024 : Proceedings of the 21st International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 4-6 December 2024, Brno, Czech Republic. 1. vyd. Praha : Czech Technical University in Prague, 2024, S. 268-273. ISBN 979-8-3503-9489-4 (USB).

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_03 HALENÁROVÁ, Lenka - HALENÁR, Igor - TANUŠKA, Pavol. Digital Twin proposal using the Matlab-Stateflow model and Docker containers. In 2022 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : Proceedings ; 31st International Conference; 11-14 September 2022 Visegrád, Maďarsko. 1. vydanie. Danvers, Massachusetts, USA : IEEE, 2022, [6 s.]. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925931 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142115630.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_04 HALENÁROVÁ, Lenka - HALENÁR, Igor - TANUŠKA, Pavol. The Conceptual Design of a Data Collection System for Predictive Maintenance. In

Networks and Systems in Cybernetics : 12th Computer Science On-line Conference. Vol. 2, April 2023. Cham : Springer, 2023, S. 169-178. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-35316-1 (2023: 0.171 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-35317-8_15 ; SCOPUS: 2-s2.0-85169044583.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_05 HALENÁROVÁ, Lenka - HALENÁR, Igor - TANUŠKA, Pavol. Proposal of a Smart Control System Using Edge Computing and Deep Learning Technologies. In Artificial Intelligence Algorithm Design for Systems : Proceedings of 13th Computer Science Online Conference 2024, Vol. 3. 1. vyd. Cham : Springer Nature, 2024, S. 464-475. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-70517-5. V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-70518-2_41 ; SCOPUS: 2-s2.0-85210811506 ; WOS: 001450703600041.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_06 HALENÁROVÁ, Lenka - TANUŠKA, Pavol - JUHÁSOVÁ, Bohuslava - JUHÁS, Martin - HALENÁR, Igor. Design of a Data Collection Layer for Complementary Diagnostic and Condition Monitoring System of a Robotic Workplace. In 21st Mechatronika 2024 : Proceedings of the 21st International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 4-6 December 2024, Brno, Czech Republic. 1. vyd. Praha : Czech Technical University in Prague, 2024, S. 283-288. ISBN 979-8-3503-9489-4 (USB).

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_07 JUHÁS, Martin - JUHÁSOVÁ, Bohuslava - HALENÁR, Igor - DAŇO, Milan - HALENÁROVÁ, Lenka - BURČIAR, Fedor. StateFlow as a Tool of the Hybrid X-in-the-Loop Technique in the Model-Based Design Approach to the Control Systems Design in Industrial Automation. In 21st Mechatronika 2024 : Proceedings of the 21st International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 4-6 December 2024, Brno, Czech Republic. 1. vyd. Praha :

Czech Technical University in Prague, 2024, S. 93-99. ISBN 979-8-3503-9489-4 (USB).

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

V3_01 HALENÁR, Igor - HALENÁROVÁ, Lenka - KOVAČIC, Matej. An approach to automated programming of industrial robots based on graphic data. In Vedecké práce MTF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava. Vol. 29, no. 49 (2021), s. 67-77. ISSN 1336-1589. V databáze: INSPEC ; DOI: 10.2478/rput-2021-0026.

Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADF

V3_02 HALENÁR, Igor - HALENÁROVÁ, Lenka - TANUŠKA, Pavol. Communication Safety of Cybernetic Systems in a Smart Factory Environment. In Machines. Vol. 11, iss. 3 (2023), art. no. 379, s. 1-35. ISSN 2075-1702 (2023: 2.1 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.474 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.343 - AIS, Q3 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/machines11030379 ; SCOPUS: 2-s2.0-85151938608 ; WOS: 000960092500001 ; CC: 000960092500001.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

V3_03 HALENÁR, Igor - HALENÁROVÁ, Lenka - TANUŠKA, Pavol - VAŽAN, Pavel. Machine Condition Monitoring System Based on Edge Computing Technology. In Sensors. Vol. 25, iss. 1 (2024), s. 1-25. ISSN 1424-3210 (2024: 3.5 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.764 - SJR, Q1 - SJR Best Q, 0.618 - AIS, Q2 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/s25010180 ; SCOPUS: 2-s2.0-85214487421 ; WOS: 001393868400001 ; CC: 001393868400001.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	7
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	3
Súčet		10