

Ing. Lukáš Beňo

Autoreferát dizertačnej práce

**MODERNÉ METÓDY OVLÁDANIA MECHATRONICKÝCH ZARIADENÍ S VYUŽITÍM
HLASOVÝCH POVELOV ZALOŽENÉ NA TECHNOLOGII EDGE COMPUTING**

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore: kybernetika

Miesto a dátum:

Bratislava, 16.6.2022

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

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

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

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

Oponenti: doc. Ing. Martin Juhás, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
MTF STU BA, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava

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

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

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

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program: Mechatronické systémy

Autor: Ing. Lukáš Beňo

Písomná práca k dizertačnej skúške: Moderné metódy ovládania mechatronických zariadení s využitím hlasových povelov založené na technológii Edge computing

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Erik Kučera, PhD.

Miesto a rok predloženia práce: Bratislava 2022

V súčasnej dobe siete Internet of Things zasahujú aj do oblasti priemyselnej výroby. Priemyselná výroba obsahuje nespočetne veľa mechatronických zariadení, ktoré je potrebné ovládať. Existuje mnoho spôsobov ako ovládať mechatronické zariadenia a medzi ne patrí aj ovládanie hlasovým povelením, ktoré momentálne nie je veľmi rozšírené v priemyselnej výrobe, avšak svoje uplatnenie si už našlo v spotrebnej elektronike. Úvodné kapitoly práce sa zameriavajú primárne na samostatný princíp fungovania IoT, spracovaniu dát pomocou cloud a edge computing-u, transformácii ľudskej reči na text a distribúcie riešenia na koncové zariadenia za využitia kontajnerizácie. Predložená dizertačná práca sa zaoberá návrhom nového prístupu a architektúry ovládania priemyselného zariadenia hlasovými poveleniami na báze edge computing-u v spojení s technológiou kontajnerizácie.

Kľúčové slová: internet vecí, cloud computing, edge computing, hlasové ovládanie, mechatronické zariadenie, mqtt, mikropočítač, revolution pi, cloud azure, factoryio

ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION
TECHNOLOGY

Study Programme: Mechatronic Systems

Author: Ing. Lukáš Beňo

Essay to dissertation exam: Modern methods of controlling mechatronic devices
using voice commands based on Edge computing
technology

Supervisor: doc. Ing. Erik Kučera, PhD.

Place and year of submission: Bratislava 2022

Nowadays, Internet of Things networks are also encroaching on the field of industrial production. Industrial production contains countless mechatronic devices that need to be controlled. There are many ways of controlling mechatronic devices and these include voice command control, which is not currently widespread in industrial production, but has already found its application in consumer electronics. The introductory chapters of this thesis focus primarily on the autonomous IoT operating principle, data processing using cloud and edge computing, transforming human speech to text and distributing the solution to end devices using containerization. This dissertation thesis deals with the design of a novel approach and architecture for controlling an industrial device by voice commands based on edge computing in conjunction with containerization technology.

Keywords: internet of things, cloud computing, edge computing, voice control, mechatronic device, mqtt, microcomputer, revolution pi, cloud azure, factoryio

Obsah

Úvod	1
1 Analýza súčasného stavu	2
1.1 Siemens MindSphere.....	2
1.2 Amazon Web Services IoT.....	2
1.3 Azure IoT Edge	3
1.4 Docker a kontajnerizácia	4
1.5 Knižnice pre prevod reči na text.....	5
1.6 Rozhranie človek – stroj.....	6
1.6.1 Zmiešaná realita ako HMI	7
1.6.2 Ovládanie hlasom ako HMI.....	7
2 Návrh originálnej architektúry hlasom ovládaného akčného člena	9
2.1 Kategorizácia IoT Edge zariadení	13
2.2 Kontajnery pre hlasové ovládanie	14
2.2.1 Voice recognition modul	14
2.2.2 Node-Red OPC UA modul	15
2.2.3 Node-Red RevPi modul.....	17
3 Experimentálne výsledky a prínosy navrhutej architektúry.....	21
Záver	24
Publikačná činnosť autora	26
Zdroje.....	28

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Porovnanie virtuálneho stroja a kontajnera.....	4
Obr. 2 Architektúra návrhu originálneho ovládania akčného člena hlasom.....	12
Obr. 3 Navrhnutá kategorizácia IoT Edge zariadení.....	14
Obr. 4 Presun správ z Voice recognition modulu do iných modulov	15
Obr. 5 Vodná nádrž navrhnutá vo Factory I/O	16
Obr. 6 Riadiaci panel pre vodnú nádrž.....	17
Obr. 7 Raziaci stroj s dopravným pásom od spoločnosti Fischer Technik.....	18
Obr. 8 Riadiaci panel pre raziaci stroj s dopravným pásom.....	19

Zoznam tabuliek

Tab. 1 Prehľad knižníc pre rozpoznanie reči so zameraním na certifikáciu, jazyk, slovník a odstránenie šumov	5
Tab. 2 Prehľad knižníc pre rozpoznanie reči so zameraním na programovacie jazyky a kontajnerizáciu	6
Tab. 3 Porovnanie navrhutej architektúry s inými dostupnými riešeniami na základe zadefinovaných parametrov	23

Zoznam skratiek a značiek

API	Rozhranie pre programovanie aplikácií (<i>Application programming interface</i>)
CI/CD	Priebežná integrácia/nepretržité doručovanie (<i>Continues Integration/Continues Delivery</i>)
DIO	Digitálny vstup/výstup (<i>Digital input/output</i>)
HMI	Rozhranie človek-prístroj (<i>Human machine interface</i>)
IoT	Internet vecí (<i>Internet of Things</i>)
IIoT	Primyslený internet vecí (<i>Industrial Internet of Things</i>)
JSON	JavaScriptový objektový zápis (<i>JavaScript Object Notation</i>)
MQTT	Riadenie správ telemetrického transportu (<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>)
OPC UA	Komunikácia na otvorenej platforme - zjednotené architektúra (<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>)
VM	Virtuálny prístroj (<i>Virtual Machine</i>)
M2M	Stroj k stroju (<i>Machine to Machine</i>)

Úvod

Rozmach informačných technológií a hlasového ovládania preniesol aj veľké množstvo dát, ktoré je nutné preniesť a následne spracovať. Väčšina aktuálnych riešení spracováva ľudský hlas v cloudových dátových centrách, čo predstavuje zaťaženie na infraštruktúru a dlhšiu časovú odozvu. Nakoľko data cestujú cez sieť do cloud-u pre ich spracovanie, je tu aj otázka bezpečnosti ochrana osobných údajov, pretože v nesprávnych rukách môžu byť osobné informácie využívané ako silný nástroj. Spomenuté problémy dokáže z veľkej časti riešiť aj Edge computing, ktorý predstavuje opačný prístup computing, ako je tomu pri Cloud computing-u, pričom sa môžu navzájom dopĺňať. Edge computing umožňuje spracovanie dát, priamo na zariadení, ktorí data produkuje, prípadne ich v blízkosti.

Z týchto dôvodov práca navrhuje systém, ktorý kombinuje výhody hlasového ovládania ako používateľského rozhrania a Edge computing-u zameraného na bezpečnosť osobných dát, nízku latenciu, jednoduchú správu a nasadenie aplikácie pomocou kontajnerizácie. Kontajnery na rozpoznávanie reči nebežia v cloude ako zvyčajne, ale priamo v lokálnej sieti používateľa na IoT zariadeniach. Kontajnery sú navrhnuté spôsobom, kde používateľ si ich môže stiahnuť a spustiť s minimálnym úsilím vynaloženým na konfiguráciu, inštaláciu závislostí a samotných kontajnerov. Kontajnery sa dokážu navzájom rozoznať, komunikovať a používať pripojený aktuátor a mikrofón bez akejkoľvek interakcie zo strany koncového používateľa. Práca prináša aj metodiku tvorby aplikácie na rozpoznávanie reči a experimentálne overenie navrhovanej architektúry. Architektúra sa zameriava na ovládanie priemyselných zariadení ale virtuálnych modelov mechatronických systémov. Hlavné ciele a inovácie možno formulovať do nasledujúcich bodov:

- Architektúra hlasovo riadeného riešenia s využitím Edge computing-u a kontajnerizácie
- Riešenie bežiacie v Linuxových kontajneroch so zameraním na automatické nastavenie všetkých požadovaných závislostí a knižníc
- Jednoduchá adaptácia hlasových príkazov
- Jednoduché nasadenie a správa riešenia
- Prenosnosť, nízka latencia a ochrana údajov

1 Analýza súčasného stavu

Následujúca kapitola ponúka prehľad vybraných riešení využívajúcich technológiu Edge computing-u so zameraním na priemyselné aplikácie.

1.1 Siemens MindSphere

MindSphere je otvorený operačný systém pre IoT založený na cloud-e vytvorený spoločnosťou Siemens. Umožňuje zbierať údaje v reálnom čase a pristupovať k nim prostredníctvom ľubovoľného webového prehľadávača. Jeho jadro tvoria tri základne vrstvy [1]:

- *Aplikačná platforma MindSphere (MindSphere Application Platform)* – poskytuje možnosť na hostovanie vytvorených aplikácií používateľmi, odkiaľ si ich zákazníci môžu stiahnuť. Jej súčasťou sú aj aplikácie dodávané spoločnosť Siemens. MindSphere využíva cloud-ové platformy ako AWS, Azure a Alibaba.
- *Platforma služieb MindSphere (MindSphere Services Platform)* – ponúka rôzne IoT a analytické služby, ktoré sú dostupné zvonka pre používateľov prostredníctvom APIs. Vďaka tomu je ich možné využiť aj v riešeníach, ktoré už existujú.
- *MindConnect* – je hardvér typu „plug and play“, do ktorého je možné pripojiť zariadenia, ktoré následne dokážu potom komunikovať s MindSphere. Hardvér, kde je nasadený MindConnect, môže byť doplnený o *Industrial Edge Runtime*. Industrial Edge Runtime, ako už názov napovedá, prináša Edge computing na koncové zariadenie. Industrial Edge runtime využíva operačný systém Linux, je plne kontajnerizovaný a umožňuje nasadzovanie rôznych aplikácií z MindSphere priamo na koncové zariadenie, t.j. odpadá nutnosť posielat' údaje na spracovanie do cloud-u.

1.2 Amazon Web Services IoT

Amazon Web Services IoT ponúka služby pre priemyselné, spotrebiteľské a komerčné riešenia. AWS IoT je postavený na bezpečnej a overenej cloudovej infraštruktúre a medzi jeho hlavné IoT prvky možno zaradiť [1]:

- *FreeRTOS* - je operačný systém pre mikrokontroléry, ktorý uľahčuje programovanie, nasadenie, zabezpečenie, pripojenie a správu malých zariadení s nízkou spotrebou energie.

- *AWS IoT Greengrass* - je softvér, ktorý prináša AWS na Edge zariadenia. Umožňuje lokálne vykonávať rôzne výpočty, simulácie, preposielať správy medzi jednotlivými pripojenými zariadeniami. Pri AWS IoT Greengrass je potrebné spomenúť aj podporu pre Docker image od konca minulého roka.
- *AWS IoT Core* - je platforma, ktorá umožňuje pripojiť IoT zariadenia ku službám v AWS cloud-e, a zároveň umožňuje komunikáciu s inými pripojenými zariadeniami do cloud-u.
- *AWS IoT Device Management* - zabezpečuje organizáciu, monitorovanie a vzdialenú správu IoT zariadení.

1.3 Azure IoT Edge

Azure IoT Edge je služba, ktorá prináša inteligenciu z cloud-u, ako je napríklad umelá inteligencia alebo Azure služby ,priamo na IoT zariadenia [2].

Azure IoT Edge runtime predstavuje balík programov, ktoré musia byť nainštalované na zariadení, aby mohlo byť povážené IoT Edge device. Runtime možno nasadiť na zariadeniach, ktoré sú malé ako Raspberry Pi alebo veľké ako priemyselný server. Azure IoT Edge runtime zabezpečuje [3]:

- Inštaluje a aktualizuje moduly
- Zabezpečuje, aby moduly vždy bežali
- Zabezpečuje komunikáciu medzi jednotlivými modulmi
- Reportuje stav modulov do cloud-u kvôli vzdialenému monitoring-u
- Zabezpečuje aby, boli nasedené posledné bezpečnostné štandardy

Hlavné úlohy Azure IoT Edge runtime sú:

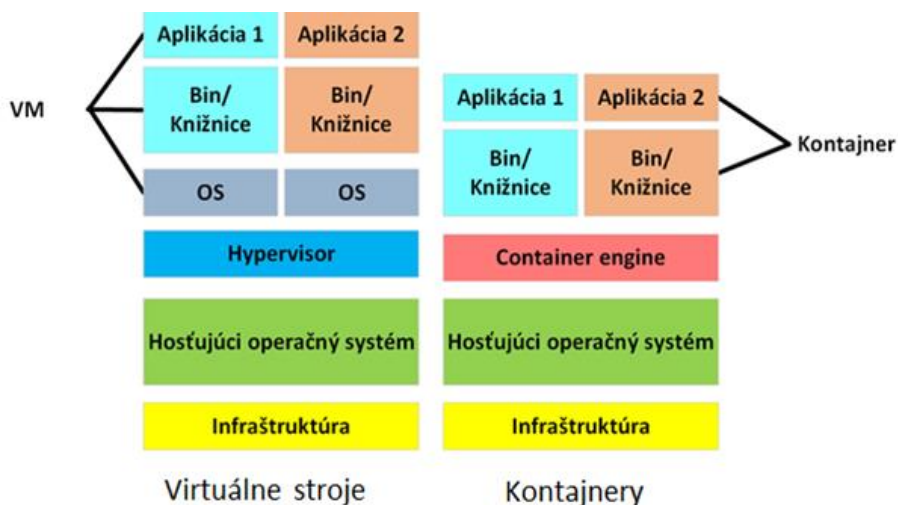
- **Komunikácia**
- **Správa modulov**
- **Zabezpečenie**

Tieto úlohy sú zabezpečené troma komponentmi [3] :

- **IoT Edge hub** - komunikácia medzi modulmi, zariadeniami a IoT Hub-om
- **IoT Edge agent** - nasadzovanie a správa modulov
- **IoT Edge security manager** - bezpečnosť

1.4 Docker a kontajnerizácia

Pokiaľ chceme na serveri nasadiť aplikáciu, budeme potrebovať na danom serveri operačný systém a prostredie, v ktorom bude aplikácia bežať. Ak by na danom serveri bežala len jedna aplikácia, tak by pravdepodobne nevyužila plný poskytovaný výkon servera. To by malo za následok nasadenie viacerých aplikáciách na daný server. Avšak to by sme mohli naraziť na problém, že dané aplikácie využívajú rôzne verzie istej knižnice, prípadne by sa navzájom aplikácie ovplyvňovali. Jedným možným riešením by bolo vytvorenie virtuálnych strojov na danom serveri, čo by bolo neefektívne. Nakoľko každý virtuálny stroj by si ukrojil určitý výpočtový výkon zo servera, len na samostatný beh virtuálneho stroja, nielen na beh aplikácie. Tento problém by mohol vyriešiť kontajner. Tak ako v reálnom živote existuje kontajner na prepravu tovaru, tak vo virtuálnom svete existuje kontajner „na univerzálnu prepravu softvéru“. V reálnom živote je kontajner vyrobený tak, aby sa dal ľahko prepraviť na rôznych prepravných prostriedkoch, ako je loď, kamión, lietadlo alebo vlak. Cieľom kontajnera vo virtuálnom svete je zabaliť aplikáciu tak, aby sa dalo čo najľahšie prepraviť na rôzne systémy. Jednoducho povedané, kontajner je samostatný balík softvéru, ktorý obsahuje všetky potrebné závislosti, aby aplikácia mohla byť spustená a bežať, nezávisle od prostredia na ktorom bola vytvorená [4]. Hlavná myšlienka je oddeliť aplikáciu a jej závislosti od operačného systému.



Obr. 1 Porovnanie virtuálneho stroja a kontajnera

1.5 Knižnice pre prevod reči na text

Knižnice pre transformáciu ľudskej reči na text tvoria jadro hlasového ovládania. Pre tieto knižnice je dôležité mať možnosť podpory viacerých jazykov okrem angličtiny. Taktiež by mali by mať certifikáciu na ochranu osobných údajov alebo možnosť spustenia ako kontajner, aby sa dosiahlo ich rýchle a jednoduché nasadenie. V najlepšom prípade by dané kontajnery mohli bežať lokálne v sieti, priamo na IoT zariadeniach. V tabuľke č. 1 a 2 je znázornené porovnanie známych knižníc pre transformáciu reči na text.

Názov	Viacjazyčná podpora	Certifikácia	Vlastný slovník – slang	Odstránenie šumov
Google Cloud Speech [31]	Áno	Áno*	Áno	Áno
Microsoft Cognitive Speech Service [32]	Áno	Áno*	Áno	Áno
Amazon Transcribe [33]	Áno	Áno*	Áno	Áno
Sytem Speech [34]	Áno	Nie	Áno	Nie
DeepSpeech [35]	Nie	Nie	Áno	Nie
Kaldi [36]	Nie	Nie	Áno	Nie
Annyang [37]	Nie	Nie	Áno	Nie
Voice-commands.js [38]	Nie	Nie	Áno	Nie

Tab. 1 Prehľad knižníc pre rozpoznanie reči so zameraním na certifikáciu, jazyk, slovník a odstránenie šumov

Poznámka* Types of certifications: System and organization controls (SOC), The Federal Risk and Authorization Management Program (FedRAMP), The Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS), Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA), Health Information Technology for Economic and Clinical Health Act (HITECH) and International Organization for Standardization (ISO)

Name	Vlastník	Programovacie jazyky	Bežiacie v cloude	Docker Image-Kontajner*
Google Cloud Speech [31]	Google	C# (Core), Go, Node.js, PHP, Ruby **	Áno	Nie (Potreba bežať kontajner v Kubernetes infraštruktúre)
Microsoft Cognitive Speech Service [32]	Microsoft	C# (Core), C++, JavaScript, Objective-C / Swift **	Áno	Áno
Amazon Transcribe [33]	Amazon	Java SDK, Ruby SDK, and C++ SDK	Áno	Nie
Sytem Speech [34]	Microsoft	C# (.NET Framework)	Nie	Nie
DeepSpeech [35]	Mozilla	C, JavaScript and **	Nie	Nie
Kaldi [36]	Kaldi	C++	Nie	Nie
Annyang [37]	Annyang	JavaScript	Nie	Nie
Voice-commands.js [38]	Jimmy Byrum	JavaScript	Nie	Nie

Tab. 2 Prehľad knižníc pre rozpoznávanie reči so zameraním na programovacie jazyky a kontajnerizáciu

Poznámka* Docker Image-Kontajner je oficiálne poskytovaný vlastníkom knižnice a má možnosť bežať na IoT/Edge zariadení so základnou inštaláciou Docker engine.

Poznámka** Podpora programovacích jazykov: Java, Python, C# (.NET Framework)

Na základe porovnania bola vybraná služba Microsoft Cognitive Speech Service [32], pretože vo všeobecnosti podporuje mnoho programovacích jazykov. Služba Microsoft Cognitive Speech Service bola vybraná aj z dôvodu, že kontajner môže bežať lokálne bez špeciálneho nastavenia a kontajner je oficiálne vydaný a udržiavaný spoločnosťou Microsoft.

1.6 Rozhranie človek – stroj

Nasledujúca kapitola sa venuje existujúcim možnostiam realizácie HMI (Human machine interface) používaných v súčasnej priemyselnej výrobe a ich moderným variantom. HMI predstavuje rozhranie medzi človekom a prístrojom. HMI v

priemyselnej výrobe predstavujú klasické monitory a priemyselné panely. Avšak ako HMI môže byť použitá aj zmiešaná realita alebo ovládanie hlasom.

1.6.1 Zmiešaná realita ako HMI

Rozmach zariadení pre zmiešanú realitu umožňuje ovládanie mechatronických zariadení aj bez priamej interakcie s nimi. Zmiešaná realita predstavuje prienik reálneho sveta s digitálnym, kde tieto svety vzájomne interagujú v reálnom čase. Riešenia zmiešanej reality sú zväčša závislé na rozpoznaní objektu pomocou QR kódu alebo 3D objektu mechatronického zariadenia, čo môže byť náročné v prašných prostrediach a v prostrediach s nízkou viditeľnosťou [5]. Medzi zariadenia umožňujúce spúšťať aplikácie zmiešanej reality patria mobily, tablety, Microsoft HoloLens, Google Glass a iné.

1.6.2 Ovládanie hlasom ako HMI

V dnešnej dobe je ovládanie hlasom rozšírené najmä v domácej automatizácii a v priemyselnej výrobe si svoje miesto stále hľadá. Medzi populárne riešenia pre domácnosť a spotrebnú elektroniku patrí Alexa od Amazonu [6], Siri od Apple a Google Asistent. Architektúry spomenutých systémov sú zväčša založené na ovládaní koncového zariadenia prostredníctvom cloud-u, napr. Alexa od Amazonu. Podobne založenú architektúru na cloudu-e využíva aj Google Asistent, ako je možné vidieť v práci Voice-Controlled Autonomous Vehicle Using IoT od Sachdeva [7]. Pri ovládaní prostredníctvom cloud-u dochádza k dlhším časovým odovzdám, a taktiež sa vyžaduje stabilné internetové pripojenie.

Priemyselné riešenia vyžadujú rýchlu odozvu systému a nemôžu sa spoliehať na stabilné internetové pripojenie a spojenie s cloud-om. Preto je potrebné vykonať analýzu reči priamo na koncovom mechatronickom zariadení, ktoré chceme riadiť. Takúto možnosť nám ponúka Edge computing, ktorý je dostupný napríklad od spoločností ako Microsoft [8], Amazon a Siemens.

Pri návrhu riadenia mechatronického zariadenia hlasovými povelmi je dôležitý prvok knižnica/servis, ktorý zabezpečí prevod reči na text. Spoločnosti ako Microsoft a Amazon ponúkajú knižnice, ktoré je možné využiť v priemyselnom prostredí. Microsoft ponúka servis „Speech-to-text“ pre prevod textu na reč. Daný servis dokáže prekonať prekážky ako je napríklad šum v pozadí, akcent alebo jedinečný slovník. Pod pojmom jedinečný slovník si môžeme predstaviť technické slová, prípadne frázy, ktoré sú zaužívané pri určitých výrobných procesoch [8]. Tento slovník si je možné vytvoriť a následne importovať do riešenia. Tak ako Microsoft, aj Amazon ponúka servis

„Amazon Transcribe“ pre preklad reči na text v priemyselnom prostredí, ktorý taktiež umožňuje importovať vlastný slovník a odstrániť šum z pozadia [9].

2 Návrh originálnej architektúry hlasom ovládaného akčného člena

Kapitola opisuje architektúru ovládania akčného člena – mechatronického zariadenia (fyzického alebo virtuálneho) pomocou hlasových príkazov. Transformácia ľudského hlasu do riadiacich príkazov sa vykonáva priamo na IoT (ďalej v texte ako IoT Edge) zariadeniach alebo vzdialene v cloud-e. IoT zariadenia sú pripojené a manažované prostredníctvom cloud-u Azure v IoT Hub-e. Architektúra je zameraná na jednoduché nasadzovanie a manažovanie riešenia, vďaka technológií kontajnerizácie.

Navrhnutá architektúra bola v prvom kroku experimentálne overená na zariadení Raspberry Pi 4, následne bola zdokonalená a úspešne overená na priemyselnom PLC zariadení Revolution Pi, čomu sa venujú nasledujúce kapitoly. Originálny koncept architektúry so zariadením Raspberry Pi 4 je možné nájsť v zahraničnom karentovanom časopise Electronics v článku *Edge Container for Speech Recognition* [10], ktorého prvým autorom je predkladateľ tejto dizertačnej práce.

Vytvorené riešenie umožňuje nezávislé hlasového riadenie (Obr. 2):

1. **Reálneho raziaceho stroja s dopravným pásom od spoločnosti Fischertechnik.**
2. **Virtuálneho modelu vodnej nádrže vytvorenej pomocou nástroja Factory I/O riadenej prostredníctvom komunikačného protokolu OPC UA.**

Navrhnutá architektúra sa skladá z troch hlavných celkov (Obr. 2), ktorým sa venujú nasledujúce podkapitoly:

- **Cloud Azure a IoT Hub** - opisuje nastavenie servisov v cloude Azure a IoT Hub-u, ktorý slúži na monitorovanie a s právu IoT Edge zariadení.
- **Kategorizácia IoT Edge zariadení** - popis kategorizácie IoT Edge zariadení a ich využitia v navrhnutej architektúre.
- **Kontajnery pre hlasové ovládanie akčného člena** – opis využitých a navrhnutých kontajnerov (ďalej v texte aj ako moduly).

Na základe analýzy bola vytvorená architektúra, ktorá je zobrazená na obrázku č. 2 a funguje nasledovne:

- A. Na priemyselnom PLC zariadení RevPi Core 3 dochádza pri zapnutí k inicializácii **IoT Edge Runtime** (Obr. 2 – bod 1), ktorý obsahuje tri základné

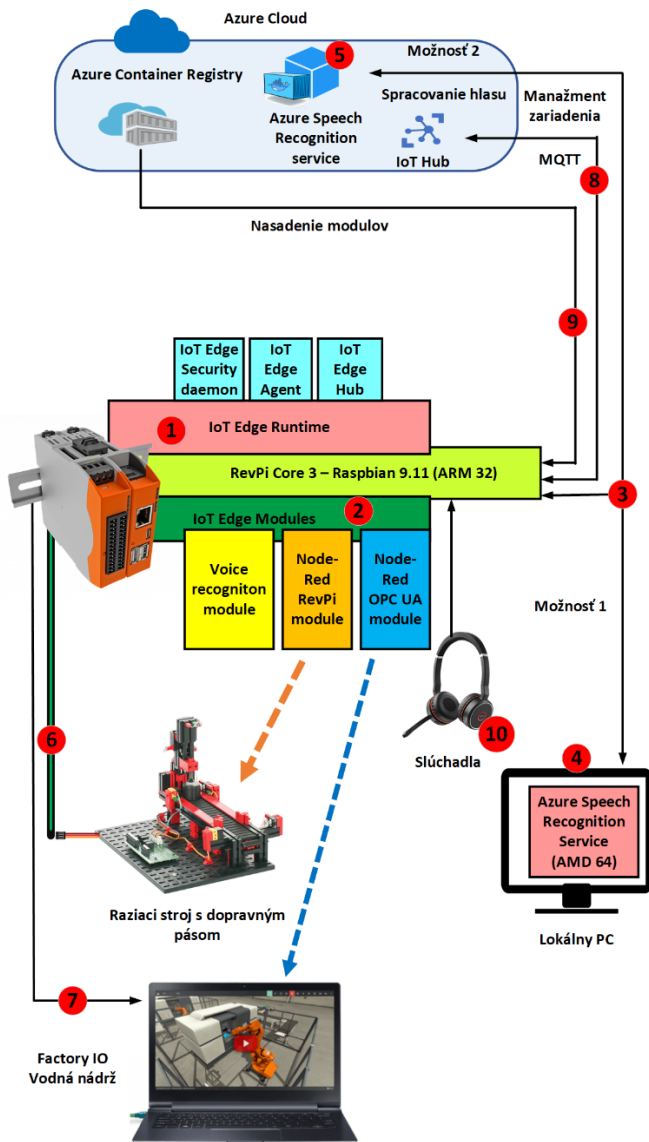
moduly, ktoré musia na zariadení bežať, aby mohlo byť považované za IoT Edge zariadenie:

- *IoT Edge Agent* predstavuje modul, ktorý je zodpovedný za nasadzovanie a správu iných modulov.
 - *IoT Edge security daemon* zabezpečuje kryptografické operácie.
 - *IoT Edge Hub* slúži ako lokálny sprostredkovateľ správ medzi modulmi a cloud-om Azure.
- B. Po úspešnej inicializácii IoT Edge Runtime, dochádza k spusteniu vytvorených modulov (Obr. 2 – bod 2):
- **Voice recognition** - daný modul zodpovedá za prevod reči na text. Pre prevod reči na text sa využíva *Azure Speech Recognition service*, ktorý môže bežať v cloude alebo lokálne na výkone IoT Edge zariadení (Obr. 2 – bod 3). Navrhnutá architektúra umožňuje obe možnosti spracovania zvuku, čiže Edge aj Cloud computing možnosť. Pri inicializácii sa modul pokúsi pripojiť na *Azure Speech Recognition service* bežiaci lokálne (Obr. 2 – bod 4), pokiaľ daná možnosť je neúspešná (výpadok servisu), modul automaticky prepne na pripojenie do cloud-u (Obr. 2 – bod 5), kde taktiež beží *Azure Speech Recognition service*. Modul taktiež automaticky rozpozná pripojený mikrofón a využije ho ako zdroj zvuku pre hlasové povely. Modul následne rozpoznaný text z reči posieľa do lokálneho sprostredkovateľa správ IoT Edge Hub-u, ktorý následne správy preposieľa do ostatných modulov.
 - **Node-Red RevPi** - modul slúži na ovládanie fyzického raziaceho stroja s dopravným pásom. Pri jeho spustení dochádza k inicializácii jednotlivých vstupných a výstupných pinov RevPi Core zariadenia, potrebných pre ovládanie raziaceho stroja (Obr. 2 – bod 6). Úspešnú inicializáciu raziaceho stroja je možné sledovať prostredníctvom rozsvietenia bielych LED svietidiel pre pohybové senzory. Modul je po inicializácii pripravený prijímať správy (reč prevedená na text) od *Voice recognition* modulu prostredníctvom IoT Edge Hub modulu. Modul zodpovedá aj za prevod textu na špecifické riadiace príkazy. Modul taktiež ponúka aj riadiaci panel dostupný cez webový prehliadač. Modul *Node-Red RevPi* je viazaný na RevPi Core 3, nakoľko využíva jeho periférie.
 - **Node-Red OPC UA** - modul slúži na beh OPC UA servera, ktorý je inicializovaný pri spustení modulu. OPC UA server následne komunikuje s OPC UA klientom na strane Factory I/O - virtuálnej vodnej nádrže (Obr.

2 – bod 7). Akonáhle je modul úspešne inicializovaný, tak je schopný prijímať správy (reč prevedená na text) od *Voice recognition* modulu prostredníctvom lokálneho sprostredkovateľa správ IoT Edge Hub-u. Text následne modul prevádza na špecifické príkazy pre riadenie virtuálnej vodnej nádrže. Modul taktiež ponúka aj riadiaci panel dostupný cez webový prehliadač. Pre správne fungovanie modulu je nutné správne nakonfigurovať vodnú nádrž v programe Factory I/O, aby klient vo Factory I/O bol schopný sa pripojiť a čítať správne premenné z OPC UA servera bežiaceho v module. *Node-Red OPC UA* modul je nezávislý od RevPi Core 3 zariadenia, nakoľko nevyužíva jeho periférie.

Moduly *Node-Red RevPi* a *Node-Red OPC UA* bežia v našej architektúre na spoločnom IoT Edge zariadení pre demonštračné účinky možnosti využitia RevPi Core 3. V reálnej prevádzke by mohli moduly bežať nezávisle na dvoch rôznych IoT Edge zariadeniach.

- C. Úspešnú inicializáciu modulov si je možné overiť prostredníctvom IoT Hub-u v cloude Azure (Obr. 2 – bod 8). Pokiaľ by bol problém s niektorým s modulom, v riadiacom centre nášho IoT Edge zariadenia je možné chybu spozorovať a prešetriť. IoT Hub v cloude Azure je taktiež možné využiť aj na aktualizáciu, prípadne nasadenie nových modulov. Vytvorené moduly sú uložené v Azure Container Registry bežiacom v cloud-e, vďaka čomu je ľahko moduly distribuovať na iné zariadenia, prípadne aktualizovať už bežiace moduly.
- D. Po úspešnom nabehnutí všetkých modulov je možné začať využívať navrhnuté riešenie. Pre aktiváciu hlasového ovládania je nutné vždy použiť jedinečnú aktivačnú frázu *Hey Bennie*, vďaka ktorej je hlasové ovládanie aktivované iba v prípadoch, kedy je to žiadané. Pokiaľ by neexistovala aktivačná fráza, hlasové ovládanie by bolo aktívne neustále, čo by spôsobovalo neustálu výpočtovo náročnú transformáciu reči na text a bolo by obťažné detegovať začiatok príkazov, prípadne by mohla nastať detekcia príkazu omyl. Po vyslovení príkazu, príkaz putuje cez mikrofón do *Voice recognition* modulu, kde nastane transformácia text. Rozpoznaný text je následne odoslaný do lokálneho sprostredkovateľa správ, ktorý už následne text odošle do *Node-Red RevPi* a *Node-Red OPC UA*, kde už je na zodpovednosti jednotlivých modulov text spracovať a premeniť na špecifické príkazy.

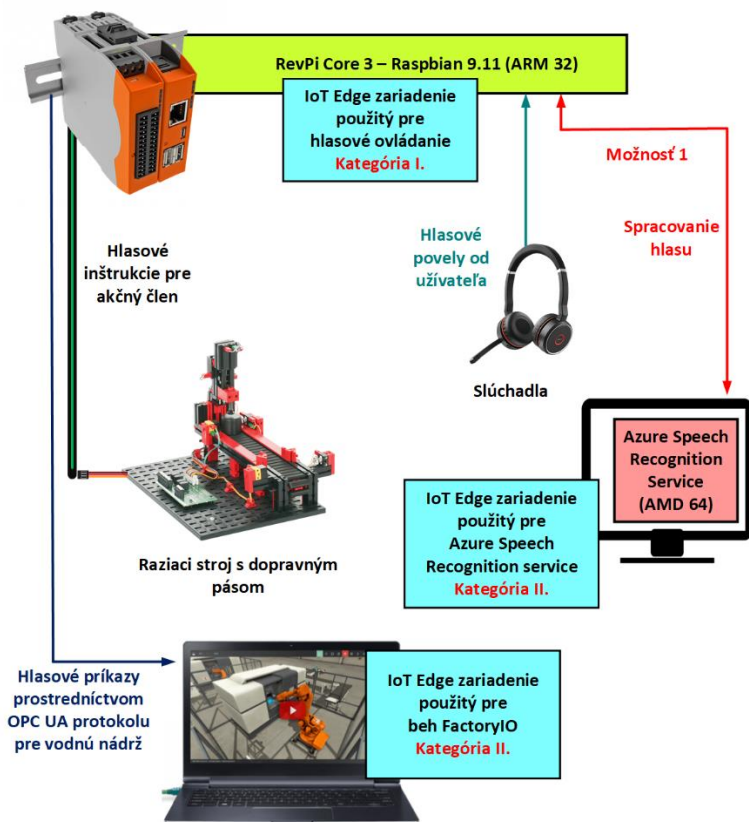


Obr. 2 Architektúra návrhu originálneho ovládania akčného člena hlasom

2.1 Kategorizácia IoT Edge zariadení

IoT Edge zariadenia slúžia na beh vyvinutých alebo nakonfigurovaných modulov. Každý modul je špecifický a ponúka inú funkcionality vyžadujúcu určitý výkon od IoT Edge zariadenia. Z tohto dôvodu boli zariadenia IoT Edge v navrhnujej architektúre rozdelené do dvoch kategórií a klasifikované ako (Obr. 3):

- **Kategória I.** – predstavuje kontajnery – moduly, ktoré slúžia na hlasové ovládanie raziaceho stroja s dopravným pásom alebo vodnej nádrže v programe Factory I/O.
 - *Voice recognition modul* – daný navrhnutý modul možno pokladať za hardvérovo nezávislý, nakoľko vyžaduje len operačný systém Linux a pripojený mikrofón. Modul neovláda žiadne špecifické výstupy/periférie zariadenia, kde beží. Modul slúži na prevod hlasu na text a poslanie spracovaného textu do lokálneho sprostredkovateľa správ, odkiaľ sú správy preposlané do určitých koncových modulov.
 - *Node-Red RevPi modul* – navrhnutý modul je závislý na priemyselnom PLC zariadení RevPi, nakoľko dochádza k ovládaniu pripojeného raziaceho stroja s dopravným pásom pomocou periférií zariadenia RevPi. Modul taktiež slúži aj na prevod textu na riadiace príkazy.
 - *Node-Red OPC UA modul* - navrhnutý nezávislý modul slúži na prevod textu na riadiace príkazy a beh OPC UA servera, odkiaľ sa správy putujú do Factory I/O, kde dochádza k ovládaniu vodnej nádrže.
- **Kategória II.**
 - *Factory I/O* – zabezpečuje beh nakonfigurovanej vodnej nádrže a následné ovládanie prostredníctvom príkazov z OPC UA servera.
 - *Azure Speech Recognition service* – je modul od spoločnosti Microsoft, kde dochádza k prevodu reči na text pomocou strojového učenia.



Obr. 3 Navrhnutá kategorizácia IoT Edge zariadení

2.2 Kontajnery pre hlasové ovládanie

Nasledujúce podkapitoly sa venujú opisu návrhu a funkčnosti jednotlivých modulov, ktoré umožňujú riadenie koncového mechatronického zariadenia alebo zariadenia navrhnutého a bežiacieho v digitálnej podobe.

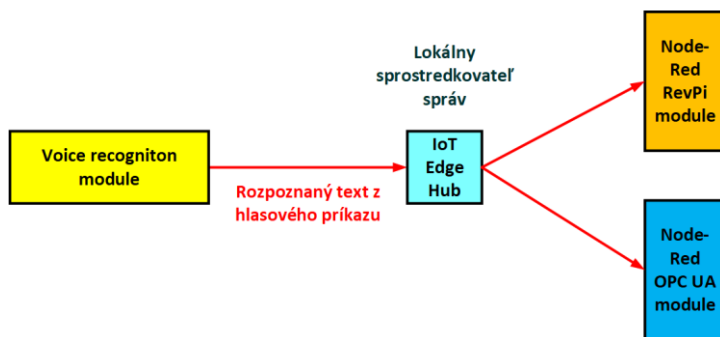
2.2.1 Voice recognition modul

Voice recognition modul slúži na transformáciu hlasu na text, ktorý je možné následovne transformovať na jednotlivé riadiace povelý. Taktiež je zodpovedný za poslanie rozpoznávaného textu do lokálneho sprostredkovateľa správ/broker-u IoT Edge

Hubu, ktorý následné správy doručuje modulom ako je *Node-Red RevPi* a *Node-Red OPC UA*.

Modul dokáže fungovať nezávisle od hardvéru, pričom má závislosť na operačnom systéme Linux. Modul je vytvorený spôsobom pri ktorom dochádza k automatickému rozpoznaniu pripojeného mikrofónu a inštalácii potrebných závislostí, takže nie je vyžadovaná interakcia od koncového používateľa.

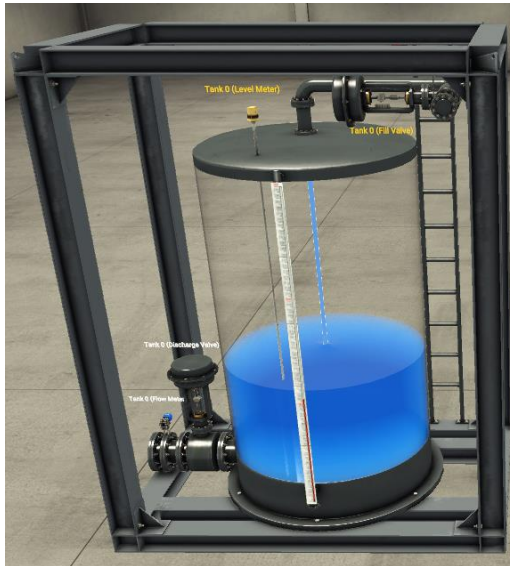
Dôležitú úlohu tu zohráva servis *Azure Speech Recognition* servis pre prevod reči na text pomocou strojového učenia od spoločnosti Microsoft. Knižnica ponúka aj bezplatný prevod reči na text po dobu 5 hodín počas mesiaca. Priemerný hlasový príkaz trvá v priemere 6 sekúnd, čo predstavuje približne 3000 bezplatných príkazov. Pokiaľ dôjde k prečerpaniu bezplatného balíka, 1 hodina prevodu reči na text stojí približne v prepočte 1 euro [11].



Obr. 4 Presun správ z Voice recognition modulu do iných modulov

2.2.2 Node-Red OPC UA modul

Ako už napovedá názov modulu Node-Red OPC UA, modul slúži na ovládanie zariadenia pomocou komunikačného protokolu OPC UA za využitia prostredia pre tokovo-orientované programovanie Node-Red, vytvoreného na báze runtime engineu Node.JS. Ako zariadenie pre demonštráciu hlasového riadenia bola zvolená vodná nádrž (Obr. 5) vytvorená prostredníctvom programu Factory I/O. Factory I/O bol zvolený aj z dôvodu podpory protokolu OPC UA, ktorý sa pomaly stáva štandardom v priemyselnej komunikácii, pričom ponúka interoperabilitu a komunikáciu naprieč automatizačnou pyramídou.



Obr. 5 Vodná nádrž navrhnutá vo Factory I/O

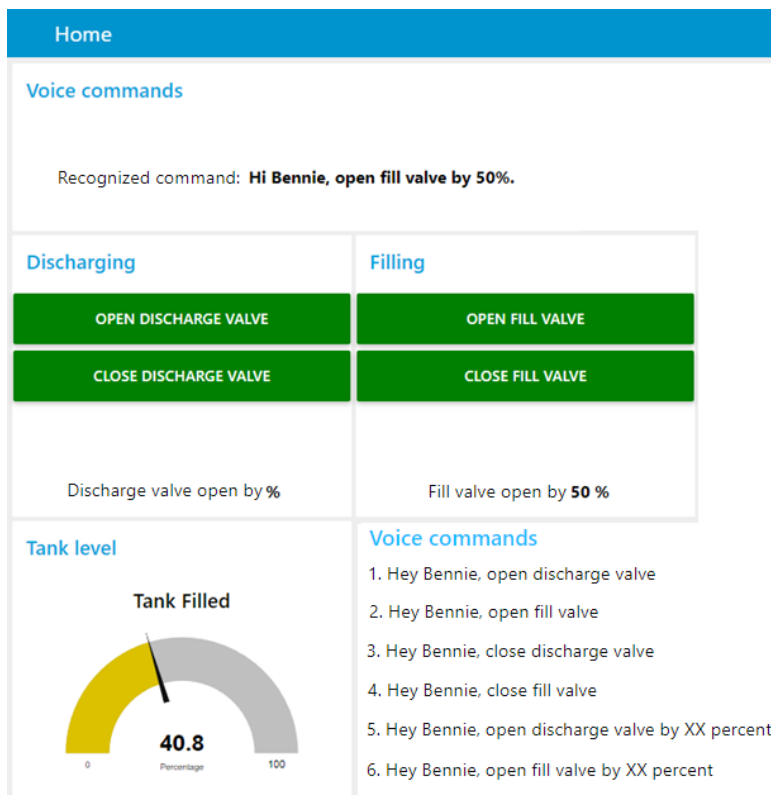
Modul *Node-Red OPC UA* slúži na beh OPC UA servera a prevod získaného textu z reči na špecifické riadiace príkazy. Jeho súčasťou je taktiež aj navrhnutý riadiaci panel (Obr. 6). Factory I/O zabezpečuje beh navrhnutej vodnej nádrže a vystupuje v architektúre ako OPC UA klient.

Riešenie ponúka možnosť aj manuálneho ovládania vodnej nádrže pomocou tlačidiel, avšak v tomto prípade je otvorenie/zatvorenie vypúšťacie/napúšťacieho ventilu o hodnotu 10 percent.

Riadiace príkazy, ktoré sú súčasťou Node-Red aplikácie (Obr. 6) a riadiaceho panelu. Riešenie podporuje momentálne 6 príkazov v angličtine:

1. *Hey Bennie, open discharge valve* - vypúšťací ventil bude otvorený o 10% (preddefinovaná hodnota)
2. *Hey Bennie, open fill valve* - napúšťací ventil bude otvorený o 10% (preddefinovaná hodnota)
3. *Hey Bennie, close discharge valve* - vypúšťací ventil bude zatvorený
4. *Hey Bennie, close fill valve* - napúšťací ventil bude zatvorený

5. *Hey Bennie, open discharge valve by XX percent* - vypúšťací ventil bude otvorený o hodnotu definovanú nami v percentách
6. *Hey Bennie, open fill valve by XX percent* - napúšťací ventil bude otvorený o hodnotu definovanú nami v percentách



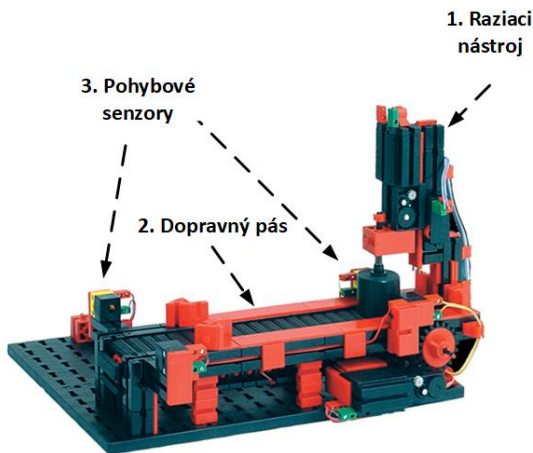
Obr. 6 Riadiaci panel pre vodnú nádrž

2.2.3 Node-Red RevPi modul

Ako už napovedá názov modulu Node-Red RevPi, modul slúži na ovládanie zariadenia pomocou vstupných a výstupných periférií zariadenia Revolution Pi za využitia prostredia pre tokovo-orientované programovanie Node-Red, vytvoreného na báze runtime enginu Node.JS. Pre demonštráciu ovládania bolo zvolený raziaci stroj

s dopravným pásom od spoločnosti Fischertechnik (Obr. 7), ktorý sa skladá z 3 hlavných častí:

1. Raziaci nástroj
2. Dopravný pás
3. Dva pohybové senzory



Obr. 7 Raziaci stroj s dopravným pásom od spoločnosti Fischer Technik

Node-Red RevPi modul slúži na transformáciu textu na špecifické riadiace príkazy, ovládanie vstupných a výstupných periférií *Revolution Pi*, pričom jeho súčasťou je taktiež aj riadiaci panel. Ako každý modul, aj modul *Node-Red RevPi* je tvorený pomocou docker súboru, ktorý obsahuje inštaláciu potrebných knižníc a automatické nakopírovanie súboru s navrhnutou architektúrou (*flow.json*) do priečinka „/data/“, odkiaľ je celá aplikácia pri štarte modulu načítaná a spustená.

Riadiaci panel na obrázku č. 8 obsahuje informácie ako:

- Rozpoznaný hlasový príkaz, prípadne chybovú hlášku
- LED indikátor signalizujúci, či proces razenia prebieha alebo nie. Červené svetlo signalizuje prebiehajúci proces razenia a zelené svetlo predstavuje, že výrobná linka je pripravená na razenie.
- Výstupné hodnoty senzorov:

- *Object ready* – signalizuje, či sa objekt nachádza na začiatku pásu a je pripravený na začatie procesu
- *Object ready to punch* - signalizuje, či sa objekt nachádza na mieste razenia a je pripravený
- *Punchine machine* - signalizuje, či raziaci nástroj sa nachádza hore alebo dole

Home

Voice commands

Recognized command:
Hey Bennie, turn on punching.
 Error:

Punching machine control

START PUNCHING PROCESS

PUNCHING MACHINE DOWN

PUNCHING MACHINE UP

MOVE BELT BACKWARD

MOVE BELT FORWARD

STOP PUNCHING PROCESS

LED indicator



Sensor results

Object ready	no
Object ready to punch	yes
Punching machine	up

Voice commands

1. Hey Bennie, start punching process
2. Hey Bennie, stop punching process
3. Hey Bennie, punching machine up
4. Hey Bennie, punching machine down
5. Hey Bennie, move belt forward
6. Hey Bennie, move belt backward

Obr. 8 Riadiaci panel pre raziaci stroj s dopravným pásom

Riadiaci panel taktiež obsahuje tlačidlá pre manuálne ovládanie procesu (Obr. 8), ktoré zrkadlia nasledujúce hlasové príkazy:

1. *Hey Bennie, start punching process* - vykoná sa celý raziaci proces
2. *Hey Bennie, stop punching process* - raziaci proces je okamžite pozastavený
3. *Hey Bennie, punching machine up* - raziaci nástroj sa posunie smerom nahor
4. *Hey Bennie, punching machine down* - raziaci nástroj sa posunie smerom nadol
5. *Hey Bennie, move belt forward* - dopravník sa posunie smerom vpred
6. *Hey Bennie, move belt backward* - dopravník sa posunie smerom vzad

3 Experimentálne výsledky a prínosy navrhnutej architektúry

Nasledujúca kapitola obsahuje dosiahnuté experimentálne výsledky a benefity navrhnutej architektúry, pričom jej súčasťou je aj zhrnutie limitácií riešenia. Navrhnuté riešenie vychádzalo z nasledujúcich požiadaviek:

- **Prevod reči na text vykonaný priamo na IoT Edge zariadení**
- **Jednoduchá aktualizácia a distribúcia riešenia na viaceré zariadenia**
- **Viacjazyčná podpora**
- **Aktivácia frázou**
- **Využité technológie kontajnerizácie**

Na základe zadefinovaných kritérií bola vytvorená inovatívna architektúra, ktorá prináša prínosy, ako napríklad:

1. **Inovácia** - Inovatívna architektúra prinášajúca kontajnerizáciu a spracovanie hlasu na priemyselné PLC zariadenie.
2. **Stabilita a nízka latencia** – Ako je možné vidieť na obrázku č. 71, čas odozvy je kratší, keď sa transformácia hlasu na text vykonáva priamo na zariadení IoT Edge a nie v cloude Azure.

Transformáciu hlasu zariadením IoT Edge bolo okolo 2,97 ms, čo znamená približne o 58,37 % lepší čas odozvy, ako odozva cloud-u Azure (obr. 14). Aj v prípade, keď služba Azure Speech Recognition bežala v cloude Azure, odozva transformácia hlasu na text bola okolo 5,9 ms, pri použití internetového pripojenia s rýchlosťou 15 Mbps. Testovanie experimentu prebiehalo v časovom harmonograme medzi ránom a večerom pri 24 °C (4 dni, 7 hodín). Celkovo bolo vykonaných 56 pokusov pre transformáciu reči na text za využitia Edge a Cloud computing-u. Testovanie bolo uskutočnené na zariadeniach danej konfigurácie:

- *Zariadenie kategórie I* – Revolution Pi
 - *Zariadenie kategórie II* – PC s 12 GB RAM a procesor Intel Core i7-8850h
3. **Ochrana údajov** – Keďže spracovanie hlasu sa vykonáva lokálne (Edge computing), údaje neopúšťajú našu lokálnu sieť, čím sa znižuje riziko ich zneužitia spoločnosťami, kde sú uložené. Taktiež sa znižuje riziko možnosti ukradnutia dát, nakoľko sa nemusia cez sieť presúvať do vzdialeného cloudového úložiska. Avšak riešenie ponúka aj možnosť spracovania dát v cloud-e

(Cloud computing), kde je zabezpečená ochrana údajov priamo od spoločnosti Microsoft, vďaka jednotlivým certifikáciám pre prácu s citlivými dátami.

4. **Portabilita** – Moduly boli vyvinuté prostredníctvom technológie kontajnerizácie, vďaka čomu je možné ich využiť aj na iných platformách, ktoré využívajú kontajneri, ako je napríklad AWS IoT Greengrass [12] or Siemens MindSphere [13]. Avšak, aby bolo možné vyvinuté moduly využiť aj v spomenutých riešeniach je nutná malá adaptácia v rámci komunikačných štruktúr medzi modulmi.
5. **Distribúcia a údržba** – Riešenie je možné v krátkom čase jednoducho distribuovať do mnohých iných IoT Edge zariadení. Stačí mať zariadenie IoT Edge, ktoré bude spĺňať požiadavky a je pripojené k Azure IoT Hub-u v cloude Azure. Aktualizácia modulov sa vykonávané na diaľku prostredníctvom cloud-u Azure. Nie je potrebné mať fyzický prístup k zariadeniam.
6. **Jednoduché použitie** – Všetky vytvorené moduly nevyžadujú žiadny vstup od koncového užívateľa. Všetka počiatočná konfigurácia sa vykonáva automaticky, napríklad náhlavná súprava, ktorá je pripojená IoT Edge k zariadeniu, je automaticky rozpoznaná a využívaná ako zdroj hlasu.
7. **Protokol OPC UA** – Vďaka využitiu protokolu OPC UA v module *Node-Red OPC UA* získavame interoperabilitu, ktorá je dôležitá v moderných priemyselných systémoch.
8. **Úprava modulov** – Moduly *Node-Red OPC UA* a *Node-Red RevPi* sú vytvorené pomocou tokovo-orientovaného programovania Node-Red, ktoré je ľahko pochopiteľné, vďaka čomu sa dá aplikácia jednoducho rozšíriť.
9. **Migrácia na architektúru ARM64** – vytvorené moduly nie sú priamo naviazané na architektúru ARM32 a možno ich jednoducho presunúť na ARM64, zmenou základného docker image z architektúry ARM32 na ARM64.

Navrhnutá architektúra má aj určité limitácie:

- **Závislosť na operačnom systéme Linux**
- **Nastavenie služby Azure Speech Recognition a IoT Hub v cloud-e Azure**

Dané nastavenie služieb si vyžaduje znalosti o kognitívnych službách a IoT v cloud-e Azure. Avšak vďaka dôkladnej dokumentácii od spoločnosti Microsoft, nastavenie služieb nezaberá veľa času.

V tabuľke č. 10 je možné vidieť porovnanie navrhnutej architektúry s inými dostupnými riešeniami na základe zadefinovaných parametrov v úvode kapitoly.

	Prevod reči na text vykonaní na IoT Edge zariadení	Kontajnerizované riešenie	Jednoduchá aktualizácia a distribúcia riešenia na viaceré zariadenia	Viacjazyčná podpora	Aktivácia frázou
Navrhnutá a realizovaná architektúra	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
Valera Román [63]	Nie	Nie	Nie	Áno	Áno
Yvanoff- Frenchin [64]	Nie	Nie	Nie	Áno	Nespomenuté
Tahseen Ali [65]	Áno	Nie	Nie	Nie	Nespomenuté
Martinek [66]	Áno	Nie	Nie	Nespomenuté	Nespomenuté
Benítez- Guijarro [67]	Nie	Nie	Nie	Nespomenuté	Áno
Nasef [68]	Nie	Nie	Nie	Áno	Nespomenuté
Koložvari [69]	Nie	Nie	Nie	Áno	Nespomenuté

Tab. 3 Porovnanie navrhnutej architektúry s inými dostupnými riešeniami na základe zadefinovaných parametrov

Záver

Popularita hlasového ovládania pre IoT a IIoT narastá a v budúcnosti bude musieť čeliť tejto výzve väčšina spoločností. Hlasové ovládanie môže pomôcť v situáciách, kde je fyzický kontakt so zariadeniami ťažký alebo priam nemožný. Hlasové ovládanie taktiež prináša určitý komfort pre koncového užívateľa. Ovládanie hlasom si už našlo svoje miesto v smartfónoch, kde sa bežne používa, a pomaly si získava svoje miesto aj v priemysle. Predložená práca ponúka prehľad dostupných technológií, ktoré je možné využiť pri návrhu architektúry ovládania mechatronického zariadenia hlasovými povelmi.

Vedecké a aplikačné prínosy predloženej dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- Analýza oblastí spracovania hlasu, edge computing-u a nových trendov v priemysle z hľadiska možnosti ich využitia pre návrh modernej metódy ovládania mechatronických zariadení
- Návrh IoT novej architektúry a metódy ovládania mechatronických zariadení s využitím hlasových povelov založenej na edge computing-u a kontajnerizácii
- Implementácia navrhutej IoT architektúry na mikropočítači a priemyselnom PLC zariadení
- Realizácia programového systému na využitie hlasových povelov pre ovládanie mechatronických zariadení v prostredí IoT Edge
- Overenie navrhnutého a implementovaného programového systému na laboratórnom mechatronickom zariadení a virtuálnom modeli

Prezentované výsledky sú založené na návrhu a overení originálnych postupov a metód ovládania mechatronických zariadení. Tieto postupy a metódy využívajú IoT Edge, edge computing v spojení kontajnerizáciou a cloud-om Azure so zameraním na priemyselné PLC zariadenia. Z týchto dôvod práca navrhuje systém, ktorý kombinuje výhody hlasového ovládania ako používateľského rozhrania a edge computing-u zameraného na bezpečnosť osobných dát, nízku latenciu, jednoduchú správu a nasadenie aplikácie pomocou kontajnerizácie.

Významným výsledkom práce je návrh a vývoj aplikačného modulárneho systému s modernou formou rozhrania HMI využívajúceho hlasové povel operátora, ktoré dopĺňa a vylepšuje konvenčné spôsoby ovládania mechatronických zariadení. Nový

aplikačný modulárny systém prináša rýchlosť, jednoduchosť v správe a nasadzovaní vyvinutých aplikácií. Opísaný koncept bol úspešne otestovaný a implementovaný. Toto komplexné riešenie je možné pokladať za vedecký a aplikačný prínos dizertačnej práce k rozvoju vedného odboru kybernetika.

Vedecké a aplikačné prínosy v piatich bodoch predstavujú charakteristiku originálnych postupov a riešení v oblasti digitálnych technológií aplikovaných v riešeníach pre koncept Industry 4.0, ktoré sú zovšeobecniteľné a je ich možné ďalej modifikovať pre ďalší výskum a technickú prax.

Perspektívy pre budúci výskum vidím v možnej autorizácii užívateľov a dosiahnutia dostatočného odstránenia šumu z hlasu v priemyselnom prostredí.

Publikačná činnosť autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- **ADC01:** BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - DRAHOŠ, Peter. Edge container for speech recognition. In *Electronics*. Vol. 10, iss. 19 (2021), Art. no. 2420 [20] s. ISSN 2079-9292 (2020: 2.397 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.360 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85116256301 ; WOS: 000726693100001 ; CC: 000726693100001 ; DOI: 10.3390/electronics10192420.
- **ADC02:** PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - DRAHOŠ, Peter. Asset administration shell design methodology using embedded OPC unified architecture server. In *Electronics*. Vol. 10, iss. 20 (2021), Art. no. 2520 [17] s. ISSN 2079-9292 (2020: 2.397 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.360 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/electronics10202520 ; WOS: 000715604300001 ; CC: 000715604300001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85117093787.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- **AFC01:** PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - DRAHOŠ, Peter. An industrial communication platform for industry 4.0 - case study. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, [9] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039873 ; WOS: 000753938900025 ; SCOPUS: 2-s2.0-85083112238 ; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039873.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- **AFD01:** BEŇO, Lukáš. OPC UA and cloud Microsoft Azure. In *ELITECH'19 [elektronický zdroj] : 21st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 29, 2019*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2019, CD-ROM, [7] s. ISBN 978-80-227-4915-2.
- **AFD02:** BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf - LESKOVSKÝ, Roman. Processing data from OPC UA server by using edge and cloud computing. In *PDeS 2019 : 16th IFAC conference on programmable devices and embedded systems. High Tatras, Slovakia. October 29-31, 2019*. 1. vyd. Laxenburg : IFAC, 2019,

S. 240-245. ISSN 2405-8963. V databáze: DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.645 ; WOS: 000507495200041 ; SCOPUS: 2-s2.0-85081593572.

- **AFD03:** BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf. Voice controlled DC motor using IoT Edge connected to the Azure cloud. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [5] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- **AFD04:** BEŇO, Lukáš - PRIBIŠ, Rudolf. IoT edge container with artificial intelligence for speech recognition. In *ELITECH'21 [elektronický zdroj] : 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [6] s. ISBN 978-80-227-5098-
- **AFD05:** PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš - DRAHOŠ, Peter. Implementation of micro embedded OPC unified architecture server-client. In *PDeS 2019 : 16th IFAC conference on programmable devices and embedded systems. High Tatras, Slovakia. October 29-31, 2019.* 1. vyd. Laxenburg : IFAC, 2019, S. 114-120. ISSN 2405-8963. V databáze: DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.742 ; WOS: 000507495200020 ; SCOPUS: 2-s2.0-85081565329.
- **AFD06:** PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš. Communication platform based on OPC UA aggregating server. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [6] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- **AFD07:** PRIBIŠ, Rudolf - BEŇO, Lukáš. Evaluation of open tools for designing and deploying Industry 4.0. In *ELITECH'21 [elektronický zdroj] : 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [7] s. ISBN 978-80-227-5098-1.
- **AFD04:** BEŇO, Lukáš – KUČERA, Erik - PRIBIŠ, Rudolf. . Voice control of mechatronic devices using Containerization and Edge technology. In *ELITECH'22 [elektronický zdroj] : 24th Conference of Doctoral Students, Jun 1, 2022.* 1. Príspevok bol prijatý a prezentovaný, a bude zaradený v zborníku konferencie.

Zdroje

- [1] L. Beno. (*Operačné systémy a riešenia poskytujúce Edge computing*), Učebný text, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Slovenská technická univerzita. [on-line]. [cit: 2022-3-4]. Dostupné na: <<https://elearning.mechatronika.cool/blog/operacne-systemy-a-riesenia-poskytujuce-edge-computing/>>
- [2] Azure.microsoft.com, 'Azure IoT Edge'. [on-line]. [cit: 2021-11-12]. Dostupné na: <<https://azure.microsoft.com/en-us/services/iot-edge/>>
- [3] Docs.microsoft.com, 'Understand the Azure IoT Edge runtime and its architecture'. [on-line]. [cit: 2021-11-12]. Dostupné na: <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-edge/iot-edge-runtime>>
- [4] L. Beno. (*Docker a kontajnerizácia*), Učebný text, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Slovenská technická univerzita. [on-line]. [cit: 2022-5-4]. Dostupné na: <<https://elearning.mechatronika.cool/blog/docker-a-kontajnerizacia/>>
- [5] E. Stark. (*Moderné metódy ovládania a monitorovania mechatronických systémov s využitím počítačom generovanej reality*), Dizertačná práca, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Slovenská technická univerzita., Bratislava, 2019.
- [6] Developer.amazon.com, 'Using Alexa Skills Kit and AWS IoT to Voice Control Connected Devices'. [on-line]. [cit: 2021-22-5]. Dostupné na: <<https://developer.amazon.com/blogs/post/Tx3828JHC7O9GZ9/Using-Alexa-Skills-Kit-and-AWS-IoT-to-Voice-Control-Connected-Devices>>
- [7] Sachdev, S. - Macwan, J. – Patel, Ch. 2019. (*Voice-Controlled Autonomous Vehicle Using IoT*). Procedia Computer Science, 2020. ISSN: 1877-0509. Dostupné na: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919317223>>
- [8] 'Speech to Text'. [on-line]. [cit: 2021-22-5]. Dostupné na: <<https://azure.microsoft.com/en-us/services/cognitive-services/speech-to-text/#features>>
- [9] Developer.amazon.com, 'Create and Edit Custom Slot Types'. [on-line]. [cit: 2021-22-5]. Dostupné na: <<https://developer.amazon.com/en-US/docs/alexa/custom-skills/create-and-edit-custom-slot-types.html>>

- [10] Beňo L, Pribiš R, Drahoš P. (Edge Container for Speech Recognition). Electronics. 2021; 10(19):2420. Dostupné na: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/10/19/2420>>
- [11] '*Speech Services pricing*'. [on-line]. [cit: 2022-5-12]. Dostupné na: <<https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/details/cognitive-services/speech-services/>>
- [12] 'AWS IoT Greengrass.' [on-line]. [cit: 2022-1-1]. Dostupné na: <<https://aws.amazon.com/greengrass/>>
- [13] 'Siemens MindSphere.' [on-line]. [cit: 2022-1-1]. Dostupné na: <<https://siemens.mindsphere.io/en>>