

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

QuoVadis Research @ FEI



Ročník 1, číslo 1
September 2018

ISSN 2585-9587

QuoVadis Research @ FEI je vedecký časopis, ktorého obsahom sú prezentácie výsledkov vedeckého bádania v oblasti informatických a elektrotechnických vied na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach (FEI TUKE). Časopis obsahuje plnotextové vedecké články, ktorých obsahom sú výsledky dizertačných prác doktorandov a ich školiteľov obhájených v aktuálnom období na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Vedecké články prispievajú k rozšíreniu vedeckých poznatkov v odboroch informatiky a elektrotechniky. Ide o podporu a rozvoj takých odborov ako je výpočtová technika a informatika, počítačové siete, kyberbezpečnosť, mechatronika a automatizácia, kybernetika a umelá inteligencia, multimediálna telekomunikačná technika, aplikovaná informatika, počítačové modelovanie, vybrané oblasti matematiky, hospodárska informatika, elektronika, mikroelektronika a optoelektronika, spracovanie signálov, teoretická elektrotechnika, elektroenergetika a technika vysokých napätí, silnoprúdová elektrotechnika, meracie systémy v elektronike, riadenie elektrotechnickej výroby, materiály a technológie elektroniky, štruktúra a vlastnosti moderných materiálov. Prijaté rukopisy uvádzajú relevantnú medzinárodnú literatúru a popisujú nové objavy, aplikácie nových techník a metód, použitie existujúcej metodológie na nový problém, čím prispievajú k rozširovaniu základných vedeckých poznatkov v danej vednej disciplíne.

Redakčná rada

Šéfredaktor časopisu:

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

Výkonný redaktor:

doc. Ing. Anton Baláž, PhD.

Členovia:

doc. Ing. Jaroslav Porubän, PhD.

odbor: informatika

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

odbor: informatika, kyberbezpečnosť

prof. Ing. Peter Sinčák, CSc.

odbor: kybernetika, umelá inteligencia, inteligentné systémy, aplikovaná informatika

prof. Ing. Ján Paralič, PhD.

odbor: hospodárska informatika

prof. RNDr. Ján Plavka, CSc.

odbor: aplikovaná matematika, počítačové modelovanie

prof. Ing. Jozef Juhár, CSc.

odbor: multimediálne telekomunikácie, počítačové siete

prof. Ing. Michal Kolcun, PhD.

odbor: elektroenergetika a technika vysokých napätí

prof. Ing. Dobroslav Kováč, CSc.

odbor: teoretická elektrotechnika, automatizácia

prof. Ing. Daniela Perduková, PhD.

odbor: elektrotechnika, mechatronika, riadenie elektrotechnickej výroby

prof. Ing. Alena Pietriková, CSc.

odbor elektrotechnológie a materiály

prof. Ing. Ján Šaliga, CSc.

odbor: elektronika, spracovanie signálov, optoelektronika, meranie

prof. RNDr. Ján Ziman, CSc.

odbor: štruktúra a vlastnosti moderných materiálov

Adresa vydavateľa a redakcie: Redakcia časopisu QuoVadis Research @ FEI, Technická univerzita v Košiciach Fakulta elektrotechniky a informatiky, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika, email:quovadis@fei.tuke.sk

Obsah

Príspevok k vývoju rehabilitačných zariadení zdravotne postihnutých pacientov	
<i>Peter Balog, Stanislav Slosarčík, Slovomír Kardoš</i>	4-13
Modelovanie modulárneho multiport meniča	
<i>Milan Biroš, František Ďurovský</i>	13-22
Charakterizácia spekaných spojov na báze nano-častíc striebra	
<i>Tomas Girašek, Alena Pietriková</i>	22-29
Ubiquitous Robotics in Intelligent Space	
<i>Jakub Hvizdoš, Ján Vaščák</i>	29-35
Source Code Annotations in Development Environments Supporting Metadata	
<i>Ján Juhár, Liberios Vokorokos</i>	35-42
Výskum vplyvu elektromagnetických polí na biologické systémy	
<i>Michal Kosterec, Juraj Kurimský, Blažena Vargová</i>	42-52
Bezdrôtové viacpreskokové siete s využitím kognitívneho rádia	
<i>Martin Matis, Ľubomír Doboš</i>	52-69
Systematický vývoj Edge-enabled rámca pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti	
<i>Martin Miškuť, Iveta Zolotová</i>	69-80
Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia	
<i>Matej Oravec, Anna Jadlovská</i>	80-95
Rheological properties of fluids containing nanoparticles	
<i>Katarína Paulovičová, Jana Tóthová</i>	95-102
Abstraction of Grammars using Supercombinators: Summarization of Results	
<i>Michal Sičák, Ján Kollár</i>	102-109
3D object recognition based on symbolization	
<i>Milan Spišiak, Ján Kollár</i>	109-117
Integrating Runtime Metadata with Source Code to Facilitate Program Comprehension: An Overview	
<i>Matúš Sulír, Jaroslav Porubän</i>	117-123
Výskum využitia akumuláčnych zariadení v elektrizačnej sústave	
<i>Martin Vojtek, Michal Kolcun</i>	123-142

Príspevok k vývoju rehabilitačných zariadení zdravotne postihnutých pacientov

Ing. Peter BALOG
Katedra technológií v elektronike
FEI, Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
peter.balog.2@tuke.sk

prof. Ing. Stanislav SLOSARČÍK, CSc.
Katedra technológií v elektronike
FEI, Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
stanislav.slosarcik@tuke.sk

Ing. Slavomír KARDOŠ, PhD.
Katedra technológií v elektronike
FEI, Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
slavomir.kardos@tuke.sk

Abstrakt — V článku je popísaný návrh a realizácia funkčného modelu rehabilitačného zariadenia dolných končatín. Navrhnutý funkčný model umožní riadenie pohybov pacienta na základe signálov zo senzového systému, ktorý je umiestnený v spodnej časti zariadenia. Je popísaná realizácia senzového systému a implementácia všetkých riadiacich funkcií do prenosného mikropočítača za účelom umožniť presun pacienta. Následne je popísané grafické používateľské rozhranie a jeho možnosti. V poslednej časti sú uvedené odporúčania pre prax a ďalší rozvoj.

Kľúčové slová — *rehabilitačné zariadenie; mikrokontrolér; riadenie pohybu; grafické používateľské rozhranie; kontinuálny pasívny pohyb*

Abstract — The article describes design and realization process of a function model for lower limb rehabilitation system. Designed function model of rehabilitation system allows motion control of patient movements, based on signals from the sensor system, which is localized in bottom region of the skeleton. The sensor system realization is also described. Additionally, the implementation of all the control functions to a portable maker board for the portability purpose of the whole system is described. Furthermore, the article describes the graphical user interface and its possibilities. In the last part of the article the next steps for future work are determined.

Keywords — *rehabilitation system; microcontroller; motion control; graphical user interface; continuous passive motion*

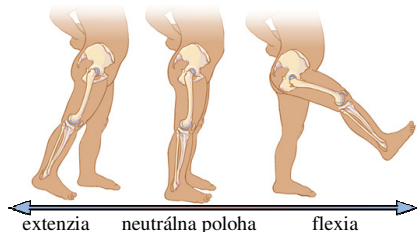
I. ÚVOD

Poranenia chrbtice a miechy sú jednou z najzávažnejších zranení. Funkčné postihnutie býva spravidla takého rozsahu, že postihnutého invalidizuje. Niektorí sú odkázaní na používanie vozíka, niektorí potrebujú pomoc ďalšej osoby a niektorí sú pripútaný na lôžko trvale [1]. Všeobecným cieľom rehabilitácie je plný alebo aspoň čiastočný návrat stratenej

funkcie. Včasná a komplexná rehabilitácia pacientov so správnou aplikáciou pohybovej rehabilitačnej liečby a kompenzačných pomôcok skracuje hospitalizačnú fázu rehabilitácie. Liečebná rehabilitácia s jej jednotlivými stupňami, príslušnými polohovými a pohybovými prvkami, s psychologickou intervenciou, optimálnou ošetrovateľskou starostlivosťou značne ovplyvňuje konečný efekt liečby [2].

K pohybovým prvkom v rámci liečebnej rehabilitácie patrí vykonávanie pasívnych pohybov a postupné zaraďovanie aktívnych pohybov do rehabilitačného programu. Požadované pohyby sú vykonávané pomocou rehabilitačných zariadení. Trendom súčasného návrhu a vývoja rehabilitačnej robotiky je zariadenie, ktoré umožňuje obnoviť stratené motorické funkcie pacienta [3].

Pre precvičovanie pohybového aparátu a navodenie krokového automatizmu chôdze je najčastejšie používaná technika CPM (Continuous Passive Motion - kontinuálny pasívny pohyb). Motorizované zariadenie CPM postupne vykonáva pohyby postihnutou končatinou pacienta podľa predpísaného uhla a rýchlosti počas dlhšieho časového intervalu. Pre účely simulácie rehabilitácie dolných končatín bol realizovaný funkčný model rehabilitačného zariadenia, ktorý poskytuje rehabilitáciu dolných končatín v horizontálnej a vertikálnej polohe spomínanou CPM technikou. Hlavným cieľom pri návrhu bolo dosiahnutie optimálnej rehabilitácie pre ľubovoľného pacienta a redukovať nedostatky doteraz používaných CPM rehabilitačných systémov. Najpodstatnejším nedostatkom býva spojitý pohyb jednotlivých kĺbov pri vykonávaní rehabilitácie. Ďalším nedostatkom je obmedzená extenzia bedrového kĺbu, ktorá je spôsobená tým, že rehabilitácia je vykonávaná v horizontálnej rovine. Naším cieľom bolo zabezpečiť individuálne pohyby jednotlivých kĺbov, a tak umožniť personalizovanú rehabilitáciu dolných končatín.



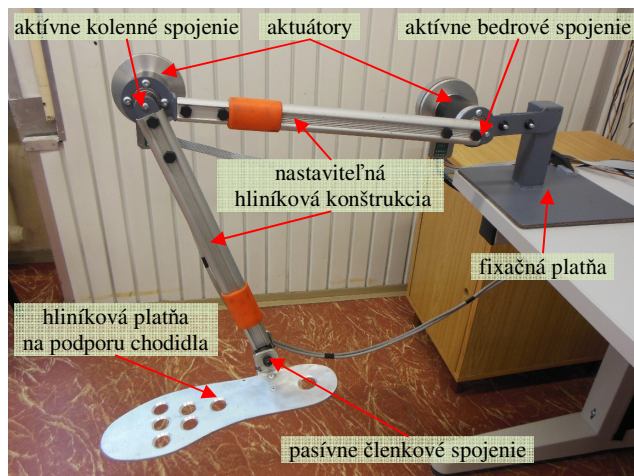
Obr. 1 Znáznomenie flexie/extenzie bedrového kĺbu

Ako je znázornené na Obr. 1, počas prirodzenej chôdze bedrový kĺb okrem flexie vykonáva aj 10-20 stupňovú extenziu. Dostatočný rozsah pohybov, ktoré sú potrebné na vykonávanie každodenných pohybov, bol zabezpečený umožnením rehabilitácie vo vertikálnej rovine.

II. NÁVRH FUNKČNÉHO MODELU REHABILITAČNÉHO ZARIADENIA DOLNÝCH KONČATÍN

A. Návrh mechanickej časti funkčného modelu

Mechanickú kostru alebo skelet funkčného modelu bolo potrebné navrhnuť z materiálu, ktorý je odolný voči mechanickému namáhaniu. Okrem mechanickej pevnosti bola potrebná nízka hmotnosť celej konštrukcie, aby nebola obmedzená mobilita zariadenia. Na základe uvedených kritérií, samotná konštrukcia zariadenia bola realizovaná z hliníka a ocele. Z ocele sú realizované uchytenia jednotlivých aktuátorov a fixačná doska, pomocou ktorej je možné konštrukciu upevniť k stolu v prípade vertikálnej alebo k posteli v prípade horizontálnej statickej rehabilitácie (Obr. 2).



Obr. 2 Konštrukcia funkčného modelu rehabilitačného zariadenia

Konštrukcia predkolennej a stehennej časti nohy bola realizovaná z hliníkových profilov, ktoré sú nastaviteľné podľa dĺžky nohy. Hliník bol použitý kvôli nízkej hmotnosti a vďaka zvolenému profilu poskytuje dostatočnú mechanickú pevnosť. Hliníkové profily slúžia aj ako spojenie medzi jednotlivými aktuátormi zariadenia. Na koncoch predkolennej a stehennej časti sú pripevnené uchytenia jednotlivých aktuátorov. Na podporu chodidla slúži hliníková platňa. Navrhnutý model poskytuje 3 stupne voľnosti (každý kĺb má jeden stupeň voľnosti) v smere sagitálnej roviny (paralelná rovina s rovinou,

ktorá prechádza stredom ľudského tela odhora až nadol a rozdeľuje ho na pravú a ľavú identickú polovicu). Bedrové a kolenné spojenia sú aktívne poháňané, kým členkové spojenie je pasívne. Pasívne členkové spojenie je vybavené mechanickou pružinou, ktorá vráti základňu chodidla do neutrálnej polohy v prípade nezaťaženia.

Nasledujúca tabuľka znázorňuje hlavné rozdiely medzi komerčne dostupným CPM rehabilitačným zariadením Prima Advance a navrhnutým funkčným modelom.

TAB. 1 POROVNANIE FUNKČNÉHO MODELU S KOMERČNÝM REHABILITAČNÝM ZARIADENÍM PRIMA ADVANCE

Zariadenie	Prima Advance	Navrhnutý funkčný model
Poloha rehabilitácie	horizontálna	horizontálna, vertikálna
Extenzia/flexia v kolene	-5° – 115°	-125° – 125°
Extenzia/flexia v bedrovom kĺbe	10° – 75°	horizontálny režim: 0° – 90° vertikálny režim: -20° – 120°
Rýchlosť	40°/min – 145°/min	30°/min – 720°/min

B. Výber aktuátorov funkčného modelu

Aktuátory boli zvolené od firmy Maxon motors a.g. Stanoveným kritériám vyhovujú ploché BLDC motory (BrushLess Direct Current - bezkeľový jednosmerný motor) o výkone 90 W. BLDC motory s elektronickou komutáciou majú magnety na rotore a vinutia na statore, pričom je poloha rotora snímaná pomocou Hallových sond, podľa čoho je regulovaný elektrický prúd vinutiami. Ploché motory sú pomalšie v porovnaní s klasickým vyhotovením, ale na druhej strane poskytujú väčší krútiaci moment, čo je optimálne pre takúto aplikáciu. Ďalším argumentom v prospech plochého motora bola jeho dĺžka kvôli ľahšiemu umiestneniu.

TAB. 2 PREHĽAD DÔLEŽITÝCH PARAMETROV AKTUÁTORA

Typ motora:	BLDC EC 90	Typ enkodéra:	MILE
Menovité napätie:	24 V	Rozlíšenie:	1024/ot
Menovitý výkon:	90 W	Počet kanálov:	2
Menovitý prúd:	6,06 A	Max. pracovná frekvencia:	500 kHz
Menovitý krútiaci moment:	444 mNm	Max. rýchlosť:	5000 ot/min
Typ prevodovky:	GP 52 C	Typ regulátora:	EPOS2 24/5
Redukcia:	156:1	Max. výkon:	120 W
Menovitý krútiaci moment:	30 Nm	Vzorkovacia frekvencia:	1 kHz
Max. účinnosť:	75 %	Účinnosť:	92 %

Motory sú vybavené lineárnym dvojkanálovým enkodérom s rozlíšením 1024 impulzov na otáčku. Digitálny regulátor polohy EPOS2 24/5 umožňuje pomocou softvérových príkazov ovládať jednotlivé motory. Ako z názvu vyplýva, maximálne napájacie napätie riadiacej elektroniky je 24 V a maximálny prúd na výstupe je 5 A. Vzorkovacia frekvencia PID regulátora polohy je 1 kHz. Okrem softvérového riadenia cez USB alebo RS232 poskytuje analógové a digitálne vstupy a digitálne výstupy.

Každý motor je ovládaný vlastným regulátorom polohy a jednotlivé regulátory polohy môžu byť prepojené pomocou zbernice CAN. Motory spolu s planetárnou prevodovkou s prevodom 156:1 poskytujú dostatočnú silu a krútiaci moment na vykonávanie požadovaných pohybov. Planetárne prevodovky od firmy Maxon boli vybraté v keramickom vyhotovení. Keramické komponenty planetárnej prevodovky majú nižšiu mieru trenia medzi prevodmi, a tým vyššiu účinnosť celej prevodovky. Keramické vyhotovenie prevodovky tak umožňuje používať motory s menším výkonom. Menovitý krútiaci moment motora je 0,444 Nm, cez prevodovku s redukciou 156:1 je to 69,264 Nm v ideálnom prípade. Maximálna účinnosť prevodovky je 75 %, čo znamená, že výsledný krútiaci moment v najlepšom prípade je približne 52 Nm (1).

$$M_v = M_m \cdot R \cdot E_{mp} = 0,444 \cdot 156 \cdot 0,75 = 51,948 \text{ Nm} \quad (1)$$

kde M_v je výsledný krútiaci moment [Nm], M_m krútiaci moment motora [Nm], R redukcja prevodovky [-] a E_{mp} maximálna účinnosť prevodovky [%].

Maximálna kontinuálna záťaž prevodovky je obmedzená na 30 Nm, ktorá môže byť zvýšená krátkodobou na 45 Nm. Pomocou regulátorov EPOS2 24/5 boli nastavené horné hranice napájania jednotlivých motorov, aby neboli preťažené prevodovky.



Obr. 3 Motor EC 90 so zabudovaným MILE enkodérom, planetárna prevodovka GP52, digitálny regulátor polohy EPOS2 24/5

C. Návrh softvérovej časti funkčného modelu

V prostredí LabWindows/CVI bol vytvorený softvér umožňujúci riadenie funkčného modelu rehabilitačného zariadenia. Cieľom bolo vytvoriť grafické používateľské rozhranie, ktoré zabezpečuje všetky komunikačné a nastavovacie funkcie a poskytuje jednoduché ovládanie celého systému. GUI (Graphical User Interface - grafické používateľské rozhranie) je rozdelené na päť častí. V prvej časti je možné nastaviť pomocou tlačidla "DeviceSettings" komunikačné parametre ako napríklad prenosová rýchlosť a komunikačný port. Druhá časť grafického používateľského rozhrania slúži na nastavenie horizontálneho alebo vertikálneho rehabilitačného režimu. Tretia časť poskytuje grafickú spätnú väzbu pre užívateľa znázornením polohy bedrového a kolenného kĺbu. Poloha jednotlivých kĺbov je udávaná v stupňoch. Štvrtá časť slúži na nastavenie základných parametrov pohybu. Medzi základné parametre patria rýchlosť a maximálne uhly flexie/extenzie bedrového a kolenného kĺbu, ktoré je možné nastaviť zvlášť pre bedrový a kolenný kĺb. V poslednej časti sú umiestnené ovládacie tlačidlá ako spustenie a zastavenie rehabilitácie a vrátenie systému do východiskovej

pozície. Funkčný rehabilitačný model je vybavený aj vedľajšími nastaveniami pohybu ako zrýchlenie a spomalenie (Obr. 4).

V počítači sú uložené 4 základné programy pre rehabilitáciu. Uložené programy poskytujú simuláciu rehabilitácie vopred nastavenými rýchlosťami a uhlami jednotlivých pohybov na základe konzultácie s rehabilitačnými pracovníkmi. Táto funkcia umožňuje riadenie funkčného modelu rehabilitačného zariadenia pre pacientov.

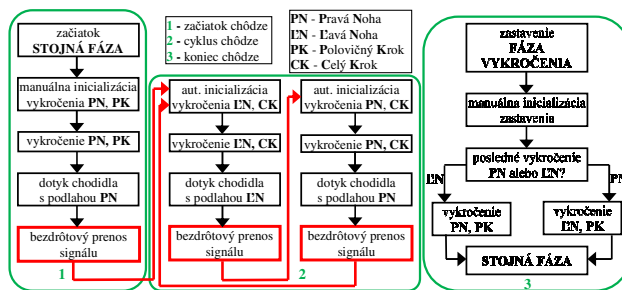


Obr. 4 Grafické používateľské rozhranie funkčného modelu, 1 - základné komunikačné nastavenia, 2 - výber rehabilitačného režimu, 3 - aktuálne pozície bedra a kolena, 4 - nastavenia pohybu, 5 - ovládacie tlačidlá

III. KOMPLEXNÝ NÁVRH FUNKČNÉHO MODELU REHABILITAČNÉHO ZARIADENIA UMOŽŇUJÚCEHO REHABILITÁCIU A PRESUN PACIENTA

Základom je funkčný model popísaný v kapitole 2 rozšírený o vhodný senzorový systém, vyhodnocovací elektroniku pre analýzu postupných krokov a softvér pre riadenie jednotlivých krokov.

Funkčný model rehabilitačného zariadenia umožňujúceho rehabilitáciu a presun pacienta vykonávaním pohybu dolných končatín na základe analýzy dotyku chodidla s podlahou pri postupných krokoch bol realizovaný podľa postupu zobrazeného na vývojovom diagrame (Obr. 5).



Obr. 5 Vývojový diagram navrhnutého systému rehabilitačného zariadenia

Chôdza pomocou funkčného modelu rehabilitačného zariadenia sa začína zo stojnej fázy a prvý krok chôdze je potrebné manuálne inicializovať. Následne riadiaci systém

vykoná autonómne prvý krok podľa vopred zadefinovaných parametrov. Po vykonaní kroku (PN, PK) riadiaci systém čaká na vyhodnotenie dotyku chodidla s podlahou. Následne senzorový modul umiestnený v spodnej časti chodidla vyšle bezdrôtový signál do riadiaceho systému. Na základe prijatého signálu riadiaci systém v prípade pozitívneho vyhodnotenia stability chodidla inicializuje automaticky ďalší krok (LN, CK). Pokiaľ nie je zastavený cyklus, chôdza sa cyklicky opakuje. Zastavenie chôdze je potrebné manuálne inicializovať. Po manuálnej inicializácii zastavenia vyhodnotí riadiaci systém posledný krok pred zastavením a vykoná potrebné pohyby, aby sa rehabilitačné zariadenie vrátilo do pôvodnej stojnej fázy.

Pri návrhu a realizácii funkčného modelu rehabilitačného zariadenia umožňujúceho rehabilitáciu a presun pacienta bolo potrebné riešiť nasledujúce problematiky:

- návrh a vývoj viackanálového senzorového systému pre analýzu dotyku chodidla s podlahou pri postupných krokoch,
- návrh a vývoj vyhodnocovacej elektroniky senzorového systému s možnosťou bezdrôtového prenosu signálu,
- návrh a vývoj grafického používateľského rozhrania s grafickou a zvukovou spätnou väzbou pre pacienta za účelom jednoduchého ovládania funkčného modelu rehabilitačného zariadenia,
- integrácia celého senzorového systému a vyhodnocovacej elektroniky do chodidlovej časti funkčného modelu rehabilitačného zariadenia,
- implementácia všetkých riadiacich funkcií a grafického používateľského rozhrania do prenosného mikropočítača za účelom umožniť presun pacienta.

Počas chôdze je analyzovaná poloha chodidla a v prípade stabilnej polohy je inicializovaný ďalší krok, s možnosťou vytvorenia spätnej väzby pre pacienta na určenie pozície dolných končatín. Cieľom práce je navrhnúť autonómny systém, ktorý dokáže vyhodnotiť stabilitu postoja pri jednotlivých krokoch a podľa nasnímaných a spracovaných bezdrôtových signálov riadiť ďalšie kroky. Na vyhodnotenie stability je potrebné snímať zaťaženie pacienta v oblasti chodidla vo viacerých bodoch pri jednotlivých krokoch. Identifikácia stabilného postoja pri postupných krokoch (ďalšie kroky po prvom vykročení) sa realizuje, ak sú splnené nasledujúce dve podmienky: všetky štyri tlakové senzory musia byť súčasne zaťažené minimálne 10 % váhy pacienta a zároveň celkové zaťaženie (súčet štyroch senzorov) musí byť minimálne 85 % telesnej váhy pacienta.

Senzory pre snímanie tlaku (zaťaženia) sú vyrábané v rôznych vyhotoveniach, pričom konkrétny typ je volený podľa cieľovej aplikácie a požadovanej citlivosti senzora. Pri aplikácii analógových senzorov sú používané prevodníky analógového signálu na digitálny s dodatočnou kalibráciou a kompenzáciou. Inteligentné senzory obsahujú tieto funkcionality integrované vrátane digitálneho predspracovania signálu. Pre použitie v citlivých aplikáciách, napríklad pre medicínske účely, sú vyrábané aj senzory so zvýšenou citlivosťou, odolnosťou voči rušeniu, s možnosťou sterilizácie

a podobne. Zostaveniu senzorového systému predchádzala voľba vhodných tlakových senzorov.

A. Návrh senzorového systému s využitím FSR senzorov

FSR (Force Sensing Resistor) je odporový senzor, ktorého odpor sa mení pri pôsobení tlaku alebo mechanického namáhania. Pozostáva z vodivého polyméru, ktorý mení svoj odpor pôsobením tlaku na svoj povrch. Zložený je z elektricky vodivých a nevodivých častíc suspendovaných v polymérnej matici. Rozmery častíc sú menej ako mikrometer a sú realizované tak, aby kompenzovali teplotnú závislosť a optimalizovali mechanické vlastnosti. Aplikácia tlaku na povrch senzorovej štruktúry spôsobuje, že častice menia vzájomnú polohu a tým sa mení odpor senzorovej štruktúry. V porovnaní s ostatnými tlakovými senzormi sú najväčšou výhodou FSR senzorov ich malé rozmery a hlavne malá hrúbka, ktorá je zvyčajne menej ako 0,5 mm. Ďalšími výhodami sú aj nízke výrobné náklady a dobrá mechanická odolnosť [5].

Rozloženie zaťaženia chodidla je potrebné snímať viackanálovým senzorovým systémom s vhodne rozloženými senzorovými prvkami tak, aby interpretácia ich signálu umožnila analýzu zaťaženia. Požiadavkou je meranie zaťaženia aspoň v štyroch bodoch chodidla. Dva meracie body boli zvolené v oblasti členku a ďalšie dva v oblasti pred klenbou chodidla tak, aby z nameraných údajov bolo možné vyhodnotiť stabilitu postoja. Ďalej aplikácia vyžaduje integráciu celého senzorového systému do spodnej časti chodidla, z čoho vyplýva niekoľko špecifických požiadaviek:

- kompaktný a tenký profil daný svojim predpokladaným umiestnením,
 - odolnosť voči mechanickému namáhaniu tlakom a strihom,
 - odolnosť voči vplyvu vlhkosti v plnom rozsahu RH.
- Na základe týchto požiadaviek bol aplikovaný senzor FlexiForce A201 od spoločnosti Tekscan, pomocou ktorého bol navrhnutý snímací reťazec s nasledovnými prvkami:
- štvorkanálový senzorový systém so senzormi FlexiForce A201 rozloženými podľa fyziológie chodidla,
 - obvod s operačným zosilňovačom zabezpečujúcim požadovaný prevod výstupného signálu senzora na vstup A/D prevodníka,
 - mikrokontrolér pre zber a predspracovanie dát,
 - bezdrôtový komunikačný modul pre prenos dát.

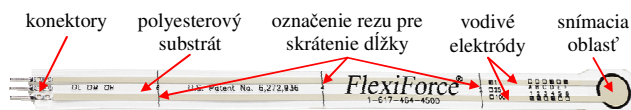
FlexiForce A201 (Obr. 6) je tenký a flexibilný senzor, ktorý sa dá ľahko integrovať do konkrétnej aplikácie s priestorovými obmedzeniami. Tenká konštrukcia a flexibilita senzora umožňuje meranie tlaku medzi ľubovoľnými dvoma povrchmi a poskytuje mechanickú odolnosť pre aplikácie so zaťažením do 453 kg.



Obr. 6 Konštrukcia senzora FlexiForce A201 [5]

Senzor obsahuje dve vrstvy substrátu (flexibilná fólia). Ako substrát je použitý polyester alebo polyimid v prípade aplikácie senzora pri vysokých teplotách. Na každom substráte je aplikovaná vodivá strieborná vrstva, nasleduje sensorová vrstva citlivá na tlak a ďalej adhézna vrstva na spoločné zlamovanie. Aktívnu snímajúcu oblasť senzora definuje kruhová vodivá časť striebornej vrstvy. Strieborná vrstva je predĺžená od snímacej oblasti ku konektorom na druhom konci senzora (Obr. 6).

Celková hrúbka senzora je 0,2 mm, dĺžka vrátane konektora je 191 mm, dĺžku je možné skrátiť podľa potreby. Šírka senzora je 14 mm a priemer aktívnej snímacej oblasti 9,53 mm. Flexibilné substráty sú realizované z polyesterového materiálu známeho pod obchodným názvom Mylar. Senzor obsahuje konektory s tromi vývodmi (dva krajné vývody sú aktívne) s 2,54 mm rozstupom (Obr. 7). Prevádzková teplota senzora je od -40 °C do 60 °C a doba odozvy signálu menej ako 5 μs.

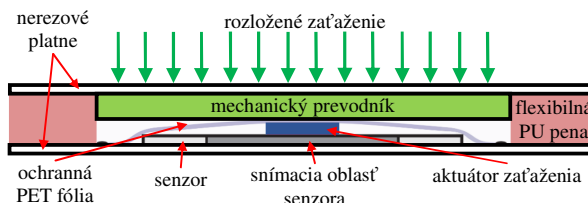


Obr. 7 Tlakový senzor FlexiForce A201 [5]

B. Konštrukčné riešenie sensorového systému

Rozloženie senzorov v spodnej časti funkčného modelu rehabilitačného zariadenia pre analýzu zaťaženia pri postupných krokoch bolo zvolené nasledovne: dva meracie body boli zvolené pre oblasť päty a ďalšie dva pre oblasť prednej klenby.

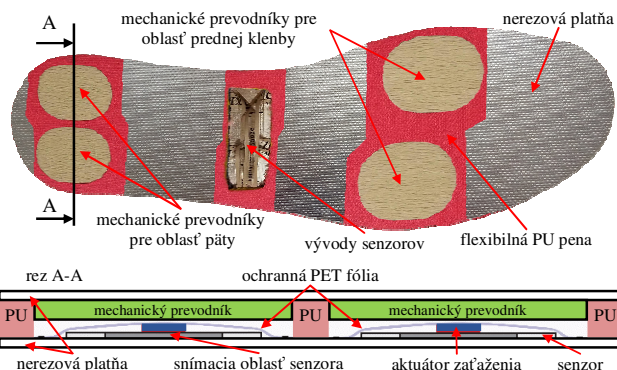
Snímajúca oblasť samotného senzora je nepostačujúca na to, aby bolo možné snímať priamo rozložené zaťaženie, preto bolo potrebné realizovať mechanický prevodník a aktuátor zaťaženia. Mechanický prevodník umožňuje zväčšiť zaťažovaciu plochu, kým aktuátor zaťaženia umožňuje skoncetrovať zaťaženie do snímacej oblasti senzora (Obr. 8).



Obr. 8 Konštrukčné riešenie jedného bloku sensorového systému

Mechanické prevodníky boli vyrobené z liateho polyamidu. Aktuátor zaťaženia je podložka diskového profilu medzi mechanickým prevodníkom a senzorom, ktorá umožňuje skoncetrovať zaťaženie do snímacej oblasti senzora. Podľa odporúčania výrobcu podložka tvorí 70 % snímacej plochy senzora. Odporúčané je realizovať podložku z mäkkšieho materiálu ako mechanický prevodník a flexibilná fólia, na druhej strane je ale potrebné, aby si udržiaval rozmerovú stálosť pri najväčšom plánovanom zaťažení. Tým sa zabezpečí, že v dôsledku stlačenia podložky nedôjde k nadmernému zaťaženiu okrajov, nevytvárajú sa tzv. vysokotlakové oblasti pozdĺž okrajov, ktoré sa vyskytujú pri používaní príliš tvrdých materiálov. Dostatočná rozmerová stálosť ďalej zabezpečuje, že pri maximálnom zaťažení podložka neprekročí hranice snímacej oblasti senzora. Podľa uvedených požiadaviek bola podložka realizovaná z materiálu PVC, ktorého tvrdosť je 82 N.mm⁻², kým tvrdosť mechanického prevodníka je 165 N.mm⁻² a flexibilného substrátu senzora Mylar 140 N.mm⁻².

Pri aplikácii zaťaženia pod iným uhlom ako 90° sa vyskytuje strihová sila, ktorá môže spôsobiť posun diskovej podložky mimo snímacej oblasti. Preto bolo potrebné minimalizovať strihovú silu, ktorá sa vyskytuje pri postupných krokoch. Strihová sila bola minimalizovaná pomocou ochrannej PET fólie, ktorá je umiestnená medzi mechanickým prevodníkom a podložkou (Obr. 9). Podložka je prilepená k substrátu senzora a v prípade pôsobenia strihovej sily posunie sa ochranná fólia nad podložkou a nie samotná podložka.

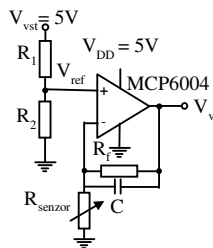


Obr. 9 Realizácia sensorového systému pre pravú dolnú končatinu, vľavo dvojica senzorov pre oblasť päty, vpravo dvojica senzorov pre oblasť prednej klenby

Navrhnutý sensorový systém je vložený medzi nerezové platne. Plniacim médiom medzi nerezovými platňami je flexibilná polyuretánová pena.

C. Návrh a realizácia vyhodnocovacej elektroniky senzorového systému

Pre spracovanie signálu zo senzorov bol použitý obvod so štvoricou operačných zosilňovačov MCP6004 (Obr. 10).

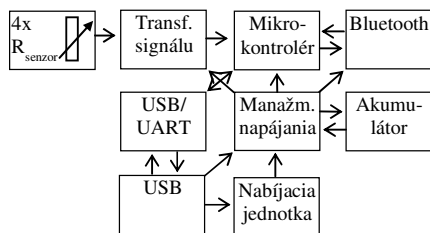


Obr. 10 Jeden blok obvodu s operačným zosilňovačom pre spracovanie signálu tlakových senzorov

Rozsah snímaného tlaku a citlivosť senzora je možné nastaviť pomocou budiaceho napätia V_{ref} a spätnoväzobného rezistora R_f . Znížením hodnoty R_f sa zníži citlivosť a zvýši rozsah meraného tlaku a naopak. Pri zvýšení budiaceho napätia V_{ref} sa zvýši citlivosť a zníži rozsah meraného tlaku a naopak.

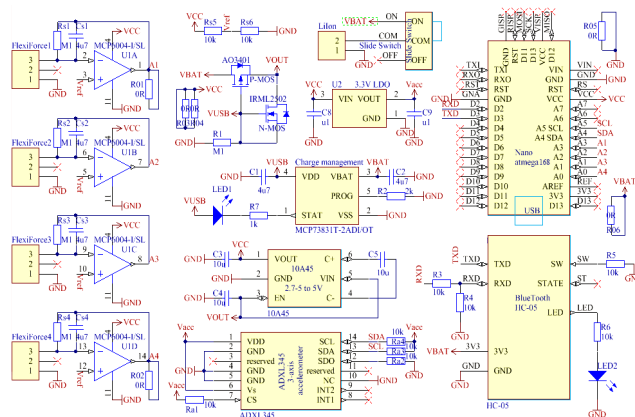
Pri návrhu vyhodnocovacej elektroniky FSR senzorov bolo potrebné riešiť zber údajov zo senzorov, transformáciu, následnú digitalizáciu a bezdrôtovú komunikáciu medzi vyhodnocovacou elektronikou a riadiacim systémom.

Riadiacim modulom vyhodnocovacej elektroniky pre zber, digitalizáciu, spracovanie a prenos nasnímaných údajov je RISC mikrokontrolér ATmega168. Mikrokontrolér je vybavený konfigurovateľnými analógovými a digitálnymi komunikačnými kanálmi, ktoré sú použité na zber údajov. Údaje z operačných zosilňovačov sú odoslané do mikrokontroléra cez analógové vstupy (Obr. 11).



Obr. 11 Bloková schéma obvodov vyhodnocovacej elektroniky senzorového systému

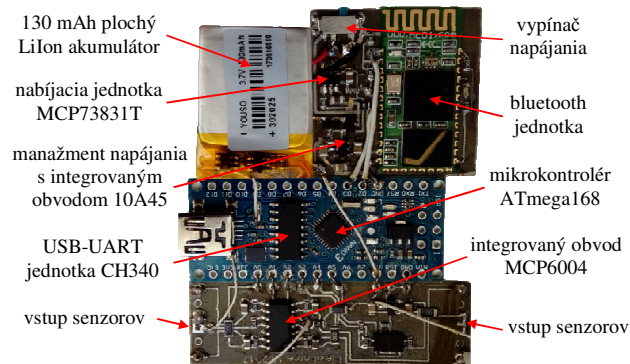
Digitalizáciu údajov realizuje zabudovaný 10-bitový A/D prevodník mikrokontroléra. Predspracované údaje sú následne odoslané do bluetooth jednotky, ktorá zabezpečuje bezdrôtovú komunikáciu medzi vyhodnocovacou elektronikou a riadiacim systémom. Vyhodnocovacia elektronika je vybavená bluetooth jednotkou HC-05 vo verzii 2.0 a komunikuje s mikrokontrolérom pomocou sériovej linky. Vzhľadom k veľkosti celého bluetooth modulu je aj anténa pomerne malá a dosah je preto obmedzený na vzdialenosť maximálne 10 metrov na voľnom priestranstve. Mikrokontrolérový modul je ďalej vybavený komunikačnou jednotkou USB-UART s riadičom CH340 a napájacou jednotkou s nabíjacím obvodom MCP73831T vrátane plochého miniatúrneho akumulátora. Integrovaný obvod 10A45 zabezpečuje konštantné napájacie napätie 5 V (Obr. 12).



Obr. 12 Schéma zapojenia obvodov vyhodnocovacej elektroniky

Ako napájací zdroj je použitý plochý 130 mAh miniatúrny LiIon akumulátor. Nabíjanie umožňuje USB rozhranie prostredníctvom nabíjacej jednotky MCP73831T. Vzhľadom na to, že štyri senzory majú špičkový odber prúdu 0,4 mA, mikrokontrolér 9 mA a bluetooth jednotka počas komunikácie 8 mA, celková spotreba elektrickej energie pri napájaní 5 V je 87 mW, čo znamená približne 7,5 hodín prevádzky akumulátora.

Z konštrukčného hľadiska sa vyhodnocovacia elektronika skladá z troch modulov a akumulátora (Obr. 13). Vedľa akumulátora sa nachádza modul manažmentu napájania, ktorý je umiestnený na spoločnej doske s bluetooth jednotkou. Druhým modulom je samotný mikrokontrolérový modul a tretím je obvod s operačnými zosilňovačmi pre transformáciu signálu zo senzorov. Na module s operačnými zosilňovačmi sú umiestnené aj jednotlivé vstupy senzorov. Riadiaci program mikrokontroléra umožňuje inicializáciu kanálov, nastavenie komunikačných protokolov, komunikačných rýchlostí, zber údajov, spracovanie a bezdrôtový prenos údajov cez bluetooth jednotku.

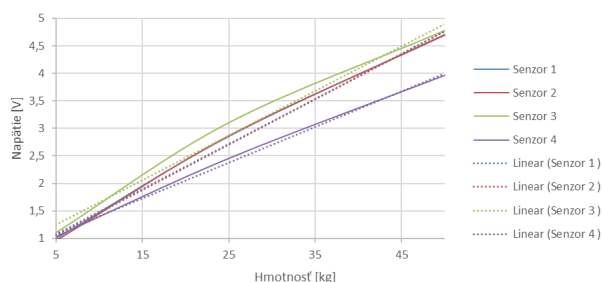


Obr. 13 Realizácia vyhodnocovacej elektroniky senzorového systému

D. Kalibrácia a testovanie senzorového systému

Pred prvým použitím senzorového systému je potrebná kalibrácia zabudovaných senzorov podľa odporúčaného postupu v katalogovom liste. Prvým krokom je zaťaženie jednotlivých senzorov 110% plánovaného zaťaženia po dobu 3 sekúnd cyklicky 4-5 krát. Ďalším krokom je postupné

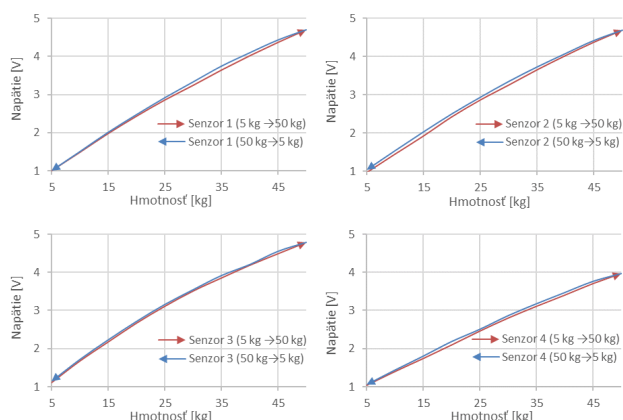
zaťaženie 1/3, 2/3 a celou hodnotou plánovaného zaťaženia a zaznamenávanie výstupných elektronicky spracovaných hodnôt (Obr. 14).



Obr. 14 Grafická závislosť výstupného napätia senzorového systému od hmotnosti

Po kalibrácii, nastavení vhodného rozsahu a citlivosti jednotlivých senzorov nasleduje testovanie navrhnutého senzorového systému. Testovanie bolo vykonané pomocou zariadenia na mechanické skúšky materiálov Testometric M250-2.5CT. Jednotlivé senzory boli zaťažované v rozsahu od 5 kg do 50 kg s rastúcim aj klesajúcim zaťažením.

Na základe testov (Obr. 15) vyplýva, že mechanické prevodníky a aktuátory zaťaženia spĺňajú požiadavky na svoju funkciu.

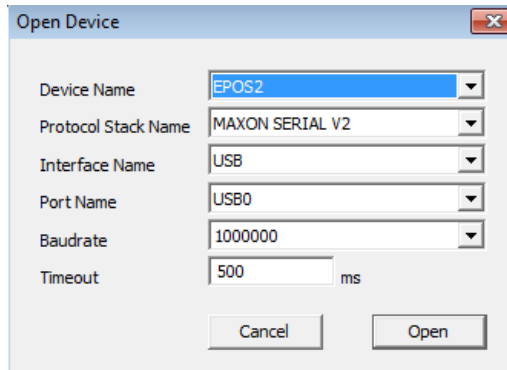


Obr. 15 Grafická závislosť výstupného napätia senzorového systému od hmotnosti pre jednotlivé senzory

E. Návrh grafického používateľského rozhrania

Pre riadenie funkčného modelu rehabilitačného zariadenia na základe analýzy postupných krokov bolo potrebné navrhnuť grafické používateľské rozhranie. GUI bolo vytvorené pod vizuálnym programovacím prostredím Labwindows/CVI. Navrhnuté GUI poskytuje okrem riadenia rôzne nastavovacie funkcie a grafickú spätnú väzbu pre pacienta za účelom zvýšiť účinnosť rehabilitácie.

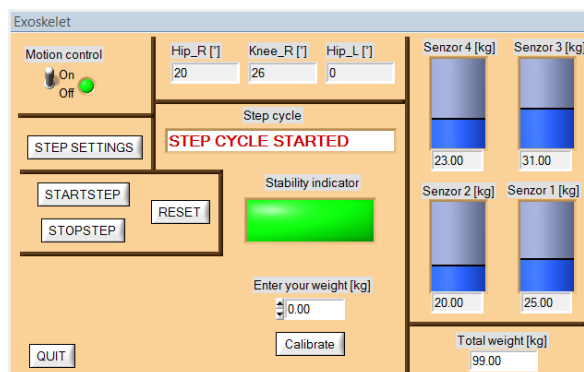
Po prvom spustení aplikácie sa automaticky zobrazí ovládací panel, pomocou ktorého je umožnené nastaviť potrebné komunikačné parametre (Obr. 16).



Obr. 16 Ovládací panel s komunikačnými parametrami

Prvý riadok ovládacieho panelu slúži na voľbu identifikovaného zariadenia, v tomto prípade to je elektronický regulátor polohy EPOS2. V ďalšom je potrebné vybrať vhodný komunikačný protokol a názov rozhrania. Takisto je potrebné nastaviť vhodný komunikačný port a prenosovú rýchlosť komunikácie. Pri ďalšom spustení aplikácie z toho istého počítača nie je potrebné nastavovať komunikačné parametre, aplikácia ich automaticky uloží a ponúkne predchádzajúce nastavenia.

Po nastavení komunikačných parametrov sa zobrazí hlavný ovládací panel (Obr. 17).

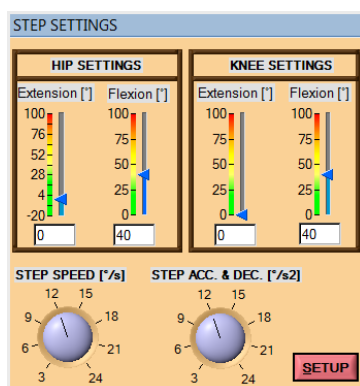


Obr. 17 Hlavný ovládací panel grafického používateľského rozhrania

Správne nastavené komunikačné parametre a pripojený regulátor polohy sú indikované zelenou kontrolkou v ľavom hornom rohu. Vytvorené grafické rozhranie okrem nastavenia a riadenia poskytuje aj grafickú spätnú väzbu o polohe jednotlivých kĺbov a znázorňuje cyklus chôdze pacienta. Hlavný ovládací panel je rozdelený na 4 základné časti. V prvej časti sú umiestnené nastavovacie funkcie. Do druhej časti patria 3 ovládacie tlačidlá ako "START_STEP", "STOP_STEP" a "RESET". Tieto tlačidlá umožňujú spustiť chôdzu podľa nastavených parametrov kroku, zastaviť a v prípade potreby nastaviť jednotlivé aktuátory do východzej stojnej fázy. Tretia časť ovládacieho panelu pozostáva z grafických nástrojov. V hornej časti panelu sú umiestnené numerické monitory, umožňujúce sledovať aktuálne uhly jednotlivých kĺbov. Stavový riadok slúži na znázornenie aktuálneho cyklu chôdze v podobe textu. Na pravej strane hlavného ovládacieho panela sú

umiestnené grafické nástroje pre znázornenie aktuálneho zaťaženia jednotlivých senzorov a celkové zaťaženie (súčet štyroch senzorov). Posledným grafickým nástrojom je tzv. indikátor stabilného postoja. Indikátor znázorňuje automatickú inicializáciu ďalšieho kroku, ak sú splnené stanovené podmienky stabilného postoja pri postupných krokoch. Do štvrtej časti grafického rozhrania patrí softvérová kalibrácia. Tvar a dopad chodidla pri postupných krokoch sú rôzne pre každého pacienta. Aby bolo možné vyhodnotiť stabilný postoj pacienta, bolo potrebné riešiť softvérovú kalibráciu individuálne pre každého pacienta. Pre úspešnú softvérovú kalibráciu je potrebné zadať telesnú váhu pacienta a celou váhou zaťažiť senzorový systém.

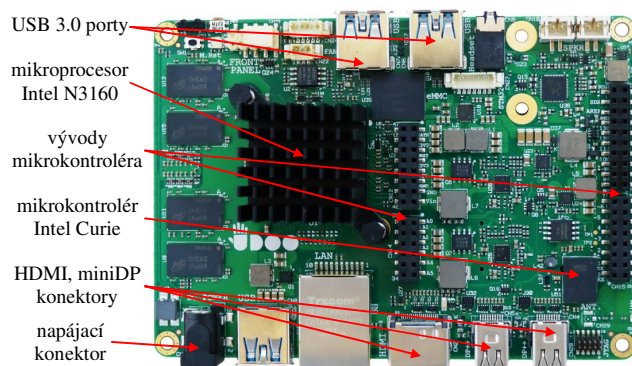
Nastavenie parametrov chôdze, resp. jednotlivých krokov je umožnené po kliknutí na tlačidlo "STEP SETTINGS". Po kliknutí sa zobrazí ovládací panel pre nastavenie parametrov kroku (Obr. 18). Nastavenie maximálneho uhla flexie a extenzie umožňujú posuvné lišty, kým rýchlosť, zrýchlenie a spomalenie pohybu je možné nastaviť pomocou virtuálnych potenciometrov.



Obr. 18 Ovládací panel pre nastavenie parametrov kroku

F. Implementácia všetkých riadiacich funkcií do prenosného mikropočítača

V záverečnej etape bol stolný počítač nahradený mikropočítačom Udoo x86 (Obr. 19).

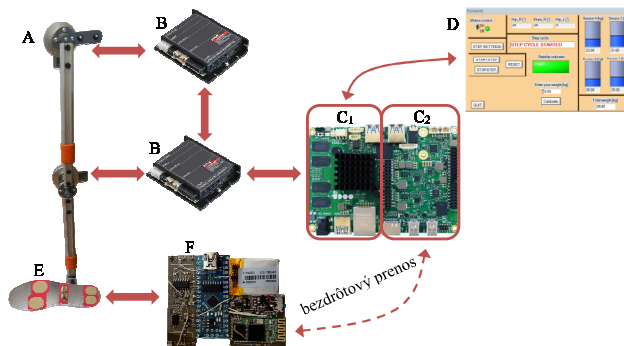


Obr. 19 Prenosný mikropočítač Udoo x86

Udoo x86 je prenosný mikropočítač, ktorý poskytuje plnohodnotný počítač a mikrokontrolér na jednej doske. Riadiace, komunikačné funkcie a grafické používateľské

rozhranie boli implementované do mikropočítača Udoo x86. Mikrokontrolér je použitý na komunikáciu s vyhodnocovacou elektronikou a na spracovanie prijatých údajov. Výkonný procesor s perifériami je použitý na riadenie jednotlivých aktuátorov a na správu grafického používateľského rozhrania.

Riadiaca činnosť funkčného modelu rehabilitačného zariadenia je znázornená na Obr. 20. Základom celého systému je skelet s aktuátormi (A), ktorý vykonáva počítačom riadené pohyby ochrnutou končatinou pacienta. Na ovládanie jednotlivých aktuátorov sú použité elektronické regulátory polohy EPOS 2 (B). Jedna časť mikropočítača (C1) ovláda jednotlivé pohyby podľa vopred zadefinovaných parametrov (uhol flexie, uhol extenzie, rýchlosť, zrýchlenie), ktoré je možné nastaviť pomocou grafického používateľského rozhrania (D). Pred spustením rehabilitácie pomocou funkčného modelu je potrebná softvérová kalibrácia dopadu chodidla na senzorový systém (E), ktorý je umiestnený v spodnej časti skeletu. Kalibrácia spočíva v určení váhy pacienta a rozložení tlakov na jednotlivé senzory. Následne je možné spustiť rehabilitáciu a po vykročení (vykonaní prvého cyklu chôdze) riadiaci systém čaká na odozvu zo senzorového systému. Senzorový systém pošle údaje zo senzorov do vyhodnocovacej elektroniky (F), kde sú prijaté údaje predspracované a následne bezdrôtovo odoslané do mikrokontrolerovej časti (C2) mikropočítača. Prijaté údaje v mikropočítači sú spracované a v prípade, že splnia stanovené podmienky pre stabilný postoj, spustený je ďalší krok (vykročení). Podmienkou stabilného postoja je, že všetky štyri tlakové senzory musia byť zaťažené minimálne 10 % váhy pacienta a zároveň celkové zaťaženie (súčet štyroch senzorov) musí byť minimálne 85 % telesnej váhy pacienta. Táto postupnosť sa cyklicky opakuje, kým kroková sekvencia nie je zastavená.



Obr. 20 Riadiaca činnosť funkčného modelu rehabilitačného zariadenia

IV. ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY

Realizovaný funkčný model rehabilitačného zariadenia dolných končatín s využitím senzorového systému na báze tlakových senzorov bol testovaný v laboratórnych podmienkach. Vzhľadom na to, aby zariadenie bolo možné testovať v reálnych podmienkach, je potrebné ho modifikovať. Je nevyhnutná integrácia senzorového systému do spodnej časti zariadenia tak, aby senzorový systém a chodidlová časť zariadenia vytvorili jeden funkčný celok. Ďalej je potrebné realizovať fixačné body pre dolnú končatinu, aby bolo umožnené jednoduché nasadenie rehabilitačného zariadenia

pacientovi. Fixáciu dolných končatín je možné riešiť pomocou popruhov v oblasti stehna a predkolenia. Chodidlo pacienta je potrebné uchytiť na troch miestach, aby posun chodidla bol minimálny pri postupných krokoch.

Pre udržanie rovnováhy je potrebná zdravotná pomôcka ako barle alebo chodítko. Dalším vylepšením je možnosť ovládania rehabilitačného systému pomocou fyzických tlačidiel umiestnených na barlách alebo na chodítku. V prípade použitia chodítka je možné na ňom umiestniť aj dotykový monitor s plnohodnotnou grafickou spätnou väzbou a ovládacími funkciami pre pacienta.

Napájanie rehabilitačného zariadenia je možné riešiť pomocou Lítium-iónových akumulátorov. Akumulátory môžu byť umiestnené v batohu v prípade použitia barle alebo v spodnej časti chodítka. Hlavne kvôli hmotnosti akumulátorov je výhodnejšie použiť chodítko.

Perspektívnym vylepšením zariadenia je umožnenie ukladania jednotlivých parametrov chôdze, ktoré pacient vykoná pomocou rehabilitačného personálu a následné umožnenie rehabilitácie podľa uložených parametrov chôdze bez pomoci rehabilitačného personálu. Takáto úprava vyžaduje modifikáciu senzorového systému a softvérovej časti vyhodnocovacej a riadiacej elektroniky.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] I. Dolan, T. Šrámková.: Úrazy miechy, incidencia na Slovensku a prevencia, *ViapRACTICA* 10(5), 2013.

- [2] A. Gúth, V. Lánik: Liečebná rehabilitácia. *Rehabilitácia*, 3-8, 2009. ISSN: 0375-0922.
- [3] S. Vítečková, M. Jiřina, R. Krupička.: Exoskelety a aktivní ortézy dolních končetin: přehled. *Pohybové ústrojí*. 2011. ISSN: 1212-4575.
- [4] R. Salter, The sooner the joint is moved the better. *Kinetec*.
- [5] FlexiForce® Force Sensor Design & Integration Guide, FlexiForce, Tekscan, Inc.
- [6] P. Balog, S. Kardoš, S. Slosarčík. Control electronics for function model of rehabilitation system. 2017. *ADEPT 2017*. Žilina, UŽ. s. 185-188. ISBN 978-80-554-1342-6.
- [7] Medicínska Technika, Kolenní motorová dlahá PRIMA ADVANCE, Kinetec.
- [8] P. Dungl.: *Ortopedie*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005, 1273 s. ISBN 80-247-0550-8.
- [9] F. Věle.: *Kineziologie: přehled klinické kineziologie a patokineziologie pro diagnostiku a terapii poruch pohybové soustavy*. 2. vyd. Praha: Triton, 2006, 375 s. ISBN 80-725-4837-9.
- [10] I. Vařeka.: *Kineziologie nohy*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-2432-3.
- [11] H. Kazerooni.: *Exoskeletons for Human Power Augmentation*. [online]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE. ISBN: 0-7803-8912-3.
- [12] G. Miguel.: *Studyblue: Gait* [online]. Dostupné na internete: <https://www.studyblue.com/notes/n/gait/deck/13079492>
- [13] RECK.: *Pohybové léčebné přístroje MOTOMed* [online]. Dostupné na internete: http://www.motomed.cz/medizin_01_de/themen_01_de/start_01/fset_start_01.html

Modelovanie modulárneho multiport meniča

Ing. Milan Biroš

Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovakia
milan.biros@tuke.sk

doc. Ing. František Ďurovský, PhD.

Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovakia
frantisek.durovsky@tuke.sk

Abstrakt—Článok sa venuje metodike modelovania a riadenia modulárneho multiport meniča s magnetickou väzbou realizovanou separátnymi transformátormi. Predstavená metóda modelovania využíva Fourierove rady. Z modelu boli odvodené dva typy riadenia. Riadenie vzájomným fázovým posunom. Šírkové riadenie pracuje s pevným fázovým posunom a zmenou striedy optimalizuje prúd tečúci sériovo zapojenými sekundárnymi vinutiami transformátorov.

Keywords—multiport; fázové riadenie; Fourier model;

Abstract— This article is aimed on modeling and control method of modular multiport converter with separate transformers as magnetic coupling. Presented method uses Fourier series. Two different control methods were derived from that model. Phase shift control operates with fixed switching duty cycle and controls mutual phase shift. Width control operates with fixed phase shift and by controlling switching duty cycle reduces currents flowing through secondary windings.

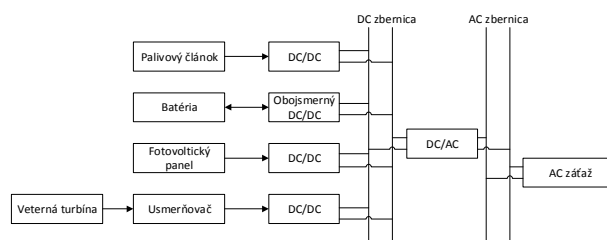
Keywords—multiport; Phase control; Fourier modeling;

I. ÚVOD

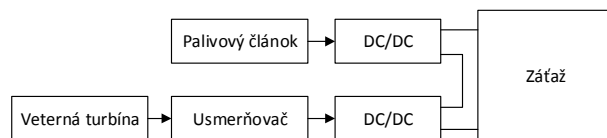
V dnešnej dobe sa kladie stále väčší dôraz na ekologické spôsoby prepravy. Hlavným ťažiskom tejto myšlienky sú elektrické a hybridné vozidlá. Uvedené vozidlá predstavujú z hľadiska elektrickej palubnej siete viaczdružové systémy, t.j. obsahujú niekoľko zdrojov a spotrebičov elektrickej energie s odlišnými napájacími parametrami. V súčasnosti je najpreferovanejším spôsobom prepojenia viacerých zdrojov/spotrebičov využitie separátnych meničov energie pripojených k spoločnej zbernici.

Na Obr. 1, je schematicky znázornené paralelné zapojenie separátnych meničov. Každý zo zdrojov je pripojený k spoločnej zbernici prostredníctvom vlastného meniča. V závislosti od typu zdroja môžu byť meniče obojsmerné alebo jednosmerné. Vďaka prítomnosti spoločnej zbernice môžu byť meniče riadené nezávisle na sebe. To znamená, že každý menič riadi tok energie prislúchajúceho zdroja. Pre lepšie riadenie systému ako celku je vhodné doplniť nadradené riadenie. Jeho úlohou je priamo riadiť tok energie medzi jednotlivými zdrojmi navzájom. Výhodou tejto konfigurácie je jednoduché riadenie. Vďaka spoločnej zbernici sú jednotlivé meniče navzájom nezávislé, preto je možné využívať také DC/DC meniče, ktoré sú najvhodnejšie pre konkrétny zdroj. Na druhej strane, ako

môžeme vidieť aj na Obr. 1, pre napájanie záťaže je nutné energiu konvertovať v niekoľkých krokoch. Práve viacnásobné konverzie znižujú účinnosť takéhoto systému. Prítomnosť komunikačných zariadení môže tiež navýšovať cenu. Táto topológia prepojenia viacerých zdrojov sa zväčša vyskytuje v hybridných elektrárňach [1][2][3], veterných a solárnych parkoch [4][5], HEV [6][7], alebo hybridných mikrosieťach [8].



Obr. 1. Paralelné zapojenie meničov



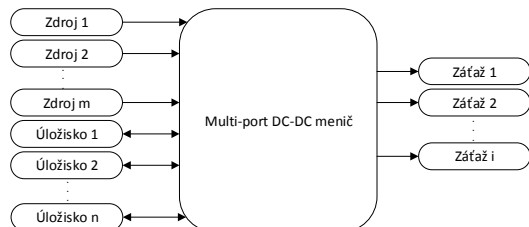
Obr. 2. Sériové zapojenie meničov

Príklad sériového zapojenia meničov je znázornený na Obr. 2. Táto architektúra vznikne sériovým zapojením výstupných stupňov meničov. Výhodou tohto zapojenia je, že výstupné napätie je rovné súčtu napätí jednotlivých meničov. V konkrétnych aplikáciách preto pri správnom návrhu nie je nutné napätie pre napájanie záťaže opäť zvyšovať. Pri sériovom zapojení AC meničov má výstupné napätie nízke harmonické skreslenie [9]. Hlavnou nevýhodou tohto usporiadania je skutočnosť, že výstupný prúd tečie oboma meničmi, čo zvyšuje straty meniča a navýšuje cenu, keďže meniče musia byť dimenzované na vyšší prúd.

Uvedené zapojenie sa využíva hlavne v nízkovýkonových aplikáciách [10] a pri prepájaní zdrojov s rovnakými parametrami [11],[12].

Modernejším a sofistikovanejším spôsobom prepojenia viacerých zdrojov energie je využitie multiport meniča. Multiport meniče (Obr. 3) sú meniče, ktoré umožňujú prepojenie viacerých zdrojov jedným kompaktným zapojením. Výhodou oproti použitiu viacerých separátnych meničov je nižší počet konverzií energie, čo znižuje počet potrebných polovodičov, a

tým zvyšuje účinnosť systému a znižuje jeho cenu. Navyše poskytujú možnosť riadiť viacero vstupov jedným kontrolérom, takže nevyžadujú komunikačné prepojenia. Hlavné rozdiely medzi klasickou viacmeničovou topológiou a multi-port meničom sú uvedené v Tab. 1.



Obr. 3. Multi-port DC-DC menič

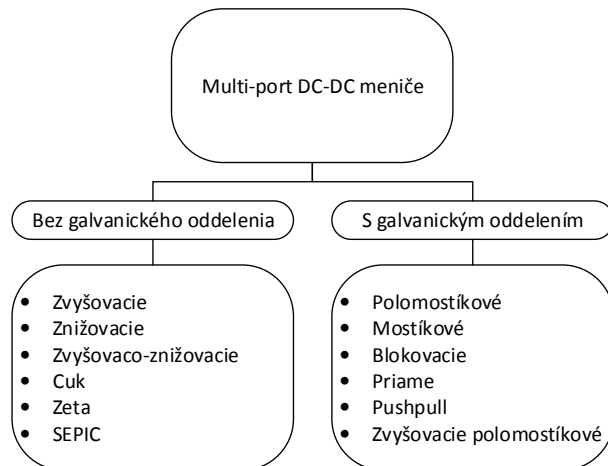
TAB. 1. ROZDIELY MEDZI VIACMENIČOVOU A MULTI-PORT ŠTRUKTÚROU [13][14]

	Viacmeničová architektúra	Multi-port architektúra
Potreba spoločnej zbernice	áno	Nie
Počet krokov konverzie	Viac ako jeden	Minimálny
Riadiaca schéma	Distribúované riadenie	Centralizované riadenie
Manažment toku energie	Komplikovaný, pomalší	Jednoduchší, rýchlejší
Transformátor	Niekoľko	Jeden, viacvinutový
Zložitosť implementácie	Vysoká	Nízka
Počet výkonových komponentov	Vyšší	Nižší
Zložitosť	Zložitá štruktúra	Zložené riadenie
Účinnosť	Nižšia	Vyššia

Multi-port meniče môžeme rozdeliť podľa niekoľkých kritérií. Základné delenie je zobrazené na Obr. 4. Každý z týchto meničov môže mať rozdielne usporiadanie portov, podľa ktorého ich môžeme následne rozdeliť na:

- Jednovstupové viacvýstupové (SIMO) [15][16]
- Viacvstupové jednovýstupové (MISO) [17][18]
- Viacvstupové viacvýstupové (MIMO) [19][20]

Väčšina doteraz publikovaných štruktúr multiport meniča s galvanickým oddelením portov využíva ako magnetickú väzbu viacvinutový transformátor. Takéto meniče sa navrhujú a konštruujú priamo na konkrétnu aplikáciu, a preto nespĺňajú požiadavku na modularitu. Ak vznikne požiadavka na zaradenie ďalšieho zdroja/spotrebiča do zostavy, je nutné transformátor rozobrať a vložiť (vybrať) doňho ďalšie vinutie. Uvedená operácia je vážnym zásahom do konštrukcie meniča a nedá sa robiť bežne užívateľom vozidla. Pre splnenie podmienky modularnosti bol v tejto práci viacvinutový transformátor nahradený viacerými samostatnými transformátormi.



Obr. 4 Rozdelenie multi-port meničov [14]

II. FOURIEROV MODEL MODULÁRNEHO MULTIPORT MENIČ

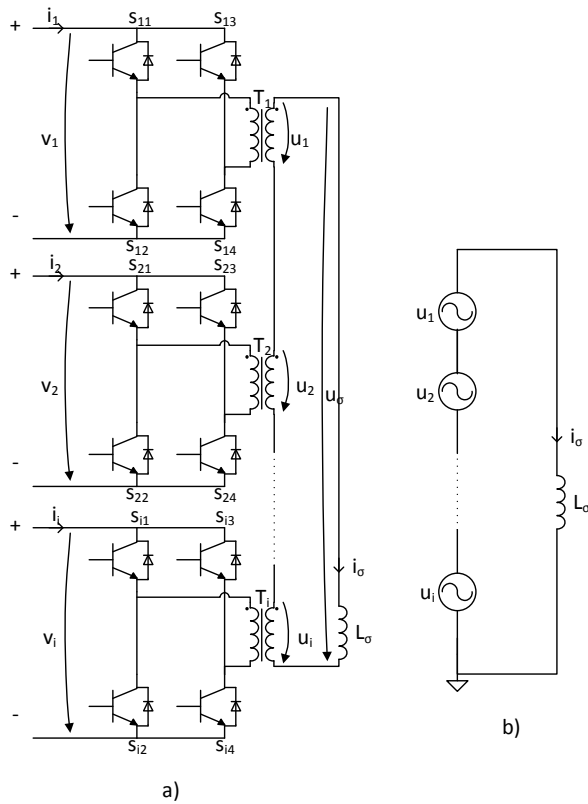
Táto kapitola sa venuje modelovaniu multiport meniča s *i* aktívnymi mostíkmi (AB – Active Bridge), založenom na topológií dvojitého aktívneho mostíka (DAB – Dual Active Bridge). Priebehy prúdov, ktoré v obvode tečú, sú neharmonické. Pre nájdenie analytického modelu je preto využitá Fourierova analýza.

Na Obr. 5. a) je uvedená schema riešeného multiport meniča. V časti b) je uvedená jeho náhradná schéma.

V náhradnej schéme je možné všetky napätia u_k nahradiť napäťovými zdrojmi. Počet napäťových zdrojov je rovný počtu meničov AB, t.j. *i*. Napríklad, ak má menič jeden vstup a jeden výstup počet jeho portov sa rovná 2. Pre takýto menič platí, že $k \in [1, 2]$ $i \in [1, 2]$ a $i=2$.

Spínaním mostíkov jednotlivých portov meniča dochádza k vytvoreniu striedavého obdĺžnikového napätia na primárnych stranách transformátorov (Obr. 6. b)). Tieto napätia indukujú napätie na sekundárnych stranách $u_k(t)$.

Napätie na indukčnosti L_σ vytvára okruhový prúd $i_\sigma(t)$ tečúci obvodom sekundárnych vinutí a indukčnosťou. Ak všetky mostíky spínajú napätie s rovnakou striedou a sú vo fáze, potom je rozdiel napätí na primárnych a sekundárnych stranách transformátorov nulový. Preto nedochádza k toku prúdu i_k medzi *k*-tým zdrojom a obvodom sekundárnych vinutí. Spínanie mostíkov s odlišnou striedou alebo fázou dochádza k nenulovému rozdielu napätí na primárnej a sekundárnej strane transformátorov. Rozdiel napätí iniciuje tok prúdu i_k . Z uvedeného vyplýva, že prenos výkonu medzi jednotlivými portmi AB meniča je možné riadiť pomocou zmeny fázy napätia, alebo striedy spínania.



Obr. 5. a) Multi-port AB menič s i portmi, b) náhradná schéma multi-port AB meniča s i portmi

$$\mathbf{u}'(t) = \begin{pmatrix} u'_1(t) \\ u'_2(t) \\ \vdots \\ u'_i(t) \end{pmatrix}, \mathbf{v}' = \begin{pmatrix} v'_1 \\ v'_2 \\ \vdots \\ v'_i \end{pmatrix}, \mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \end{pmatrix}, \Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_i \end{pmatrix}, \mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

kde $\mathbf{u}'(t)$ je vektor napätí na sekundárnych stranách transformátorov $u'_k(t)$, \mathbf{v}' je vektor napájacích napätí mostíkov v'_k , \mathbf{d} je vektor stried d_k jednotlivých napätí $u'_k(t)$ a Φ reprezentuje fázové posuny Φ_k medzi napätiami $\mathbf{u}'(t)$. Vektor \mathbf{r} predstavuje prevodové pomery r_k transformátorov T_k .

Fourierova transformácia slúži na transformovanie priebehu z časovej do frekvenčnej oblasti. Pri rozvoji priebehu napätia $\mathbf{u}'(t)$ do Fourierovho radu je nutné opísať priebeh napätia pomocou funkcie. Ako je možné vidieť na Obr. 6 b) napätie $u'_k(t)$ na sekundárnej strane transformátora má obdĺžnikový priebeh, preto ho možno opísať rovnicou

$$\mathbf{u}'(t) = \begin{cases} 0, & t \in (0, \Phi - \frac{\pi\mathbf{d}}{2}) \\ \mathbf{v}'_n \mathbf{r}, & t \in (\Phi - \frac{\pi\mathbf{d}}{2}, \Phi + \frac{\pi\mathbf{d}}{2}) \\ 0, & t \in (\Phi + \frac{\pi\mathbf{d}}{2}, \pi + \Phi - \frac{\pi\mathbf{d}}{2}) \\ -\mathbf{v}'_n \mathbf{r}, & t \in (\pi + \Phi - \frac{\pi\mathbf{d}}{2}, \pi + \Phi + \frac{\pi\mathbf{d}}{2}) \\ 0, & t \in (\pi + \Phi + \frac{\pi\mathbf{d}}{2}, 2\pi) \end{cases} \quad (2)$$

Rozvoj priebehu napätí $\mathbf{u}'(t)$ do Fourierovho radu je možné zapísať ako

$$\mathbf{u}'(t) = \mathbf{a}'_0(n) + \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{a}'(n) \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{b}'(n) \sin(n\omega t), \quad (3)$$

kde \mathbf{a}'_0 , \mathbf{a}' , \mathbf{b}' , sú vektory Fourierových koeficientov jednotlivých AB, ktoré môžeme vypočítať pomocou vzťahov

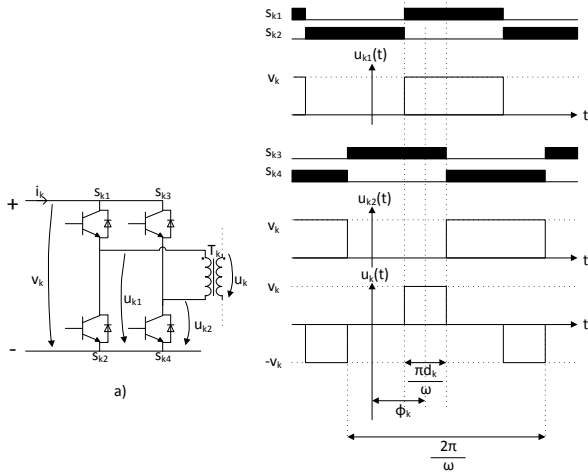
$$\mathbf{a}'_0(n) = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}'(t) d\omega t, \quad (4)$$

$$\mathbf{a}'(n) = \frac{2}{T} \int_0^T \mathbf{u}'(t) \cos(n\omega t) d\omega t, \quad (5)$$

$$\mathbf{b}'(n) = \frac{2}{T} \int_0^T \mathbf{u}'(t) \sin(n\omega t) d\omega t, \quad (6)$$

kde $T=2\pi$ a $n = 1, 2, \dots, \infty$ je rád harmonickej funkcie. Dosadením (1) do (4) až (5) a riešením integral získame získame Fourierove koeficienty, ktoré môžeme zapísať do rovnice pre napätie (3) ako

$$u'_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v'_k r}{\pi} \left(\frac{\sin\left(n\left(\Phi_k + \frac{\pi d_k}{2}\right)\right)}{n} - \frac{\sin\left(n\left(\Phi_k - \frac{\pi d_k}{2}\right)\right)}{n} \right) \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v'_k r}{\pi} \left(\frac{\cos\left(n\left(\Phi_k - \frac{\pi d_k}{2}\right)\right)}{n} - \frac{\cos\left(n\left(\Phi_k + \frac{\pi d_k}{2}\right)\right)}{n} \right) \sin(n\omega t) \quad (7)$$



Obr. 6. Model AB pre Fourierovu analýzu, a) schéma, b) spínané napätia uk1 a uk2 a hradlové signály pre vytvorenie napätia uk

Každý AB je definovaný sadou premenných. Keďže uvažujeme, že počet AB je i , je vhodné si premenné zdefinovať vo forme vektorov nasledovne.

Príspevok napätia $u'_k(t)$ k -teho zdroja k prúdu indukčnosťou L_σ je možné vypočítať ako integrál súčtu Fourierových koeficientov napätia, predelený reaktanciou cievky nasledovne

$$i'_{\sigma,k}(t) = \frac{\int u'_k(t) dt}{L_\sigma} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} a'_k(n) \sin(n\omega t)}{nL_\sigma \omega} + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} -b'_k(n) \cos(n\omega t)}{nL_\sigma \omega} \quad (8)$$

Výsledný prúd $i'_\sigma(t)$ tečúci cievkou L_σ je rovný súčtu príspevkov všetkých zdrojov napätia a je daný ako

$$i'_\sigma(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I'_{\sigma a}(n) \cos(n\omega t) + I'_{\sigma b}(n) \sin(n\omega t) , \quad (9)$$

kde

$$I'_{\sigma a}(n) = \frac{-\sum_{k=1}^i b'_k(n)}{n\omega L_\sigma} , \quad (10)$$

$$I'_{\sigma b}(n) = \frac{\sum_{k=1}^i a'_k(n)}{n\omega L_\sigma} . \quad (11)$$

Efektívnu hodnotu prúdu (RMS) tečúceho indukčnosťou L_σ môžeme vyjadriť pomocou koeficientov prúdu $I'_{\sigma a}$ a $I'_{\sigma b}$ ako

$$I'_\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left((I'_{\sigma a}(n))^2 + (I'_{\sigma b}(n))^2 \right)} \quad (12)$$

a po dosadení (10) a (11) ako

$$I'_\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(\frac{\sum_{k=1}^i a'_k(n)}{nL_\sigma \omega} \right)^2 + \left(\frac{-\sum_{k=1}^i b'_k(n)}{nL_\sigma \omega} \right)^2 \right)} . \quad (13)$$

Činný výkon je vo všeobecnosti daný súčynom napätia na komponente a efektívneho prúdu cez neho tečúceho. Pri harmonických priebehoch tvoria činný výkon príslušné harmonické. To znamená, že časť činného výkonu je daná súčynom prvej harmonickej prúdu s prvou harmonicou napätia, ďalšia časť je tvorená súčynom tretej harmonickej prúdu s treťou harmonicou napätia, atď. Činný výkon k -teho zdroja teda bude daný napätím $u'_k(t)$ na sekundárnej strane transformátora a prúdov ňou tečúcim. Keďže sú sekundárne strany transformátorov všetkých zdrojov sériovo zapojené, tečie nimi rovnaký prúd $i'_\sigma(t)$. Preto činný výkon k -teho zdroja pre n -tú harmonicú je z Fourierových koeficientov možné vypočítať ako

$$P'_k(n) = 0.5 \frac{-\sum_{j=1}^i b'_j(n)}{n\omega L_\sigma} a'_k(n) + 0.5 \frac{\sum_{j=1}^i a'_j(n)}{n\omega L_\sigma} b'_k(n) . \quad (14)$$

Celkový činný výkon dodávaný zdrojom sa rovná súčtu činných výkonov pre všetky harmonické.

$$P'_k = \sum_{n=1}^{\infty} P'_k(n) . \quad (15)$$

Výsledkom Fourierovej analýzy sú nekonečné rady. V praxi vzhľadom na obmedzenú výpočtovú kapacitu riadiaceho procesora nie je možné prakticky využívať nekonečné rady, ale len ich časť. Z tohto vyplýva, že výsledný model bude vždy iba aproximáciou a jeho presnosť bude závisieť od počtu uvážených členov pre vyššie harmonické. Najvyšší podiel na celkovom činnom výkone a prúde cievkou má prvá harmonická prúdu s prvou harmonicou napätia. Vzťah (14) preto upravíme pre $n=1$ a získame výkon prvej harmonickej k -teho zdroja ako

$$P'_k = \frac{8}{\omega L_\sigma \pi^2} v'_k r_k \sin\left(\frac{\pi d_k}{2}\right) \left(v'_1 r_1 \sin\left(\frac{\pi d_1}{2}\right) \sin(\Phi_1 - \Phi_k) + \dots + v'_i r_i \sin\left(\frac{\pi d_i}{2}\right) \sin(\Phi_i - \Phi_k) \right) \quad (16)$$

III. FÁZOVÉ RIADENIE MODULÁRNEHO MULTIPORT MENIČA

Fázové riadenie je založené na zjednodušenom výpočte výkonu pre prvú harmonicú (16). Predpokladáme, že príspevok výkonu ostatných harmonických bude zanedbateľný. Žiadanou hodnotou pre regulátor je $P_{k, \text{žad}}$ a regulovanou veličinou bude fázový posun Φ_k . Vplyv Φ_k na žiadaný výkon je podľa rovnice (16) daný sínusom vzájomných rozdielov fázových posunov všetkých zdrojov navzájom. Z tohto dôvodu nie je možné Φ_k z danej rovnice osamostatniť. Preto zavedieme linearizáciu $\sin(\Phi_j - \Phi_k)$. Keďže vzájomný fázový posun k -teho a j -teho zdroja je vždy v intervale $(-\pi/2 < \Phi_j - \Phi_k < \pi/2)$, pričom $\{j, k \in N \mid j \leq i, k \leq i\}$, budeme $\sin(\Phi_j - \Phi_k)$ aproximovať ako $\sin(\Phi_j - \Phi_k) \approx \Phi_j - \Phi_k$. Táto linearizácia bude vo výsledku vnašať do riadenia nepresnosť. Nepresnosť bude tým vyššia, čím vyšší bude vzájomný fázový posun. S využitím tejto linearizácie preto môžeme rovnicu (16) prepísať ako

$$P'_k \approx \frac{8}{\omega L_\sigma \pi^2} v'_k r_k \sin\left(\frac{\pi d_k}{2}\right) \sum_{j=1}^i v'_j r_j \sin\left(\frac{\pi d_j}{2}\right) (\Phi_j - \Phi_k) \quad (17)$$

Výkon i zdrojov predstavuje i rovníc, ktoré je možné zapísať v maticovom tvare

$$\begin{pmatrix} \frac{P'_1}{v'_1 r_1 X_1} \\ \frac{P'_2}{v'_2 r_2 X_2} \\ \frac{P'_3}{v'_3 r_3 X_3} \\ \vdots \\ \frac{P'_i}{v'_i r_i X_i} \end{pmatrix} = \frac{8}{\omega L_\sigma \pi^2} \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \vdots \\ \Phi_i \end{pmatrix} \mathbf{A} , \quad (18)$$

kde $X_k = \sin\left(\frac{\pi d_k}{2}\right)$ a \mathbf{A} je definované ako

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} v'_1 r_1 X_1 - \sum_{j=1}^i v'_j r'_j X_j & v'_2 r_2 X_2 & \dots & v'_i r_i X_i \\ v'_1 r_1 X_1 & v'_2 r_2 X_2 - \sum_{j=1}^i v'_j r'_j X_j & \dots & v'_i r_i X_i \\ v'_1 r_1 X_1 & v'_2 r_2 X_2 & \dots & v'_i r_i X_i \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v'_1 r_1 X_1 & v'_2 r_2 X_2 & \dots & v'_i r_i X_i - \sum_{j=1}^i v'_j r'_j X_j \end{pmatrix} \quad (19)$$

Pre osamostatnenie Φ je nutné vytvoriť inverznú maticu k matici \mathbf{A} . Determinant matice \mathbf{A} je rovný nule, preto k matici \mathbf{A} neexistuje inverzná matica \mathbf{A}^{-1} . Keďže harmonické napätia sa fázovo posúvajú navzájom, je vhodné určiť referenčnú fázu, napr. $\Phi_1 = 0$. Pri zanedbaní strát meniča musí platiť nulová energetická bilancia, teda

$$P'_i = -\sum_{j=1}^{i-1} P'_j \quad (20)$$

Pri zväžení týchto predpokladov, je možné maticovú rovnicu praviť do redukovaného tvaru \mathbf{A}' . Následným vynásobením inverznou maticou \mathbf{A}'^{-1} z ľava získame výslednú sústavu rovníc pre výpočet fázových posunov jednotlivých mostíkov v závislosti od žiadaného výkonu ako

$$\begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \vdots \\ \Phi_i \end{pmatrix} = \frac{\omega L_\sigma \pi^2}{8 \sum_{j=1}^i v'_j r'_j X_j} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{P'_{1,žiad}}{v'_1 r_1 X_1} \\ \frac{P'_{2,žiad}}{v'_2 r_2 X_2} \\ \frac{P'_{3,žiad}}{v'_3 r_3 X_3} \\ \vdots \\ \frac{P'_{i,žiad}}{v'_i r_i X_i} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Získanou rovnicou (21) je teda možné vypočítať fázový posun všetkých mostíkov modulárneho multiport meniča v závislosti od žiadaného výkonu. Táto maticová rovnica sad á jednoducho prepísať pre ľubovoľný počet portov.

IV. ŠÍRKOVÉ RIADENIE MODULÁRNEHO MULTIPORT MENIČA

Nevýhodou fázového riadenia je, že pracuje s pevnou striedou výstupného napätia mostíkov. Keďže sa hodnota napätí u_k nemení, veľkosť okruhového prúdu I'_σ sa so zmenou fázy mení len minimálne. To znamená, že bez ohľadu na množstvo preneseného výkonu medzi portmi meniča sa I'_σ nebude výrazne meniť. I'_σ je RMS hodnota okruhového prúdu v obvode sekundárnych vinutí. Jeho tok spôsobuje zahrievanie obvodu a teda predstavuje straty. Keďže I'_σ sa mení len minimálne, môžeme straty spôsobené jeho cirkuláciou považovať za konštantné. Z toho vyplýva, že menič má

najvyššiu účinnosť vtedy, ak prenáša maximálny výkon. Pri konštantných striedach d_k je maximálny výkon prenášaný medzi portmi vtedy, ak je ich vzájomný fázový posun rovný $\pi/2$. Preto fázový posun zdrojov voči referencii bude rovný nule a posun spotrebičov bude rovný $\pi/2$. Takýmto rozdelením portov meniča na zdroje a spotrebiče je možné riadiť smer toku výkonu medzi portami. Veľkosť toku bude riadená zmenou striedy d_k napätia $u'_k(t)$. Pri nevhodnom zvolení striedy d_k môžu nastať dve situácie. Pri malej striede hrozí, že port neprenesie požadovaný výkon. Pri zbytočne veľkej hodnote striedy zasa bude v obvode sekundárnych vinutí cirkulovať vyšší prúd ako je na prenesenie žiadaného výkonu potrebné.

V nasledujúcom texte je uvedený postup riešenia optimalizačnej úlohy metódou Lagrangeových multiplikátorov. Následne je riešená konkrétna úloha optimalizácie prúdu i_σ pre menič s počtom portov $i=2$.

Úlohou bude minimalizovať prúd I'_σ tečúci sekundárnymi vinutiami transformátorov, daný vzťahom (13). Keďže ω, L_σ , sú konštanty, môžeme ju prepísať ako

$$2 \left(\frac{\pi \omega L_\sigma I'_\sigma}{4} \right)^2 = \left(\sum_{k=1}^i v'_k r_k X_k \sin(\Phi_k) \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^i v'_k r_k X_k \cos(\Phi_k) \right)^2 \quad (22)$$

Keďže konštanty nie je možné riadením meniť, minimalizovanú funkciu bude predstavovať pravá strana rovnice (22). Roznásobením (22) a uvážením predpokladu, že referenčný fázový posun $\Phi_1 = 0$ a maximálny činný výkon je prenášaný pri $(\Phi_1 - \Phi_2) = \pi/2$, získame minimalizovanú funkciu. Keďže $\cos(\pi/2) = 0$, zo minimalizovanej rovnice vypadne tretí sčítanec. Preto ju môžeme zjednodušiť ako

$$f(X_1, X_2) = (v'_1 r_1 X_1)^2 + (v'_2 r_2 X_2)^2 \quad (23)$$

Väzobnú podmienku teda definujeme ako

$$g = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{\pi}{2} = 0 \quad (24)$$

Vyjadrením Φ_1 a Φ_2 z rovnice (21) získame

$$g(X_1, X_2) = \arcsin \left(\frac{\omega L_\sigma \pi^2}{8(v'_1 r_1 X_1 + v'_2 r_2 X_2)} \left(\frac{P'_1}{v'_1 r_1 X_1} - \frac{P'_2}{v'_2 r_2 X_2} \right) \right) - \frac{\pi}{2} \quad (25)$$

Ak zanedbáme straty meniča, musí platiť zákon zachovania energie, a teda $P'_1 = -P'_2$. Po zohľadnení tohto

predpokladu a získame Lagrangeovu funkciu v tvare

$$L(X_1, X_2, \lambda) = (v'_1 r_1 X_1)^2 + (v'_2 r_2 X_2)^2 + \lambda \left(\arcsin \left(\frac{\omega L_\sigma \pi^2}{8(v'_1 r_1 X_1 + v'_2 r_2 X_2)} \left(\frac{P'_1}{v'_1 r_1 X_1} + \frac{P'_1}{v'_2 r_2 X_2} \right) \right) - \frac{\pi}{2} \right) \quad (26)$$

Parciálnymi deriváciami (26) podľa X_1 , X_2 a λ získame sústavu rovníc, ktorých rovnosť položíme nule. Riešením takejto sústavy je možné získať vzťah

$$v'_1 r_1 X_1 v'_2 r_2 X_2 = \frac{P'_k \pi^2 \omega L_\sigma}{8 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \quad (27)$$

Dosadením $X_k = \sin\left(\frac{\pi d_k}{2}\right)$ a následnou úpravou je možné vyjadriť striedu k -teho mostíka ako

$$d_k = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{|P'_k| \pi^2 \omega L_\sigma}{8 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \frac{1}{v'_k r_k}}\right) \quad (28)$$

Uvedené riešenie je platné pre $i=2$. Ako bolo vyššie spomenuté, maximálny výkon je prenášaný pri vzájomnom fázovom posune $(\Phi_1 - \Phi_k) = \pi/2$. Zároveň je hodnota prúdu I_σ v danom prípade minimálna. Preto s využitím tohto riadenia bude smer toku prúdu riadený fázovým posunom portov nasledovne

$$\Phi_k = \begin{cases} 0 & k\text{-ty port je zdrojom} \\ \frac{\pi}{2} & k\text{-ty port je spotrebičom} \end{cases} \quad (29)$$

Veľkosť výkonu k -teho zdroja bude riadená striedou d_k napätia na sekundárnej strane transformátora, podľa vzťahu (28).

Pre rozšírenie uvedeného spôsobu riadenia pre $i>2$, využijeme predpoklad, že pri zanedbaní strát meniča musí platiť zákon zachovania energie a teda $P_1' + P_2' + P_3' + \dots + P_i' = 0$. Z tohto vyplýva, že súčet výkonov dodávaných do meniča sa musí rovnať súčtu výkonov odoberaných. Označme súčet žiadaných výkonov všetkých zdrojov pripojených k meniču ako P_{in} a súčet výkonov spotrebičov ako P_{out} . Definovanie premenných P_{in} a P_{out} zjednodušuje problém riadenia meniča pre $i>2$ na riadenie meniča pre $i=2$. Vzťah (27) teda môžeme zapísať ako

$$v'_{in} r_{in} X_{in} = \sqrt{\frac{|P'_{in}| \pi^2 \omega L_\sigma}{8 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}} \quad (30)$$

Každý zdroj dodáva do meniča určitú časť celkového žiadaného výkonu. Ak je k -ty zdroj dodávateľom výkonu do meniča, potom platí, že

$$\frac{v'_k r_k X_k}{v'_{in} r_{in} X_{in}} = \frac{P_{k, \text{žad}}}{P_{in}} \quad (31)$$

Dosadením (30) do (31) a následnou úpravou dostaneme vzťah pre výpočet striedy napätia k -teho zdroja, nasledovne

$$d_k = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{|P'_{in}| \pi^2 \omega L_\sigma}{8 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \frac{1}{v'_k r_k}}\right) P_{k, \text{žad}}}{P_{in}}\right) \quad (32)$$

Analogicky je možné striedu napätia k -teho zdroja, ak je spotrebičom vypočítať ako

$$d_k = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{|P'_{out}| \pi^2 \omega L_\sigma}{8 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \frac{1}{v'_k r_k}}\right) P_{k, \text{žad}}}{P_{out}}\right) \quad (33)$$

Keďže sme pri výpočte vychádzali zo zjednodušeného modelu pre prvú harmonickú, v praxi sa môžu objaviť nepresnosti tohto riadenia. Nepresnosti budú o to väčšie, o čo väčší bude vplyv vyšších harmonických napätia a prúdu.

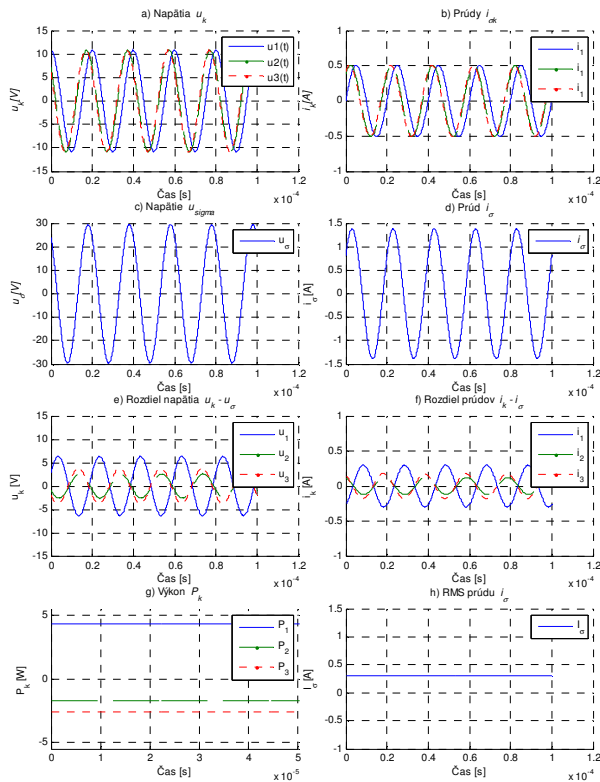
V. POROVNANIE FÁZOVÉHO A ŠÍRKOVÉHO RIADENIA

Za účelom porovnania výsledkov presnosti fázového a šírkového riadenia boli zostavené dva matematické modely multiport meniča v prostredí MATLAB/Simulink. Prvý model je modelom pre prvú harmonickú a druhý model je modelom pre prvých 50 nepárnych harmonických. Pre overenie správnosti modelu a riadenia boli vykonané merania na zostavenom multiport meniči. Ten pozostáva z troch transformátorov s transformačným pomerom 1:1 zapojených do série, spínaných mostíkov ovládaných pomocou mikroprocesora. Napájanie prvého portu zabezpečuje napäťový zdroj, druhý je napájaný z olovenej batérie a tretí je pripojený k rekuperačnému zdroju napätia. Týmto je možné zabezpečiť oba stavy napájania meniča, to znamená stav keď sú k meniču pripojené dva zdroje a jeden spotrebič ako aj stav kedy sú pripojené dva spotrebiče a jeden zdroj. Iné usporiadanie zdrojov a spotrebičov v trojportovom meniči nemá zmysel. Osciloskopicky meranými veličinami sú napätia na výstupe mostíkov ($u_1(t)$, $u_2(t)$ a $u_3(t)$), prúd v obvode sekundárnych vinutí $i_\sigma(t)$ a prúdy na primárnych vinutiach transformátorov $i_1(t)$, $i_2(t)$ a $i_3(t)$. Činné výkony, sme nemali v čase experimentu možnosť merať. Z napätia a prúdu, dodávaného jednosmernými zdrojmi pripojenými k portom meniča vieme určiť celkový príkon na portoch. Z príkonu vieme určiť smer toku výkonu.

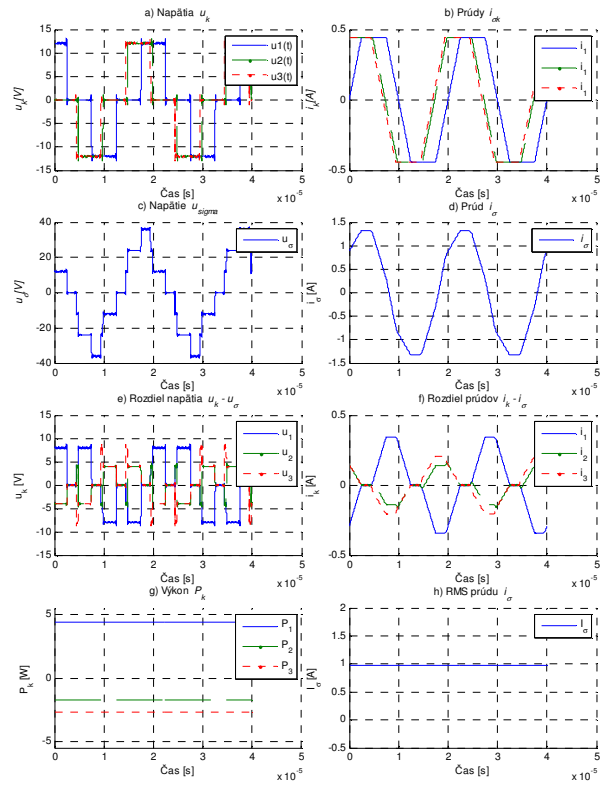
Na Obr. 7 a Obr. 8 sú uvedené výsledné simulačné priebehy fázovo riadeného jedno a n -harmonického modelu pri žiadaných hodnotách $P_{1, \text{žad}} = 5 \text{ W}$, $P_{2, \text{žad}} = -2 \text{ W}$ a $P_{3, \text{žad}} = -3 \text{ W}$. Dosiagnuté hodnoty výkonu sa mierne líšili od žiadaných. Dosiagnuté hodnoty výkonov boli skoro totožné pre oba modely. Čo je zaujímavé je fakt, že pri zjednodušenom modeli to bolo možné s nižšou efektívnou hodnotou prúdu v uzavretom obvode sekundárnych vinutí (na obrázkoch časť h)). To znamená, že jeho veľkosť nie je úmerná prenášanému výkonu. Z toho môžeme dedukovať, že najväčší podiel na výkone majú prvé harmonické napätia a prúdov. Ďalšie harmonické väčšou mierou prispievajú k tvorbe okruhového prúdu i_σ , ktorý spôsobuje zahrievanie obvodu sekundárnych vinutí a predstavuje straty obvodu. Elimináciou vyšších harmonických by teda bolo možné zvýšiť účinnosť prenosu výkonu medzi portami. Eliminovať vyššie harmonické by bolo možné zmenou tvaru spínaného napätia. To však fázové riadenie neumožňuje, pretože pracuje s pevnou striedou. Optimalizácia striedy je realizovaná v šírkovom riadení a teda simulácie šírkového riadenia by mali túto teóriu potvrdiť. Na Obr. 9. sa nachádzajú namerané priebehy napätí a prúdov. Treba pripomenúť že merané prúdy i_1 , i_2 i_3 nie sú totožné so

simulovanými prúdmi $i_{\sigma k}$. Merané prúdy sú totižto prúdmi tečúce primárnymi vinutiami transformátorov, zatiaľ čo $i_{\sigma k}$ predstavujú príspevky jednotlivých portov k celkovému prúdu i_{σ} . Z meraných priebehov prúdov je vidieť, že ich amplitúdy niesú rovnaké. Predpokladáme, že ich hlavnú časť tvoria jalové prúdy tečúce medzi mostíkom a primárnym vinutím a menšiu časť tvoria činné prúdy. Ak je tento predpoklad správny, po aplikácii šírkového riadenia by mali amplitúdy týchto prúdov klesnúť.

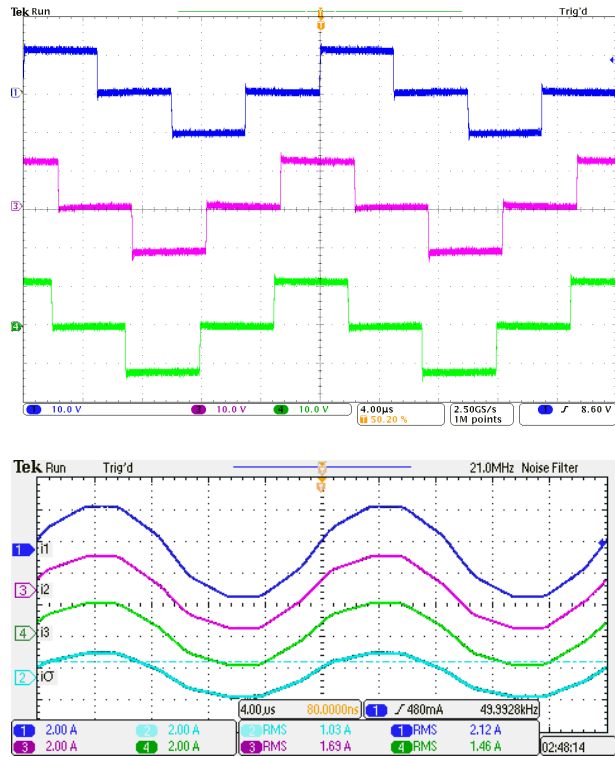
Na Obr. 10 a Obr. 11 sú uvedené výsledné simulačné priebehy šírkového riadeného jedno a n-harmonického modelu pri rovnakých želaných hodnotách ako v prvom prípade. Na Obr. 11a) môžeme vidieť, že šírkové riadenie ovplyvňuje amplitúdu prvej harmonickej napätia a prúdu. Amplitúda prúdu i_{σ} je len o niečo menšia ako pri predchádzajúcom type riadenia. O niečo nižšia je aj jej RMS hodnota I_{σ} . Pri porovnaní všeobecných modelov je tento rozdiel ešte zreteľnejší. Týmto sa nám simulačne podarilo overiť vplyv prúdu i_{σ} na prenášaný výkon ako aj schopnosť šírkového riadenia tento prúd redukovať. Porovnaním nameraných priebehov pri využití fázového (Obr. 9) a šírkového riadenia (Obr. 12) je možné vidieť zníženie amplitúdy prúdov tečúcich primárnymi vinutiami transformátorov ako aj prúdu i_{σ} . To by malo dokazovať redukciiu jalových prúdov tečúcich vinutiami transformátorov.



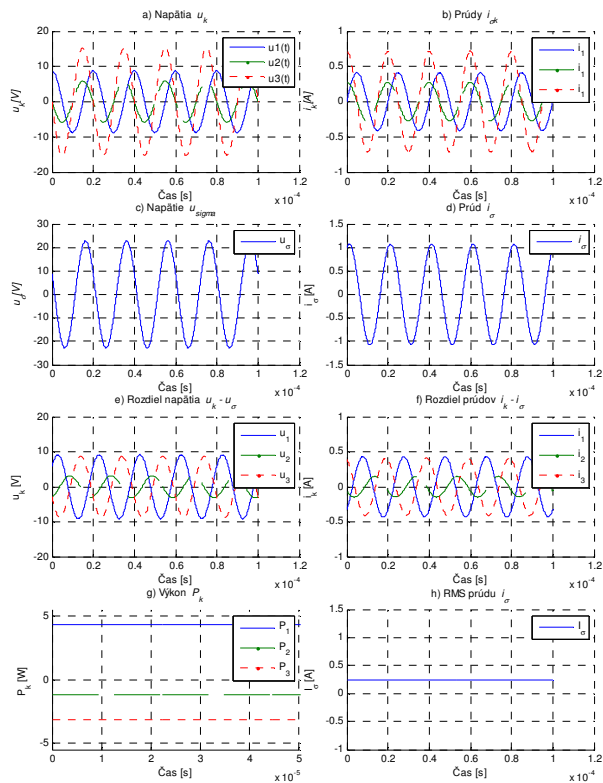
Obr. 7. Výsledné priebehy fázovo riadeného modelu s 1 harmonicou



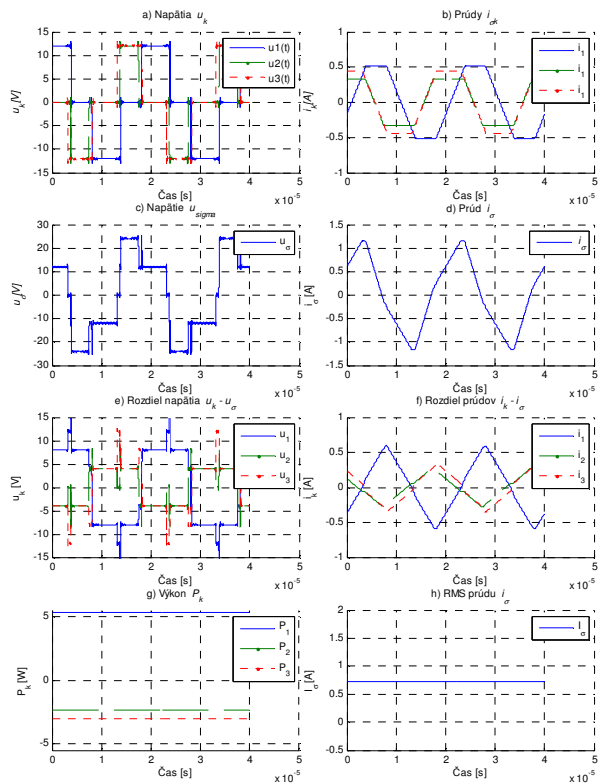
Obr. 8. Výsledné priebehy fázovo riadeného n-harmonického modelu



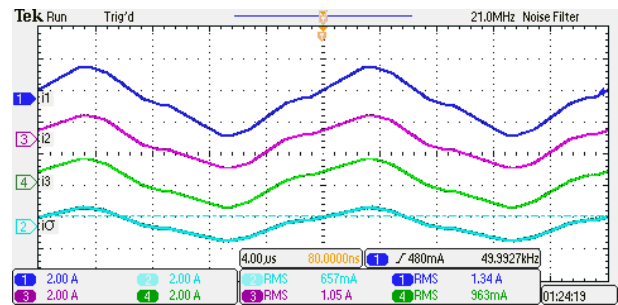
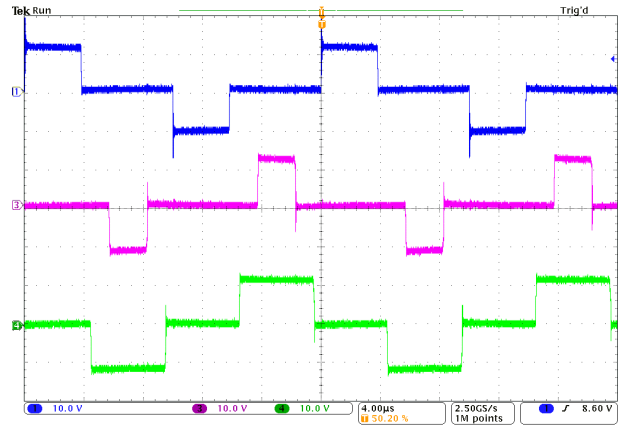
Obr. 9. Namerané priebehy multiport meniča pri fázovom riadení (Hore: $u_1(t)$ - modrá, $u_2(t)$ - fialová, $u_3(t)$ - zelená, Dole: $i_1(t)$ - tmavá modrá, $i_2(t)$ - fialová, $i_3(t)$ - zelená, $i_{\sigma}(t)$ - svetlá modrá)



Obr. 10. Výsledné priebehy šírkového riadeného modelu s 1 harmonickou



Obr. 11. Výsledné priebehy šírkového riadeného n-harmonického modelu



Obr. 12. Namerané priebehy multiport meniča pri šírkovom riadení (Hore: $u_1(t)$ - modrá, $u_2(t)$ - fialová, $u_3(t)$ - zelená, Dole: $i_1(t)$ - tmavá modrá, $i_2(t)$ - fialová, $i_3(t)$ - zelená, $i_\sigma(t)$ - svetlá modrá)

VI. ZÁVER

V rámci článku bola odvodená metóda zostavenia matematického modelu multiport meniča pomocou Fourierových radov. Táto metóda umožňuje jednoduchšie zostavenie matematického modelu aj pre viac portov meniča. Pomocou tejto metódy bol zostavený matematický model pre tri transformátory so sériovo zapojenými vinutiami. Pre uvedený model boli odvodené dve metódy riadenia: s fázovým a šírkovým riadením. Výhodou fázového riadenia je nižšia výpočtová náročnosť. Na druhej strane, pracuje sa s pevnou striedou spínania, čo neumožňuje redukciu jalového prúdu v obvode sekundárnych vinutí. Preto bolo navrhnuté šírkové riadenie, ktoré uvedenú možnosť ponúka. Táto metodika bola overovaná simulačne aj experimentálne. Zo simulačných aj nameraných priebehov bolo možné potvrdiť možnosť redukcie prúdu cez sekundárne vinutia transformátorov I_G pomocou šírkového riadenia. Oba typy riadenia boli odvodené z modelu pre prvú harmonickú a využívali linearizáciu goniometrických funkcií, čo mierne ovplyvnilo presnosť riadenia.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-15-0750

REFERENCES

- [1] R. U. Haque, M. T. Iqbal, J. E. Quaicoo, "Sizing, Dynamic Modeling and Power Electronics of a Hybrid Energy System," IEEE Canadian

- Conference on Electrical and Computer Engineering, Ottawa, May 2006, pp. 1135-1138
- [2] S. Sikkabut *et al.*, "Control of High-Energy High-Power Densities Storage Devices by Li-ion Battery and Supercapacitor for Fuel Cell/Photovoltaic Hybrid Power Plant for Autonomous System Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 4395-4407, Sept.-Oct. 2016. doi: 10.1109/TIA.2016.2581138
 - [3] W. Thammassiriroj, V. Chunkag, M. Phattanasak, S. Pierfederici, B. Davat and P. Thounthong, "Simplified single-loop full-flatness control of a hybrid power plant," *2016 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS)*, Nagoya, 2016, pp. 1-8. doi: 10.1109/SICEISCS.2016.7470163
 - [4] M. de Prada, L. Igualada, C. Corchero, O. Gomis-Bellmunt and A. Sumper, "Hybrid AC-DC Offshore Wind Power Plant Topology: Optimal Design," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 1868-1876, July 2015. doi: 10.1109/TPWRS.2014.2354457
 - [5] Marian Liberos, Raúl González-Medina, Gabriel Garcerá and Emilio Figuerue, "Modelling and Control of Parallel-Connected Transformerless Inverters for Large Photovoltaic Farms", *Energies* 2017, 10, 1242, August 2017, doi: 10.3390/en10081242
 - [6] N.Sulaiman, M.A.Hannan, A.Mohamed, E.H.Majlan, W.R.Wan Daud, "A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 52, December 2015, Pages 802-814, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.132>
 - [7] ShuoZhangaRuiXiongab, "Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming", *Applied Energy*, Volume 155, 1 October 2015, Pages 68-78, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.003>
 - [8] A. Lachichi and A. J. F. T. Green, "Power converters design for hybrid LV ac/dc microgrids," *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, San Diego, CA, 2017, pp. 850-854. doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191180
 - [9] R. Zeng, L. Xu, L. Yao and B. W. Williams, "Design and Operation of a Hybrid Modular Multilevel Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 3, pp. 1137-1146, March 2015. doi: 10.1109/TPEL.2014.2320822
 - [10] B. Ozpineci, L. M. Tolbert and Zhong Du, "Optimum fuel cell utilization with multilevel inverters," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, 2004, pp. 4798-4802 Vol.6. doi: 10.1109/PESC.2004.1354847
 - [11] E. Babaei, S. Laali and Z. Bayat, "A Single-Phase Cascaded Multilevel Inverter Based on a New Basic Unit With Reduced Number of Power Switches," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 922-929, Feb. 2015. doi: 10.1109/TIE.2014.2336601
 - [12] M. F. Kangarlu and E. Babaei, "A Generalized Cascaded Multilevel Inverter Using Series Connection of Submultilevel Inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 625-636, Feb. 2013. doi: 10.1109/TPEL.2012.2203339
 - [13] M. Venmathi, R. Ramaprabha, "A Comprehensive Survey on Multi-Port Bidirectional DC-DC converters for Renewable Energy Systems," in *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 8, no 5, pp. 348-356, May 2013
 - [14] A. Lavanya, J. D. Navamani, K. Vijayakumar and R. Rakesh, "Multi-input DC-DC converter topologies-a review," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, 2016, pp. 2230-2233. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755089
 - [15] V.V. Chinnu, A. Daisykutty, J. Ninu, "An Integrated Single Input Multi-Output DC-DC converter with Simultaneous Buck and Boost Outputs," in *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 676-689, Dec. 2014. ISSN: 2278-8875
 - [16] Wai Rong-Jong, "High-Efficiency Single-Input Multiple-Output DC-DC Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 886-898, Feb. 2013
 - [17] N. D. Benavides and P. L. Chapman, "Power budgeting of a multiple-input buck-boost converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1303-1309, Nov. 2005. doi: 10.1109/TPEL.2005.857531
 - [18] M. Taufik, T. Taufik and T. Wong, "Multiple-Input Single-Output converter for renewable energy sources," *2012 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Bandung, 2012, pp. 130-135. doi: 10.1109/ISIEA.2012.6496614
 - [19] M. Mihai, "Multiport converters - a brief review," *2015 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Bucharest, 2015, pp. P-27-P-30. doi: 10.1109/ECAI.2015.7301246
 - [20] S. J. Al-Chlaihawi, "Comparative study of the multiport converter used in renewable energy systems," *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Craiova, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICATE.2016.7754650

Charakterizácia spekaných spojov na báze nano-častíc striebra

Tomas Girašek

Katedra technológií v elektronike
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Košice, Slovenská Republika
tomas.girasek@tuke.sk

Alena Pietriková

Katedra technológií v elektronike
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Košice, Slovenská Republika
alena.pietrikova@tuke.sk

Abstrakt—Článok detailne analyzuje spekané spoje vytvorené pomocou pasty od firmy Namics Corporation s označením Unimec XH9890-6A na báze nano-častíc striebra, ktorá je novým a progresívnym typom spoja pre oblasť výkonovej elektroniky. Základná charakterizácia spojov je tvorená z pohľadu vplyvu kontaktného materiálu a spekacieho profilu na elektrický odpor, mikroštruktúru a mechanické vlastnosti spekaného spoja, ktorý bol vyrobený dvoma spekacími postupmi odporúčanými výrobcem bez využitia externe aplikovaného tlaku. Analyzované spekané spoje sú vytvorené medzi keramickými substrátmi s Ag, Au, AgPt a Cu povrchovou úpravou. Presné meranie elektrického odporu spekaných spojov bolo realizované štvorbodovou metódou. Analýza mechanických vlastností bola realizovaná pomocou metódy Lap Shear Test medzi dvoma medenými pásikmi, jedná sa o ťahovú metódu, pre analýzu šmykového napätia v spoji.

Kľúčové slová—spekané spoje; nano-častice; elektrický odpor, mikroštruktúra, mechanické analýzy, RTG analýzy

Abstract— The paper detailed analyzes silver sintering joints created by Namics Corporation Unimec XH9890-6A paste based on nano-particles, which is new and progressive type of joints for power electronic devices. The pressureless silver sintering joints are characterized in terms of impact of contact materials and sintering profiles to electrical resistance, microstructure and mechanical properties of joints. The silver sintering joints was created by two different sintering profiles without application of external pressure, which are recommended by producer of paste. The joints were created between ceramic substrates with Ag, Au, AgPt, and Cu surface metallization. The electrical resistance was measured by four-point method. The mechanical analyzes was realized by Lap Shear Test technique between two copper ribbon.

Keywords—silver sintering joints; nano-particles; electrical resistance; microstructure; mechanical analysis, RTG analysis

I. ÚVOD

Spoje v elektronike sú jednou z najdôležitejších častí elektronického zariadenia kde zohrávajú dôležitú rolu vo výsledných vlastnostiach. V závislosti od výkonových parametrov sa kladú čoraz náročnejšie požiadavky na vysokoteplotné spoje s teplotnou odolnosťou často nad 200°C, ktoré musia spĺňať náročné požiadavky na vysokú tepelnú a elektrickú vodivosť, vysokú mechanickú pevnosť a hlavne odolnosť voči termomechanickému namáhaniu. Doteraz často používané spájky na báze SnAu buď nedokážu spĺňať všetky požiadavky dnešnej doby v oblasti výkonovej elektroniky

alebo sú veľmi drahé. Z dôvodu zvyšovania kvality elektronických zariadení je potrebné venovať vývoju a analýze nových typov spojov, ktoré zabezpečia vysokú spoľahlivosť a kvalitu aj v oblastiach vysoko výkonovej elektroniky. Príkladom takýchto nových spojov je spekaný spoj na báze nano-častíc (mikro-častíc) striebra (Silver Sintering Joints). Striebro bolo a stále je zaujímavým prvkom pre oblasť elektrotechniky. Striebro má výbornú mernú elektrickú vodivosť, ako aj výbornú tepelnú vodivosť. Okrem toho, že sa jedná o ušľachtilý kov, ktorý nestarne, ide prvok, ktorý sa vyznačuje vysokou tepelnou stabilitou (teplota tavenia 961°C) a výbornými mechanickými vlastnosťami. Technologický proces spekania častíc striebra je známy už mnoho rokov. No v minulosti bolo využitie spekania striebra limitované, a to hlavne z dôvodu nutnosti použitia vysokých teplôt (nad 400°C) a vysokého tlaku (40 MPa) v procese spekania [1]- [10]. Nástupom nových technológií a výskumu v tejto oblasti bola teplota potrebná na spekanie striebra znížená až na 175°C bez nutnosti použitia prídavného tlaku. Zásadný vplyv na zníženie procesnej teploty má využitie nano-častíc striebra. Zavedenie nano-častíc striebra otvára nové možnosti v oblasti spojov v elektronike. Vďaka zníženiu procesnej teploty sa spoje na báze spekania nano-častíc striebra v súčasnosti začínajú používať hlavne v oblasti výkonovej elektroniky a to vďaka ich výnimočným vlastnostiam. Medzi ich základné výhody patrí vysoká tepelná vodivosť, nízka elektrická rezistivita, odolnosť voči vysokým teplotám, tepelným zmenám a s tým súvisiacemu termomechanickému namáhaniu[11]-[19].

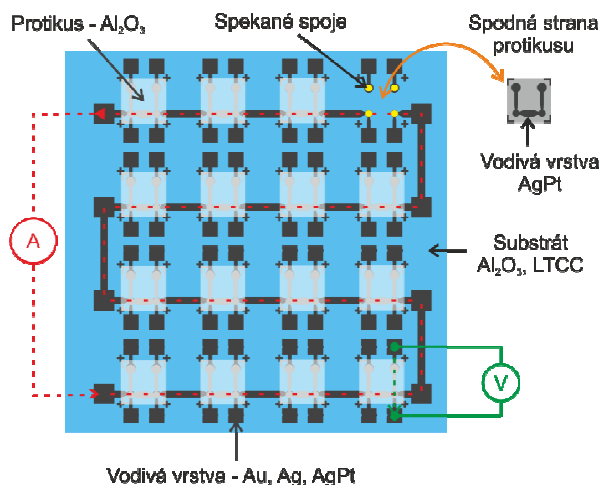
Pre charakterizáciu a analýzu jednotlivých procesných faktorov vplývajúcich na kvalitu spekaného spoja boli vytvorené spoje pomocou spekacej pasty od firmy Namics Corporation s označením Unimec XH9890-6A (High Thermal Conductive Die Attach) [10]. Jednou z hlavných výhod tejto pasty je jednoduchý technologický proces spekania bez nutnosti využitia externe aplikovaného tlaku a v neposlednom rade taktiež kompatibilita so zlatým, strieborným a medeným povrchom. Výrobca taktiež udáva vysokú adhéziu k pórovitým povrchom, ktoré sú štandardné hlavne v prípade využitia DBC substrátov. Pre spoje vyrobené pomocou tejto pasty je charakteristický vysoký modul elasticity, čo priaznivo ovplyvňuje odolnosť voči termomechanickým cyklom. Nevýhodou však sú náročné požiadavky na jej skladovanie (menej ako - 40°C) [10].

II. CHARAKTERIZÁCIA ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ

A. Základný popis testovacích vzoriek

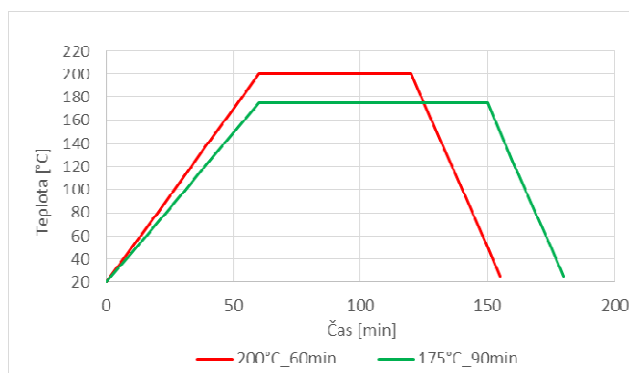
Elektrický odpor je jeden zo základných a veľmi dôležitých parametrov spojov pre oblasť výkonovej elektroniky. Výkonové zariadenia štandardne pracujú s vysokými prúdmi a napätiami a preto musia byť spoje charakteristické nízkou elektrickou rezistivitou.

Pre analýzu vplyvu spekacieho postupu a kontaktných materiálov na elektrickú rezistivitu spekaných spojov na báze nano-častíc striebra bol navrhnutý špeciálny testovací motív na keramickom substráte (Al_2O_3 a LTCC) s natlačenou vodivou vrstvou pomocou sieťotlačovej technológie z Au (DuPont® 5742), Ag (DuPont® 6142D) a AgPt (DuPont® LF171) hrubovrstvovej pasty, ktorý je zobrazený na Obr. 1.



Obr. 1. Navrhnutá meracia zostava nosného substrátu a protikusov pre meranie elektrického odporu spekaných spojov na báze nano-častíc striebra.

Vodivý motív natlačený na nosnom substráte bol navrhnutý pre možnosť merania elektrického odporu pomocou štvorvodičovej metódy. Na vrchnej strane substrátu boli umiestené tzv. protikusy, vytvorené z Al_2O_3 keramiky, na ktorej bola sieťotlačou natlačená AgPt (DuPont® LF171) vodivá vrstva. Spekaný spoj bol vytvorený medzi protikusom a nosným substrátom s natlačenými vodivými vrstvami. Vo výsledku je protikus spojený s nosným substrátom na štyroch miestach, z toho dva slúžia ako prepojavacie spojenia pre meranie úbytku napätia a druhé dve sú analyzované spoje. Elektrický prúd prechádzajúci obvodom (naznačený červenou farbou) vytvára na spekaných spojoch úbytok napätia, ktorý vzniká vplyvom elektrického odporu spojov. Spravidla prepojavacie (pomocné) spoje majú väčší priemer spájanej plošky a to až 0,6 mm. Priemer analyzovaného spoja bol stanovený na 0,4 mm pre zabezpečenie čo najužšieho spoja pri rovnakej výške.

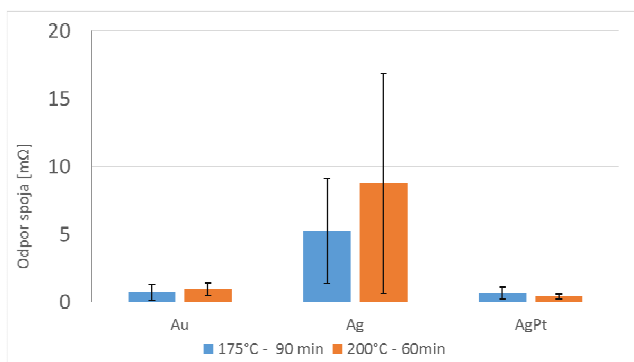


Obr. 2. Spekacie profily odporúčané výrobcom pasty.

Spekaný spoj medzi nosným substrátom a protikusom bol vytvorený dvoma spekacími postupmi odporúčanými výrobcom bez využitia externe aplikovaného tlaku. Prvý spekací profil pozostával z nárastu teploty na hodnotu 175°C po dobu 60 minút a následnej výdrži na vrcholovej teplote po dobu 90 minút. V druhom spekacom profile bol nárast teploty na 200°C taktiež po dobu 60 minút a výdrž na vrcholovej teplote bola 60 minút. Chladenie v oboch prípadoch bolo realizované rýchlosťou 5°C za minútu. Oba použité profily sú zobrazené na Obr. 2.

B. Výsledky meraní elektrického odporu spekaného spoja.

Meranie elektrickej rezistivity spojov bolo realizované pomocou štvorvodičovej metódy prístrojom Milliohmmeter 4338B od spoločnosti Agilent. Z pohľadu vplyvu materiálu na elektrickú rezistivitu spoja sa ako najvhodnejšie javia materiály Au a AgPt, viď Obr. 3. Elektrická rezistivita spojov sa v prípade využitia Au bola cca. 0,8 mΩ a v prípade využitia AgPt povrchu 0,5 mΩ (Obr. 45). V oboch prípadoch nebol pozorovaný ani zásadný vplyv spekacieho profilu na výslednú rezistivitu spoja. Smerodajná odchýlka nameraných hodnôt taktiež poukazuje na opakovateľnosť meraní. Najvyššia elektrická rezistivita spoja bola nemarená v kombinácii s čistým Ag povrchom. Veľkosť odporu spojov je rádovo niekoľkonásobne vyššia oproti Au a AgPt povrchom. Pri spekaní pri 200°C po dobu 60 minút bol odpor spojov v kombinácii s Ag povrchom až 8,74 mΩ v priemere. Taktiež smerodajná odchýlka nameraných hodnôt poukazuje na veľkú variabilitu až $\pm 8,09$ mΩ. Ak bol spoj vytvorený pri 175°C po dobu 90 minút priemerný odpor spojov klesol na hodnotu 5,21 mΩ, ale smerodajná odchýlka nameraných hodnôt stále poukazuje na veľkú variabilitu odporu spekaného spoja. Veľká smerodajná odchýlka v oboch spekacích profiloch jednoznačne poukazuje na nevhodnosť tohto povrchu pre tvorbu spojov na báze nano-častíc striebra.

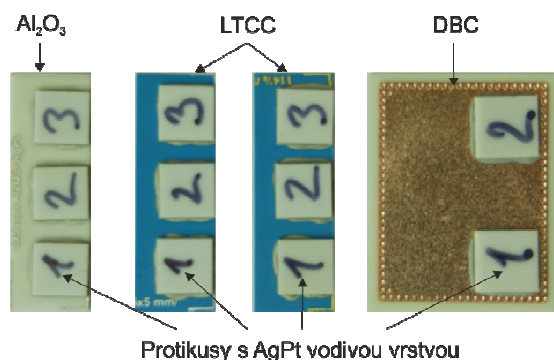


Obr. 3. Elektrická rezistivita spojov vyrobených pomocou spekania nano-častíc striebra.

III. CHARAKTERIZÁCIA MIKROŠTRUKTÚRNYCH VLASTNOSTÍ SPEKANÉHO SPOJA

A. Základný popis testovacích vzoriek

Pre analýzu mikroštruktúry spekaného spoja na báze nano-častíc striebra medzi rôznymi kontaktnými materiálmi bol navrhnutý špeciálny keramický substrát (Al_2O_3 , LTCC a DBC) s rozmermi $7 \times 21 \text{ mm}^2$ s natlačenou vodivou vrstvou. Rovnako ako pri charakterizácii elektrických vlastností spekaných spojov boli vodivé vrstvy substrátu vytvorené sieťotlačovou technológiou z Au (DuPont® 5742), Ag (DuPont® 6142D) a AgPt (DuPont® LF171) hrubovrstvovej pasty pre analýzu vplyvu kontaktného materiálu na výslednú kvalitu spekaného spoja. V prípade medeného povrchu bol využitý DBC substrát s rozmermi $15 \times 19 \text{ mm}^2$ od firmy Curamik s medenou vrstvou na oboch stranách Al_2O_3 keramiky, ktorý je v súčasnosti bežne využívaný v oblasti výkonovej elektroniky. Veľkosť vodivých kontaktov bola stanovená na $5 \times 5 \text{ mm}^2$ vo všetkých vyrobených vzorkách. Vyrobené keramické substráty s vodivými vrstvami a protikusmi sú zobrazené na Obr. 4.



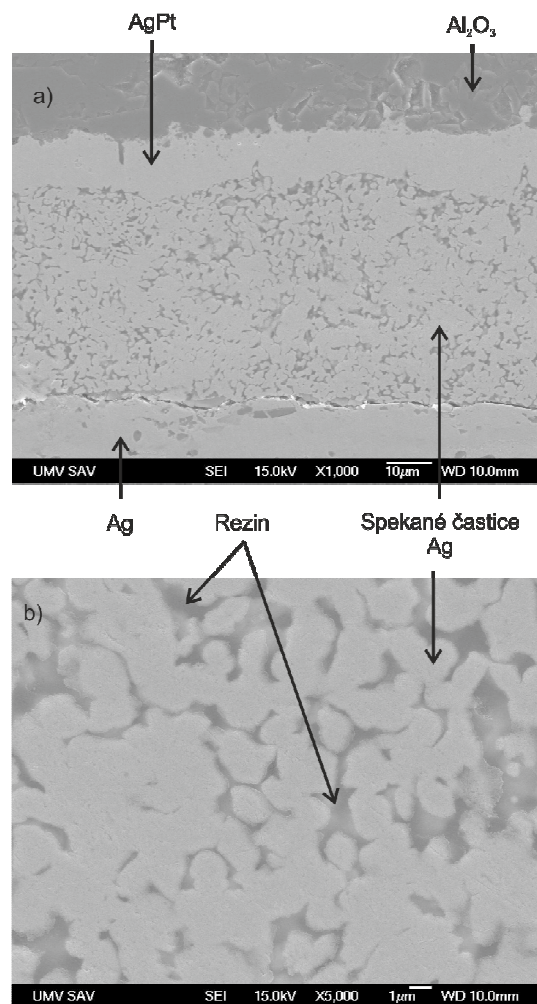
Obr. 4. Vyrobené substráty pre mikroštruktúrnú analýzu.

Spoj na báze nano-častíc striebra bol vytvorený medzi substrátom s natlačenou vodivou vrstvou a protikusom. Protikus bol vytvorený z Al_2O_3 keramiky, na ktorej bola sieťotlačovou technológiou vytvorená vodivá AgPt (DuPont® LF171) vrstva. Protikus o rozmeroch $5 \times 5 \text{ mm}^2$ reprezentoval

veľkorozmerný výkonový čip, ktoré sú bežne používané v oblasti výkonovej.

B. Výsledky mikroštruktúrnych analýz

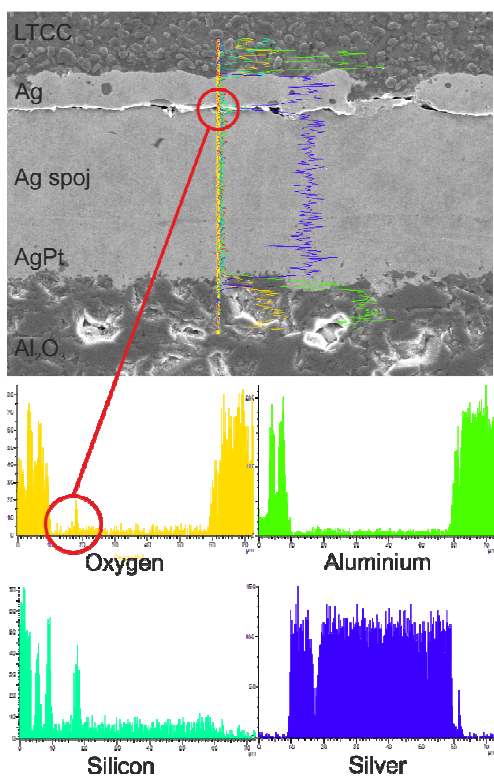
Z mikroštruktúr spekaného spoja vyplýva, že proces spekania nano-častíc obsiahnutých v aplikovanej paste prebehol vo všetkých analyzovaných vzorkách. Počas spekania došlo k procesu vytvárania krkov medzi nano-časticami striebra, ktoré po procese spekania postupne pretvorili v jeden kompaktný kov. Žiadne výrazné trhliny alebo dutiny medzi nano-časticami neboli pozorované priamo v objeme spekaného spoja vo všetkých analyzovaných vzorkách. Na niektorých miestach je však možné pozorovať jemnú štruktúru spoja a krky medzi nano-časticami striebra, ktoré vytvárajú mapy malých dutín ich rozmery (rádovo nm) sú však zanedbateľné. Výrobca spekacej pasty udáva, že v týchto miestach sa nachádzajú organické časti (tzv. rezin) obsiahnuté v paste, ktoré môžu podporovať elasticitu a pevnosť spoja. Typická mikroštruktúra spekaného spoja je zobrazená na Obr. 5.



Obr. 5. Mikroskopická snímka spekaného spoja vyrobeného procesom 175°C 90 min. a) rez celým spojom; b) detail spekaného spoja.

Z pohľadu mikroštruktúry sa spoj medzi Cu a AgPt povrchom javí ako najlepší. Na rozhraniach jednotlivých materiálov nie sú žiadne trhliny ani dutiny. Miesto spoja medzi Ag pastou a AgPt (Cu) povrchom je previazané po celej dĺžke spoja. Nie je možné pozorovať ani výrazný rozdiel v kvalite spoja medzi spekacími postupmi. Tento výsledok potvrdzujú aj výsledky elektrickej rezistivity, ktorá bola najnižšia práve v prípade použitia AgPt povrchov.

Spekané spoje v kombinácii s čistým Ag povrchom vykazovali vo všetkých pozorovaných vzorkách veľké trhliny v mieste spoja. Trhliny a praskliny v mieste spoja boli pozorované v prípade oboch spekacích profilov. Trhlinka medzi Ag povrchom a spekaným spojom sa nachádza po celej dĺžke spoja. Túto trhlinku pravdepodobne spôsobuje jemná oxidácia použitej striebornej vrstvy pred samotným procesom spekania. Čiarové analýzy zobrazené na Obr. 6 vytvorené pomocou elektrónového mikroskopu potvrdili výskyt oxidácie v mieste trhliny spoja. Táto oxidácia zabraňuje vzniku kvalitného spoja medzi nano-časticami striebra a Ag natlačenou vrstvou. Tieto výsledky potvrdzujú aj predchádzajúce merania elektrickej rezistivity spoja vytvoreného v kombinácii s Ag povrchom. Pri meraniach bol zistený veľký odpor spoja (8,74 m Ω) ako aj veľká smerodajná odchýlka odporu spoja (\pm 8,09 m Ω). Pri týchto úvahách nemožno zanedbať ani predpokladanú difúziu na rozhraní Ag hrubej vrstvy vytvorenej pomocou pasty DuPont® 6142D a Ag spekanej pasty Unimec XH9890-6A.



Obr. 6. Čiarová analýza spekaného spoja vytvoreného v kombinácii s Ag povrchom.

Spekané spoje v kombinácii so zlatým povrchom boli charakteristické prepojením spekacej pasty s Au povrchom. Je však nutné podotknúť, že v prípade niektorých vzoriek bol pozorovaný výskyt trhliny na medzifázovom rozhraní medzi Au a nano Ag.

Výrobca spekacej pasty na báze nano-častíc striebra Unimec XH9890-6A udáva vysokú adhéziu k drsným Cu povrchom, ktoré sú charakteristické v oblasti výkonovej elektroniky. Táto skutočnosť sa potvrdila pri analýze mikroštruktúry spoja medzi Cu povrchom DBC substrátu a spekaným spojom

Z pohľadu mikroštruktúry nie je pozorovateľný rozdiel medzi použitými spekacími postupmi.

IV. RTG ANALÝZA SPEKANÝCH SPOJOV

Vzorky vyrobené pre mikroštruktúrnú analýzu boli podrobené detailnej RTG analýze pomocou prístroja X-ray Phoenix PCBA Analyser 160. Ako základný vyhodnocovaný parameter bol výskyt, početnosť a veľkosť voidov v spekanom spoji medzi keramickým protikusom s AgPt vodivou vrstvou a nosným substrátom s AgPt, Ag, Au, a Cu vodivou vrstvou. Jednotlivé voidy v tomto prípade reprezentujú nie dutiny (prázdne miesta) ako je to štandardom pri spájkovaných spojoch, ale útvary medzi nano-časticami striebra, v ktorých nepreběhla difúzia (rast krkov). Ako už bolo spomenuté, výrobca spekacej pasty udáva, že v týchto útvaroch sa nachádzajú organické časti (tzv. rezin) obsiahnuté v paste, ktoré môžu podporovať elasticitu a pevnosť spoja.

Z dôvodu, že výsledky RTG analýzy je možné posúdiť len opticky, bol vyvinutý softvér „Void Analyzer“. Vyvinutý softvér automaticky vyhodnocuje veľkosť, rozloženie a percentuálny podiel voidov v spájkovanom spoji. Keďže správnosť detekcie výrazne závisí od kvality vyhotovenia RTG snímky vzorky, je pre zvýšenie efektivity a presnosti vyhodnotenia možné manuálne meniť prahové hodnoty vyhodnocovania, veľkosť vyhodnocovacej plochy a zvoliť si minimálnu veľkosť voidu, ktorý sa má ešte vyhodnocovať. Hlavnou úlohou RTG analýzy vyrobených vzoriek je vyhodnotiť vplyv použitého kontaktného materiálu a spekacieho procesu na početnosť a rozloženie voidov v spoji. Veľkosť voidov vzhľadom na analyzovanú plochu je rozdelená do 5 kategórií a to nasledovným spôsobom: 1. Kategória - <0,05 %, 2. Kategória - (0,05 % - 0,5 %), 3. Kategória - (0,5 % - 1 %), 4. Kategória - (1 % - 3 %) a 5. Kategória - >3 %. Vzorová RTG snímka spekaných spojov na báze nano-častíc striebra a ich vyhodnotenie prostredníctvom softvéru „Void Analyzer“ je zobrazená v Tab. 1.

Z celkového hľadiska je možné povedať, že v prípade využitia spekacieho profilu 200°C 60 min celkový počet voidov narástol a to vo všetkých pozorovaných vzorkách. Priemerný nárast voidov bol o 3 % celkovej analyzovanej plochy. Je však nutné podotknúť, že sa jednalo iba o nárast malých voidov (< 0,05 %), častokrát menších ako 2 μm^2 . Takéto malé voidy v konečnom dôsledku výrazne neovplyvňujú na jednotlivé vlastnosti spoja. Tento fakt potvrdzujú aj predchádzajúce výsledky z pohľadu elektrickej rezistivity a mikroštruktúry spoja. Najväčší nárast voidov bol zaznamenaný v prípade spekaného spoja s Cu povrchom na DBC substráte.

Spoj vyrobený spekacím procesom 175°C 90 min nevykazoval žiadne voidy vo viacerých analyzovaných vzorkách, ak však bol spoj vytvorený spekacím profilom 200°C 60 min počet voidov narástol na hodnotu 6 % z celkovej kontaktnej plochy v priemere. Jedná sa však len o malé voidy s priemerným rozmerom 1,71 μm^2 .

TABUĽKA 1. VZOROVÁ RTG SNÍMKA SPEKANÝCH SPOJOV NA BÁZE NANOČASTÍC STRIEBRA A ICH VYHODNOTENIE PROSTREDNÍCTVOM SOFTVÉRU „VOID ANALYZER“.



Zastúpenie voidov:	4,83 %
Priemerná plocha voidu:	1,28 μm^2
Najväčšia veľkosť voidu	49,4 μm^2
Celkový počet voidov	874
Počet voidov kat. 1 (<0,05 %	871
Počet voidov kat. 2 (0,05 % - 0,5 %>	3

V prípade Ag a Au kontaktných povrchov je možné pozorovať podobné výsledky. V spojoch vyrobených spekacím postupom 175°C 90 min bol výskyt voidov cca 1 % v priemere. Priemerná plocha voidu bolo vo všetkých analyzovaných vzorkách cca 1 μm^2 . Ak boli vzorky vyrobené spekacím profilom 200°C 60 min celkový počet voidov sa zvýšil o 3,5 % v priemere. V niektorých analyzovaných vzorkách bolo možné pozorovať výskyt voidov s rozmerom nad 0,05 % analyzovanej plochy, jednalo sa štandardne iba o miesta na okrajoch spoja, čo s najväčšou pravdepodobnosťou je spôsobené nedostatočným roztláčením pasty v procese aplikácie, ešte pred samotným spekaním.

V prípade tvorby spoja spekacím profilom 175°C 90 min medzi AgPt kontaktmi bolo percentuálne zastúpenie voidov na úrovni 2 %. Výšný počet voidov je možné pozorovať hlavne na okrajoch spoja. Využitie profilu 200°C 60 min spôsobilo nárast početnosti voidov o 3 %. Vyhodnocovací softvér taktiež poukázal na výskyt väčších voidov kat. 2. Nie je to však spôsobené samotným procesom spekania, ale nedostatočným roztláčením spekacej pasty v procese aplikácie.

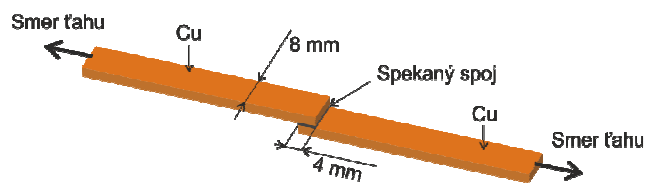
Celkovo je možné hodnotiť spekané spoje z pohľadu výskytu a početnosti voidov ako vyhovujúce. Aj keď bol pozorovaný v niektorých prípadoch zvýšený výskyt voidov až o hodnotu 6 % celkovej kontaktnej plochy, jednalo sa však iba o voidy v rozmeroch cca 1 μm . Rovnomerné rozloženie malých voidov v spoji v mnohých prípadoch napomáha znížiť pnutia medzi spájanými materiálmi s rozdielnym CTE.

V. CHARAKTERIZÁCIA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SPEKANÝCH SPOJOV

A. Základný popis testovacích vzoriek

Maximálna pevnosť a modul elasticity sú jedny z najdôležitejších mechanických vlastností spojov pre oblasť výkonovej elektroniky. Oba výrazne vplyvajú na celkovú životnosť spoja. Elasticita priamo ovplyvňuje odolnosť spojov voči termomechanickému namáhaniu, ktoré je spôsobené rýchlymi a veľkými zmenami teplôt výkonového zariadenia. Ak materiál disponuje dostatočnou elasticitou a vysokou mechanickou pevnosťou, dokáže vyrovnáť pnutia spájaných materiálov (napr. DBC substrát a SiC čip) spôsobené rozdielnym koeficientom teplotnej rozťažnosti (CTE).

Analýza mechanických vlastností spojov na báze nanočastíc striebra, ktoré boli vyrobené šiestimi spekacími postupmi bola realizovaná pomocou metódy Lap Shear Test. Jedná sa o ťahovú metódu, pre analýzu šmykového napätia v spoji. Spekaný spoj bol vytvorený medzi plátni medeného plechu (čistota 99,99 %) hrúbky 1 mm. Pred samotnou realizáciou experimentov sme najprv stanovili optimálnu plochu spekaného spoja a to tak, aby k porušovaniu nedochádzalo na medenom pláte, ale aby k porušeniu došlo práve v mieste spoja. Spekaný spoj medzi plátni medeného plechu mal rozmery 4 x 8 mm² a celková dĺžka vzorky bola 66 mm. Hrúbka spoja bola v rozmedzí 40 – 60 μm . Ilustračný obrázok vzorky pre meranie mechanických vlastností spekaných spojov je zobrazený na Obr. 7.



Obr. 7. Ilustračný obrázok vzorky pre meranie mechanických vlastností spoja metódou Lap Shear Test.

Spoje na báze nanočastíc striebra boli vyrobené šiestimi spekacími postupmi pre meranie vplyvu technologického postupu na výsledné mechanické vlastnosti. Parametre použitých spekacích profilov sú uvedené v Tab. 2.

TABUĽKA 2. PARAMETRE POUŽITÝCH SPEKACÍCH PROFILOV.

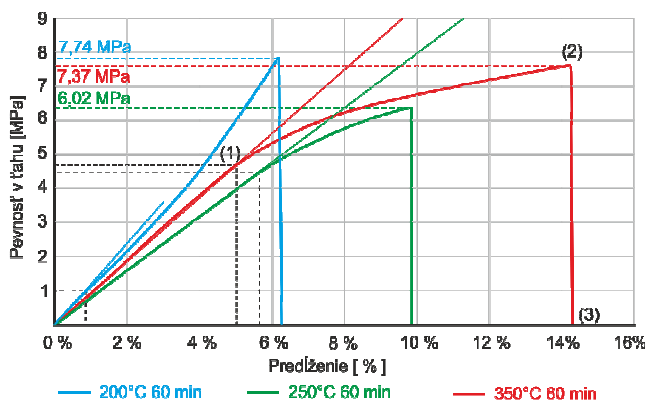
Názov profilu	175°C 90 min	200°C 60 min	250°C 30 min	250°C 60 min	350°C 30 min	350°C 60 min
Rýchlosť nárastu [°C/min]	2,5	3	3	3	3	3
Čas nárastu [min]	60	60	76	76	110	110
Výdrž na max. teplotu [min]	90	60	30	60	30	60
Poklesu teploty [°C/min]	5					
Čas poklesu [min]	30	35	45	45	65	65

B. Výsledky meraní

Meranie mechanických vlastností spojov bolo realizované pomocou meracieho zariadenia Testometric M250-2.5CT. Rýchlosť ťahu bola pri všetkých analyzovaných vzorkách konštantná 1 mm.min⁻¹. Vzdialenosť medzi upínacími čel'ustami bola 30 mm, pre zníženie vplyvu deformácie medených plátov na celkové výsledky. Uvádzané hodnoty mechanických vlastností sintrovaných spojov sú orientačné, nakoľko pri ich meraní nebol použitý vonkajší tenzometer v mieste spoja (tzv. Clip Gage), pomocou ktorého by bolo možné eliminovať aj deformáciu medených plátov.

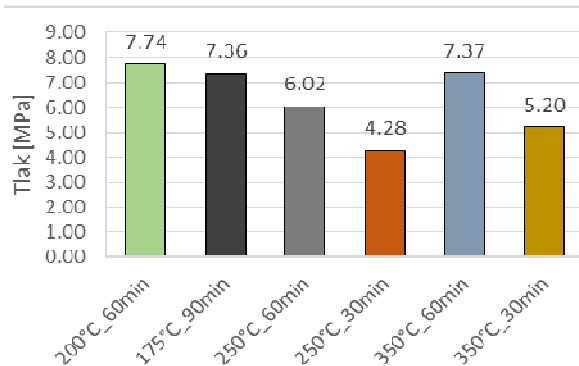
Výsledky meraní jednoznačne poukazujú na vplyv spekacieho profilu na výsledné mechanické vlastnosti spoja. Vzorové krivky mechanických vlastností z vyznačenými medzami sklzu a medzami pevnosti pre tri spekacie profily sú zobrazené na Obr. 8.

Grafických závislostí vyplýva, že vplyv spekacieho profilu má zásadný vplyv na elasticitu spoja. Elasticitu spoja definuje tzv. medza sklzu, jedná sa o bod v grafickom priebehu (1), pri ktorom po uvoľnení sily pôsobiacej na spoj nedôjde k žiadnym plastickým deformáciám. Vysoká elasticita spojov pre výkonovú elektroniku je požadovaná, hlavne pre zabezpečenie odolnosti spoja voči termomechanickým cyklom. Najvyššia elasticita spekaného spoja bola nameraná v prípade využitia profilu 350°C 60. Medza sklzu, kedy sa elastická deformácia mení na plastickú, bola nameraná pri hodnote pevnosti 4,67 MPa a predĺžení 4,9 %. S narastajúcim časom a teplotou spekania narastá aj elasticita spoja. Ak boli použité výrobcom odporúčané spekacie profily elasticita spoja bola najnižšia (Tab. 13). V prípade použitia profilu 175°90 min bola nameraná medza sklzu pri najnižších hodnotách pevnosti 0,46 MPa a predĺžení 0,25 %. Z pohľadu elasticity spoja je možné hodnotiť profily 250°C 60 min, 350°C 30 min a 350°C 60 min za najviac vyhovujúce



Obr. 8: Vzorové krivky mechanických vlastností spekaných spojov na báze nano-častíc striebra pre tri spekacie profily.

Maximálna pevnosť v ťahu bola udávaná z maximálnej sily použitej pri skúškach ťahom, kedy nastalo nevrané roztrhnutie vzorky (bod (2) v grafických závislostiach). Priemerná maximálna mechanická pevnosť vyrobených vzoriek je zobrazená na Obr. 9.



Obr. 9: Výsledky mechanických analýz spekaných spojov na báze nano-častíc striebra.

Najvyššiu mechanickú pevnosť vykazovali vzorky vyrobené profilmi odporúčanými výrobcom a to nad hranicou 7 MPa pri celkovom predĺžení cca 6 %. S narastajúcim časom a teplotou spekania mechanická pevnosť spojov klesá. Za zmienku však stojí výsledok maximálnej pevnosti spoja vyrobeného spekaním procesom 350°C 60 min. Maximálna pevnosť tohto spoja bola v priemere 7,37 MPa pri maximálnom predĺžení až 14,27 % (bod (3) v grafickej závislosti). Z pohľadu celkových mechanických vlastností spekaných spojov práve tento spekací profil je možné hodnotiť ako najviac vyhovujúci. Zachováva vysokú elasticitu spekaného spoja pri vysokej mechanickej pevnosti. Avšak v korelácií s predchádzajúcimi výsledkami z pohľadu mikroštruktúry a elektrických vlastností je spoj vyrobený spekaním postupom 200°C 60 min taktiež vyhovujúci.

VI. ZÁVER

Na výslednú kvalitu a spoľahlivosť spekaného spoja na báze nano-častíc striebra vplyva mnoho faktorov. Medzi základné faktory ovplyvňujúce kvalitu spoja patrí vhodná pasta (materiál) na báze nano-častíc striebra, jej zloženie, teplota spekania, čas spekania ako aj materiál spájaných kontaktov. Spekaný spoj vytvorený pomocou pasty Unimec XH9890-6A bol podrobený komplexnej analýze z pohľadu vplyvu spekacieho procesu a kontaktných materiálov na elektrickú rezistivitu, mikroštruktúru spoja ako aj jeho mechanické vlastnosti.

Z charakterizácie elektrických vlastností spekaných spojov jednoznačne vyplýva závislosť použitého kontaktného materiálu na elektrické vlastnosti. Ako najvhodnejšie kontaktné materiály z použitých sa javia Au (DuPont® 5742), a AgPt (DuPont® LF171). Ako nevhodný a to nielen z pohľadu elektrickej rezistivity sa javí povrch z čistého Ag (DuPont® 6142D). Hodnoty odporu spoja v kombinácií s týmto povrchom boli niekoľko násobne vyššie (8,74 mΩ). Tieto výsledky sa potvrdili aj v korelácií s analýzou mikroštruktúry spoja. Analýza vplyvu spekacieho profilu na výslednú rezistivitu spoja potvrdila vhodnosť výrobcom odporúčaného profilu – 200°C 60 min. Vzorky vyrobené týmto profilom boli charakteristické nízkou elektrickou rezistivitou (0,4 mΩ).

Z jednotlivých obrázkov mikroštruktúry spekaného spoja vyplýva, že proces spekania nano-častíc obsiahnutých v

aplikovanej paste prebehol vo všetkých analyzovaných vzorkách. Počas spekania došlo k procesu vytvárania krkov medzi nano-časticami striebra, ktoré mali tendenciu v procese spekania vytvoriť kompaktný kov. Tak ako to už analýza elektrických vlastností spoja napovedala, spoj medzi AgPt kontaktnými materiálmi sa javí aj z pohľadu mikroštruktúry ako najviac vyhovujúci. Na rozhraniach kontaktných materiálov neboli pozorované žiadne výrazné trhliny ani praskliny. Práve výborné prepojenie kontaktných materiálov zabezpečilo nízku hodnotu elektrického odporu. Výborné prepojenie medzi nano-časticami pasty vzniklo aj v prípade využitia zlatého kontaktného povrchu. V prípade využitia rozdielnych spekacích profilov nebol pozorovaný výrazný rozdiel v mikroštruktúre spoja. Mikroskopické snímky taktiež potvrdili výborné prepojenie medzi Cu povrchom a spekaným spojov v oboch použitých spekacích postupoch.

Spekací profil má výrazný vplyv hlavne na elasticitu spoja a maximálnu mechanickú pevnosť. S narastajúcim časom spekania a maximálnou teplotou narastá aj elasticita spoja. Najvyššia elasticita spekaného spoja bola nameraná v prípade využitia profilu 350°C 60 min. Medza klzu, kedy sa elastická deformácia mení na plastickú, bola nameraná pri hodnote pevnosti 4,67 MPa a predĺžení 4,9 %. Vysoká elasticita spoja pre výkonovú elektroniku je žiadaná hlavne pre podporu odolnosti voči termomechanickým cyklom. Ak by sa do úvahy brala iba elasticita spoja ako najviac vyhovujúce sú profily 250°C 60 min, 350°C 30 min a 350°C 60 min. Avšak druhou dôležitou vlastnosťou je maximálna mechanická pevnosť spoja. Najvyššiu mechanickú pevnosť vykazovali vzorky vyrobené profilmi odporúčanými výrobcom a to nad hranicou 7 MPa pri celkovom predĺžení cca 6 %. S narastajúcim časom a teplotou spekania mechanická pevnosť spojov klesá. Vysokú mechanickú pevnosť pri vysokej elasticite si zachovali spekané spoje vyrobené spekaním procesom 350°C 60 min.

RTG analýza spekaných spojov medzi Ag, AgPt, Au a Cu kontaktnými materiálmi pri dvoch spekacích postupoch (175°C 90 min, 200°C 60 min) potvrdila malý výskyt voidov vo všetkých analyzovaných vzorkách. Všetky voidy nachádzajúce sa priamo v spoji boli veľmi malých rozmerov, rádovo desiatiny μm^2 . Také malé voidy nemajú zásadný vplyv na výsledné vlastnosti spoja, čo sa v konečnom dôsledku aj potvrdilo pre mechanických analýzách.

Ak zoberieme do úvahy všetky dosiahnuté výsledky z pohľadu elektrickej rezistivity, mikroštruktúry, RTG ako aj mechanických vlastností možno charakterizovať spoj vytvorený medzi AgPt a Au kontaktnými materiálmi spekacím procesom 200°C po dobu 60 minút ako najviac vyhovujúci. Spoje sú charakteristické nízkou elektrickou rezistivitou, nízkym percentuálnym zastúpením voidov, výborným prepojením jednotlivých materiálov ako aj vysokou mechanickou pevnosťou. Nevýhodou však môže byť relatívne malá elasticita spoja v porovnaní s ostatnými analyzovanými spekaciami profilmi.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená projektom APVV-14-0085: Vývoj novej generácie spojov výkonovej elektroniky s použitím neštandardných zliatin na báze cínu.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Zhiye, Zhan: Processing and characterization of micro-scale and nanoscale silver paste for power semiconductor device attachment: Ph.D. dissertation: Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksburg, Sep. 2005.
- [2] Buttay, Cyril et al.: Die Attach of Power Devices Using Silver Sintering –Bonding Process Optimisation and Characterization, In: IMAPS. High Temperature Electronics Network (HiTEN), Jul 2011, Oxford, United Kingdom. s.1-7, 2011.
- [3] Guofeng Bai: Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection: Ph.D. dissertation: Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksburg 2005.
- [4] Goebel, C. - Faltenbacher, J.: Low temperature sinter technology die attachment for power electronic applications, In: Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2010 6th International Conference, s.1-5, ISBN 978-1-61284-814-3.
- [5] R. M. German, "Sintering theory and practice " Wiley and Sons, New York, NY, 1996. ISBN 978-0-471-05786-4.
- [6] R. M. German, Fundamentals of Sintering in Engineered Materials Handbook (Materials Park, Ohio: ASM International, 1991), vol. 4.
- [7] Zhiye Zhang: Processing and Characterization of Micro-scale and Nanoscale Silver Paste for Power Semiconductor Device Attachment: Ph.D. dissertation: Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksburg 2005.
- [8] Qiu Xiliang, Cao Yang, Lin Tiesong, et al., "Large-Scale Synthesis of Silver Nanoparticles by Aqueous Reduction for Low-Temperature Sintering Bonding," Journal of Nanomaterials, vol. 2014, Article ID 594873, 8 pages, 2014. doi:10.1155/2014/594873
- [9] J. C. Kim, K. H. Auh, and D. M. Martin, "Multi-level particle packing model of ceramic agglomerates," Modeling and Simulation of Materials of Science and Engineering, vol. 8, pp. 159-168, 2000.
- [10] Namics Corporation, Unimec XH9890-6A High thermal conductive die attach, Technical datasheet, [online], [cit. 2017-12-21], Dostupné na internete: < <https://www.namics.co.jp/e/product/unimec05.html> >
- [11] Kim S. Siow, Mechanical properties of nano-silver joints as die attach materials, In Journal of Alloys and Compounds, Volume 514, 2012, Pages 6-19, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.10.092>.
- [12] Y. Akada, H. Tatsumi, T. Yamaguchi, et al., "Interfacial Bonding Behavior between Silver Nanoparticles and Gold Substrate Using Molecular Dynamics Simulation" Materials Transactions, vol. 53, No. 12 (2012) pp. 2085 to 2090
- [13] M. Tobita and Y. Yasuda, "Interconnect material and interconnect formation method", US2009/0180914A1, Hitachi, USA (2009)
- [14] Y. Kobayashi, T. Shirochi, Y. Yasuda, T. Morita, Metal-metal bonding process using metallic copper nanoparticles prepared in aqueous solution", International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 33, 2012, pp. 50-55, ISSN 0143-7496
- [15] C. Buzea, P.II Balandino, K. Robbie, "Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity", Biointerphases, 2007, Vol. 2, No. 4, pp. 17-71, ISSN 1934-8630
- [16] Sweatman K., Nishimura T., Komatsu T., et al., "A nano silver replacement for high lead solders in semiconductor junctions" Pan Pacific Symposium Conference Proceedings, 2013, 7s.
- [17] T. G. Lei, J. N. Calata, G. Q. Lu, X. Chen and S. Luo, "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Attaching Large-Area (>100 mm²) Chips," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 33, no. 1, pp. 98-104, March 2010.
- [18] Ogura H., Maruyama M., et al., "Carboxylate-Passivated Silver Nanoparticles and Their Application to Sintered Interconnection: A Replacement for High Temperature Lead-Rich Solders", Journal of Electronic Materials, 2010, Vol. 39, No. 8, pp 1233-1240, ISSN: 0361-5235
- [19] E. Ide et al., "Bonding of Various Metals Using Ag Metallo-Organic Nanoparticles-A Novel Bonding Process Using Ag Metallo-Organic Nanoparticles", Materials Science Forum, Vol. 512, pp. 383-388, 2006

Ubiquitous Robotics in Intelligent Space

Ing. Jakub Hvizdoš

Dept. of Cybernetics and Artificial Intelligence
FEI TU of Košice
Košice, Slovak Republic
jakub.hvizdos@tuke.sk

doc. Dr. Ing. Ján Vaščák

Dept. of Cybernetics and Artificial Intelligence
FEI TU of Košice
Košice, Slovak Republic
jan.vascak@tuke.sk

Abstract EN—This paper provides an overview of our Ubiquitous Robot design with Fuzzy Cognitive Map based controller as well as an overview of the relevant theory overview. It explains the concept of Ubiquitous Robotics, Fuzzy Cognitive Maps and the adaptation methods for Fuzzy Cognitive Maps with focus on Particle Swarm Optimization. Finally it provides experimental evaluation.

Abstract SK—Táto práca poskytuje prehľad nášho návrhu všadepřitomného robota, ovládaného pomocou systému založeného na fuzzy kognitívnej mape, spolu s prehľadom relevantnej teórie. Sú tu vysvetlené koncepty všadepřitomnej robotiky, fuzzy kognitívnej mapy a adaptačných metód fuzzy kognitívnej mapy s dôrazom na optimalizáciu rojom častíc. Nakoniec sú poskytnuté aj experimentálne výsledky.

Keywords— Internet of Things, Intelligent Space, Ubiquitous Robotics, Fuzzy Cognitive Map

I. INTRODUCTION

The concept of Internet of Things (IoT) has seen a significant amount of research focus. The result was a considerable number of publications and applications. The term “Internet of Things” was coined Peter T. Lewis in September 1985 [1]. IoT can be defined in several ways. Technical standardization sees IoT as a global infrastructure connecting physical and virtual things while also enabling advanced services based on information and communication technologies (ICT) [2]. In this context “things” are defined as virtual or physical world objects that can be identified and incorporated in a communication network. Alternatively IoT can be defined as an environment in which objects, animals or people are equipped with unique identifiers and are able to transfer data over a network [3].

The definition of IoT also greatly overlaps with that of the Intelligent space (ISpace). ISpace is defined as a room, or an area equipped with an array of sensors, embedded systems, ICTs and other devices that allow it to perceive and recognize events happening inside of it.

The paradigms of IoT and ISpace offer many advantages and can be applied for many different tasks. Some examples include:

Smart home/office. A room or a series of rooms equipped with various sensors and technologies. By analysing the received data, the IoT could be used to automatically adjust various aspects of the room such as light regulation, air flow

and temperature and humidity control thus reducing electricity costs. Combined with an internet connection the room’s parameters could also be controlled through the internet [4].

Ubiquitous healthcare. IoT provides a suitable platform to realize this vision using body sensors and IoT back end to upload the data to servers [4]. For instance, a Smartphone could be used for communication with interfacing sensors measuring physiological parameters. Furthermore, a home monitoring system, which allows the doctor to monitor patients and the elderly in their homes could be highly useful in reducing hospitalization costs.

Atmosphere analysis. By observing the behaviour of its clients, IoT could be used to determine their overall and specific moods. When combined with a smart home setup this data could be used to adjust the room automatically [5].

Robotics. As was previously mentioned, combining robots with IoT has a number of benefits in the form of extra processing and sensing resources or even a complete control over a robot’s actions [6].

Smart grid and smart metering. By continuously monitoring all electricity points within a house and using this information to modify the way electricity is consumed efficient energy consumption could be achieved [4] [5]. At the city scale, this information could be used to balance the load of the energy grid and thus provide a high quality of service.

Smart cities. In addition to scaling the previously mentioned task to the city level, IoT could be used for a number of other large-scale applications. Emergency services could be improved with personnel monitoring, resource management and distribution, response planning by utilizing built-in sensors to guide first responders in emergency situations [4] [7]. Traffic management could be improved through real-time traffic information and path optimization. Finally, water network monitoring and quality assurance of drinking water could be achieved by placing measuring sensors at important locations.

In our work we focus on the field of robotics which has in conjunction with IoT creates a promising concept of Ubiquitous Robotics. In this paper we provide a Ubiquitous robot (UbiBot) design controlled by a FCM-based controller as well as an overview of the adaptation experiments performed during the creation of this controller.

II. UBIQUITOUS ROBOTICS

Robots have traditionally been designed as standalone devices performing designated functions or providing services [8]. This, however, means that these robots have a number of limitations. Specifically, they are limited to using only their onboard sensors and processing capabilities which reduces their operational capabilities. To overcome these limitations the concept of Ubiquitous robotics was created. It combines the paradigms of robotics and Ubiquitous computing [8] [9]. It results in networked robot containing environments capable of sensing and responding to the presence of people. It describes a vision in which devices work together to aid people in performing their daily task and activities by using information and intelligence embedded within the network connecting these devices [10]. This immediately presents an obvious overlap with the IoT and ISpace.

The purpose of this is to allow the robots to utilize the embedded network systems in the environment to navigate more precisely and more intelligently respond to the events within the environment. There are a couple of ways of defining the structure of an Ubibot all of which divide the robot into three main components [11]:

- **Virtual software robot:** A virtual representation of the robot used to control the real-world robot and handle decision-making.
- **Real-world mobile robot:** The physical robot placed within the environment used to execute the determined actions.
- **Embedded sensor system:** The collection of sensors, network components and all the remaining devices used to gather additional environmental data and provide supplementary computational power

III. FCM BASED CONTROLLER DESIGN

Fuzzy cognitive maps (FCM) are an expansion of the standard Fuzzy Logic (FL) approaches [12]. FCMs are basically oriented graphs, where nodes (usually denoted as C) represent notions in a symbolic form and connections represent relations between them. Usually, notions are states or conditions and connections are actions or transfer functions, which transform a state from one node to another state in another node. FCM can also be used as a set of rules. In this case, input nodes represent parts of a rule premise, which are then interconnected into the output node. The output node's value furthermore corresponds to the rule consequent as we can see it in Fig. 1. Unlike conventional rule bases, where the input and output variables are strictly divided, FCM may combine several rules to form chains of implications and even closed loops that create recurrent data flows [12].

Structurally FCMs tend to be designed in a way similar to recurrent neural networks. The connection between an input node (C_i) and an output node (C_j) is weighted by a value (e_{ij}) from the interval [-1; 1] (-1 – because an FCM can contain negative connections). This allows us to implement grades of membership into the inference process. When we define the

initial state values a_i in nodes C_i (from the interval [0; 1]) then we can calculate new state values (t+1) as:

$$A_{t+1} = L(A_t + A_t \times E) \tag{1}$$

Where A is the vector of individual node state values a_i, E is the connection matrix of connections e_{ij} and L is the limitation function to keep the values a_i inside [0;1]. Thus, we can simulate the behaviour of a specified system and then analyse its properties. Therefore, FCMs can be very useful especially for prediction purposes [13].

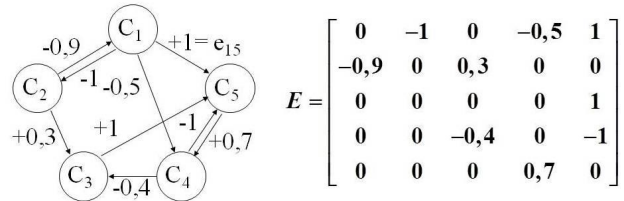


Fig. 1 – an example FCM with its connection matrix [14]

Similarly to [15] and our previous research [6] we designed a FCM-based controller. The controller contains a pair of inputs (Fig. 2): the angle between the vehicle's centerline and the heading towards the center of the current objective and the distance to this center. These values are then passed to GL, GF, GR, GC, GM and GD nodes. The symbols in each node indicate G – goal, L - left, F - forward, R - right, C – close distance, M – medium distance and D - distant. As can be inferred the nodes, GL, GF and GR, contain membership calculations for angular deviation between the vehicle and the current goal. Analogously, nodes GC, GM and GD contain membership calculations for the vehicle's distance to the current goal. By combining the values of these nodes using their weighted connections, we determine the values of A/D - acceleration/deceleration and T – turning rate nodes.

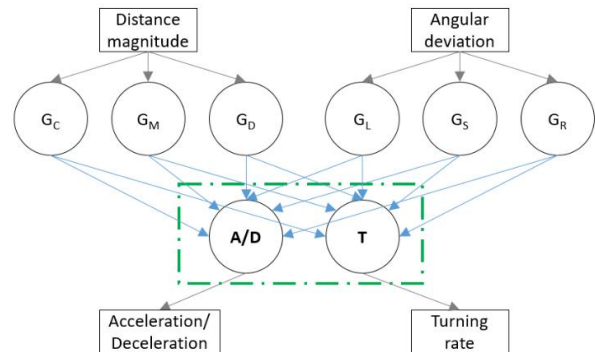


Fig. 2 – Adapted FCM structure

IV. FCM ADAPTATION

The adaptation method itself is based on population based methods [15] [16]. To test the adaptation approaches we designed a simulation consisting of a virtual navigated car placed on an arbitrary virtual track [17]. The track's overall shape is not initially known to the adaptation method. The final goal of the adaptation is to create and optimize an FCM

controller that is able to navigate a vehicle along the prescribed path, as well as try to optimize both quantitative and qualitative criteria. There are many available approaches capable of optimizing quantitative criteria, like minimization of the time and energy requirements. However, by focusing just numerical values of a simulation the resulting controller could produce odd behavior compared to expected human-like behavior. Let us consider an autonomous vehicle in a real-life situation. Every driver has to, in order to better predict and plan for their behavior, observe the driving style of the surrounding cars in addition to many other parameters. If one of the vehicles were to behave strangely or in an erratic manner, it could lead to a possibly dangerous situation. Therefore, an adapted controller should aim to emulate human-like decision making, as well. This means that the use of IEC is highly suitable.

To better test the proposed controller adaptation's versatility, various virtual road designs were used. The simulated roads could vary in the shape of their curves, the number of curves, and the road's width. Similarly to a real-world situation, the virtual testing vehicle can only see and analyse its immediate surroundings. The driving simulation is performed in steps during which the vehicle detects its surrounding and moves a certain distance according to the adapted FCM controller. To prevent the vehicle from going off road the controller has to adjust the movement trajectory during each simulation step. The goal trajectory is expected to go along the virtual road. If at any time during our simulation the vehicle moves outside of the road's border it is considered to be a collision. The virtual road itself is comprised of a series of successive gates. The centers of these gates serve as intermediate goals during the simulation. The center of the next closest gate serves as the vehicle's current goal. The vehicle thus moves from one gate to another eventually reaching its final destination. Fig. 3 shows a portion of our simulated road.

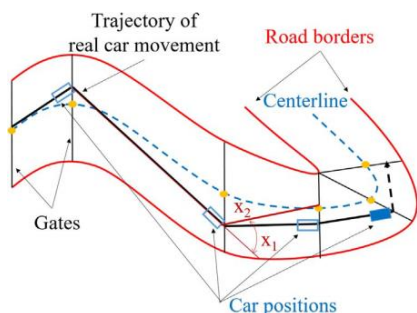


Fig. 3 – Virtual road with controller inputs displayed [15]

This essentially means that the vehicle needs to move only within the road's border and yet the actual trajectory it takes may vary. Each simulation cycle is performed in the following steps:

1. The controller calculates the acceleration and turning angle for the vehicle based on the vehicle's current position and the position of the current goal.
2. The vehicle moves and the system checks its trajectory in relation to the current goal.

3. If the vehicle crosses the gate, new action will be calculated (repeating step 1).
4. The vehicle will thus pass all of the intermediate goals until it reaches the final one.

Since the adaption method is population based a number of individual proposed controller designs is tested and assigned a fitness value. Out of the current population a new population was then generated according to either evolutionary computation (EC), interactive evolutionary computation (IEC) or semi-interactive population based optimization (SIPBO) [16].

A. EC-based adaptation

Fitness value of a FCM-based controller during each iteration was based on the following criteria:

1. relative average absolute angular turning,
2. relative average absolute acceleration,
3. relative trajectory length,
4. relative average speed,
5. relative road passing time,
6. number of deviations from road (collisions),
7. successful passing of the road (boolean value).

These criteria are then combined into a single value, which represents the value of the fitness function itself. During the non-interactive evolution and PSO it was this value that guides the adaptation. During the interactive evolution the user was presented six simulations simultaneously on a single screen and asked to assess the resulting trajectories (Fig. 4). The user could select multiple candidates as well as the same one several times. When using the SIPBO method the interactive method replaces the non-interactive every few generations. This cycle repeats until a suitable solution is found or the user terminates the experiment. For our experiments the best fitness is considered the one that has the lowest numerical value.

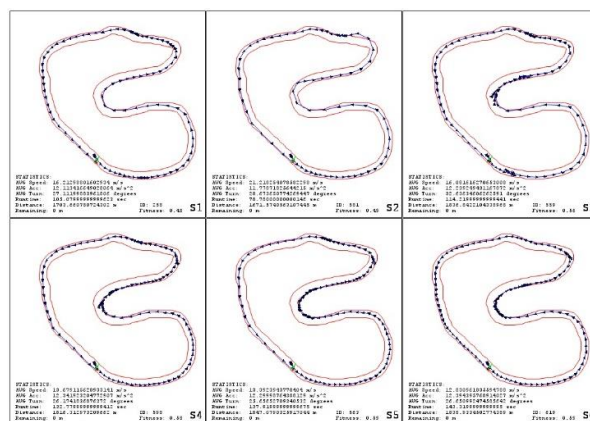


Fig. 4 Simulation example [16]

The individual methods were evaluated according to the following criteria:

- C1. Program runtime,
- C2. Evolution time,
- C3. Waiting for user,
- C4. Interaction time,
- C5. Number of generations,
- C6. Number of generated individuals,
- C7. Best fitness.

Criterion C1 is represents the average total runtime of the given method. Criteria C2, C3 and C4 represent the individual portions of the C1 criterion. In essence they indicate the ratios of the primary portions of C1. Runtime alone is not sufficient and therefore we have criteria C5 and C6. C5 represents the number of generations of individuals and in conjunction with C1 describes how much average time a single generation takes to evaluate. Similarly, C6 represents the total number of individuals generated during the programs runtime. Finally criterion C7 represents the best achieved fitness. The average results per method are summarized on TABLE I.

TABLE I EC EXPERIMENTAL RESULTS

Adaptation Method:	EC	SIPBO	IEC
Program runtime:	37 m 45.756 s	21 m 48.382 s	32 m 32.387 s
Evolution time:	37 m 44.909 s	16 m 11.167 s	14 m 34.404 s
Waiting for user:	0 s	2 m 7.062 s	6 m 50.077 s
Interaction time:	0 s	3 m 29.433 s	11 m 7.202 s
Num. of generations:	34	29	24
Generated individuals:	710	610	510
Best fitness:	0.33973	0.60343	0.49123
Interaction interval:	Disabled	Every 10 gen.	Every 1 gen.

B. PSO-based adaptation

An alternative to EC-based adaptation is the use of the PSO-based approach. PSO has a number of similarities to the EC approach and has already been successfully utilised for FCM adaptation [18]. As described in [18] and [19] initialisation of the initial swarm has a great effect on the overall algorithm’s performance. During our experiments, we have utilised several different methods for initialisation.

To serve as a baseline a standard simple generation of 100 random candidates with uniform distribution was used. The main advantage if this method is its simple implementation. Its performance during testing, however, proved to be highly inconsistent. The runtime could, depending on the exact random values generated, range from as short as 21 minutes to not being able to reach a satisfying fitness in over an hour.

The second utilised method was through the use of an n-dimensional hypercube (Fig. 5). The dimension of the hypercube was selected the same as our search space. The coordinates of the individual vertices (corners) of the hypercube then became the initial swarm of the PSO algorithm. By generating the hypercube in such a way that its centroid lies in the origin (0,0,..., 0) the corners will cover all possible combinations of positive and negative sequences of values. This provides a rather extensive coverage of the search space. The disadvantage, however, lies in the fact that the

number of corners rises exponentially (2^n where n is the number of dimensions). This means that although the number of generations required to reach a solution may be low the total runtime may not improve.

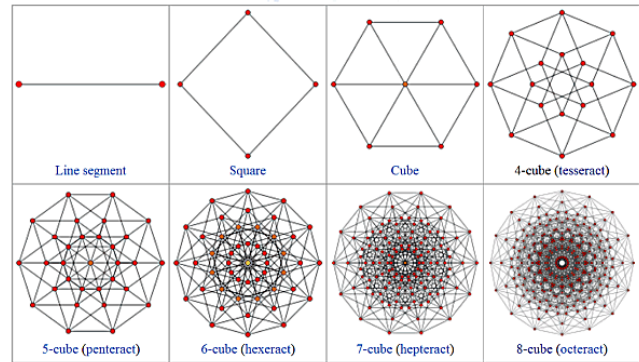


Fig. 5 – Hypercube [20]

The third method used aims to alleviate the problems of the hypercube method. Similarly to the hypercube method, it is based on an n-dimensional object, this time a simplex. While a hypercube is an object analogous to that of a square or a cube, simplex is analogous to a triangle or a tetrahedron (Fig. 6). In fact, triangle and tetrahedron are examples of 2D and 3D simplexes.

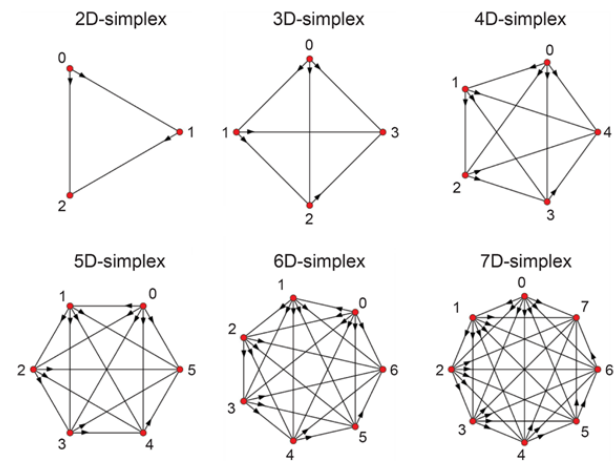


Fig. 6 – Simplex [21]

An n-dimensional simplex has n+1 vertices (corners). Since this number rises linearly this method does not suffer from the massive number of generated potential candidates as the previous version. In fact when using a single simplex the number of generated candidates is too low. Generating more candidates from an initial simplex can be done in a variety of ways [22]. Instead of using stretching and other similar operations as described in Nonlinear simplex method [22] a slightly different approach was chosen. For our method we chose to use a second simplex symmetrical to the first with respect to the origin, thus doubling the number of initial candidates. This new method ensures a suitable coverage of

the search space and does not require a separate quasi PSO steps.

The fourth method involves the generation of random candidates according to a couple of heuristic rules. Since our FCM based controller contains nodes for the Left and Right directions, corresponding Left and Right nodes should analogously have corresponding symmetrical weights.

The last method put the heuristic and double simplex methods to see if they could provide an additional improvement. As can be seen in Table II the pure heuristic initialization was the most successful. Heuristics are however not always available and as a general adaptation method PSO with simplex-based initialization provides a viable alternative to EC and IEC approaches.

TABLE II PSO EXPERIMENTAL RESULTS

Initialization:	Random 100	Heuristic 100	Double simplex	Hypercube	Heuristic + simplex
Program runtime:	1 h, 10 m, 1.827 s	11 m, 48.017 s	32 m, 50.903 s	1h, 4 m, 42.320 s	20 m, 54.734 s
Num. of generations:	165	18	186	2	12
Generated individuals:	100	100	26	4096	126
Best fitness:	2.88576	0.70915	0.73559	0.56902	0.71908
Success:	False	True	True	True	true

V. UBIBOT DESIGN

Utilizing the results gained from the adaptation experiments we designed an Ubibot with FCM-based controller capable of navigation within our ISpace environment. Upgrading from previous experiments the robot used for navigation is the Kobuki type TurtleBot. The proposed structure of the FCM is refined from the previous experiments and its outputs modified to better suit the format of commands that the TurtleBot uses Fig. 7.

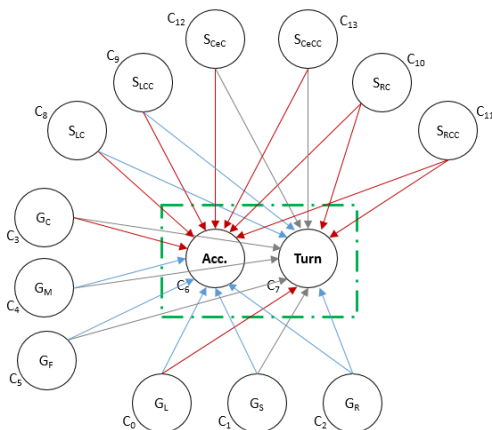


Fig. 7 – Final FCM-based controller [23]

Nodes denoted as $C_0 - C_5$ and $C_8 - C_{13}$ are the input nodes. The nodes $C_0 - C_5$ contain the information about the position

of the goal relative to the robot’s position. To be more specific they express: G_L – goal on the left, G_S – goal straight ahead, G_R – goal on the right, G_C – goal close by, G_M – goal medium distance away and G_F – goal far away. Nodes $C_8 - C_{13}$ represent obstacle detection data received from sensors. Denotation following the S (sensor) symbol represent L – left, R – right, Ce – center, C – obstacle close to the robot and CC – obstacle critically close. C_6 and C_7 are the output nodes and represent Acc. - robot’s current acceleration and Turn – robot’s turning speed. The output values are converted into meters per second and radians per second. The membership functions were set manually (Fig. 8).

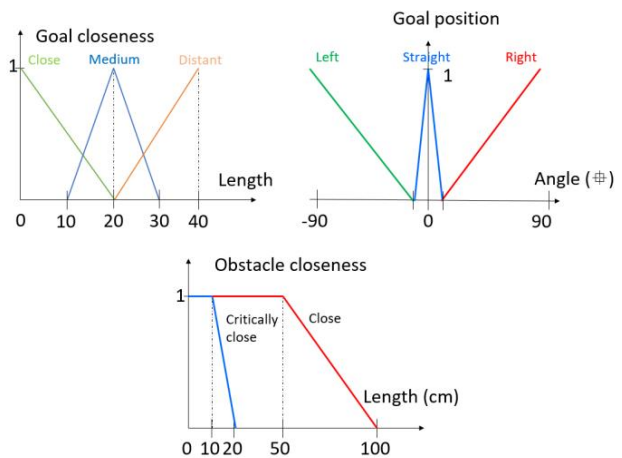


Fig. 8 – Membership functions [23]

The controller is programmed in python and runs under the ROS middleware [24]. Programs in ROS are organized into nodes that communicate with each other through ROS topics. This modular nature allows the FCM controller to run as its own node and receive relevant data through the ROS topics. It primarily listens to the “tf” topic for localisation and depth map data topic for sensor data. The overall running program structure can thus be visualised as Fig. 9.

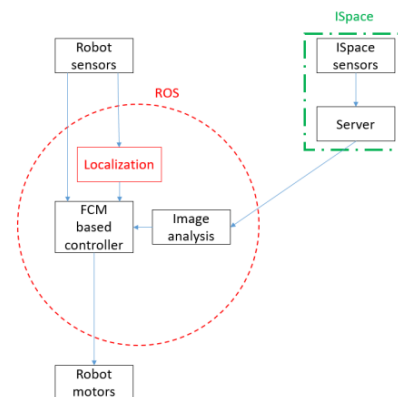


Fig. 9 – Program structure [23]

The system is able to navigate the robot a dynamic environment both in the real world and simulated conditions (Fig. 10).

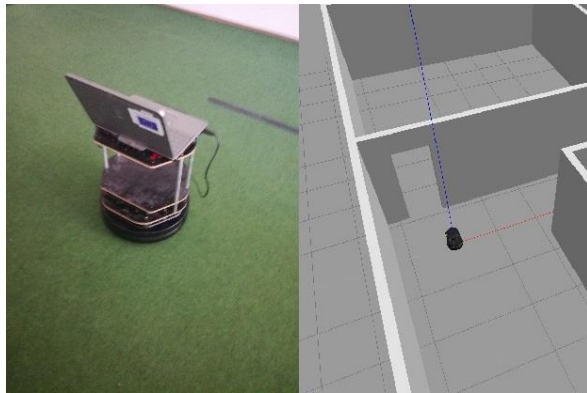


Fig. 10 – Real world and simulated world navigation [23]

The resulting system was tested and compared with manual teleoperation. As can be seen on Table III the system proved to be able to complete a given task significantly quicker than manual teleoperation. This primarily due to the system’s ability to smoothly regulate its speed during movement, which is something the default TurtleBot teleoperation does not provide.

TABLE III NAVIGATION COMPARISON

Trajectory type	Length	Navigation type	Time taken
Straight line	3m	Teleoperation	9.5s
Straight line	3m	FCM controller	6.9s
Single curve	4m	Teleoperation	15.0s
Single curve	4m	FCM controller	14.8s
Simple path	4m	Teleoperation	12.6s
Simple path	4m	FCM controller	10.3s
Complex path	5m	Teleoperation	24.6s
Complex path	5m	FCM controller	18.5s

VI. CONCLUSION

The designed Ubibot system was experimentally proven to be better than standard teleoperation and can be further used and expanded for additional research. Furthermore, the presented adaptation methods are not limited to a specific task and can be further utilized for adaptation of other FCMs.

REFERENCES

[1] “Correcting the IoT history” [Online]. [Accessed. March 2018] Available: www.chetansharma.com/correcting-the-iot-history/

[2] “Y.2060: Overview of the internet of things” [Online]. [Accessed. 2016]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-P/en>

[3] “What is the internet of things” [Online]. [Accessed. 2016]. Available: <http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>

[4] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M., 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp.1645-1660.

[5] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J. and Addepalli, S., 2012, August. Fog computing and its role in the internet of things. In *Proceedings of the*

first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing (pp. 13-16). ACM.

[6] Vascak, J., Hvizdos, J. and Puheim, M., 2016, September. Agent-Based Cloud Computing Systems for Traffic Management. In *Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS)*, 2016 International Conference on (pp. 73-79). IEEE

[7] Li, X., Lu, R., Liang, X., Shen, X., Chen, J. and Lin, X., 2011. Smart community: an internet of things application. *IEEE Communications Magazine*, 49(11), pp.68-75.

[8] Kim, J.H., Lee, K.H., Kim, Y.D., Kuppaswamy, N.S. and Jo, J., 2007, April. Ubiquitous robot: A new paradigm for integrated services. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 2853-2858). IEEE.

[9] Jiménez-González, A., Martínez-de Dios, J.R. and Ollero, A., 2013. Testbeds for ubiquitous robotics: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), pp.1487-1501.

[10] Saffiotti, A. and Broxvall, M., 2005, October. PEIS ecologies: Ambient intelligence meets autonomous robotics. In *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies* (pp. 277-281). ACM.

[11] Kim, T.H., Choi, S.H. and Kim, J.H., 2007. Incorporation of a software robot and a mobile robot using a middle layer. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(6), pp.1342-1348.

[12] Johanyák, Z.C. and Kovács, S., 2006. A brief survey and comparison on various interpolation based fuzzy reasoning methods. *Acta Polytechnica Hungarica*, 3(1), pp.91-105.

[13] Papageorgiou, E.I. and Salmeron, J.L., 2013. A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 21(1), pp.66-79.

[14] Vaščák, J. and Hvizdos, J., 2016, January. Vehicle Navigation by Fuzzy Cognitive Maps Using Sonar and RFID Technologies. In *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, 2016 IEEE 14th International Symposium on (pp. 75-80). IEEE.

[15] Mls, K., Cimler, R., Vaščák, J. and Puheim, M., 2017. Interactive evolutionary optimization of fuzzy cognitive maps. *Neurocomputing*, 232, pp.58-68.

[16] Hvizdoš, J., et al. Semi-Interactive Population-Based Optimization of Fuzzy Cognitive Maps. In preparation

[17] Puheim, M., Fuzzy Cognitive Maps for Control Tasks in Intelligent Space. in preparation

[18] Papageorgiou, E.I., Parsopoulos, K.E., Stylios, C.S., Groumpos, P.P. and Vrahatis, M.N., 2005. Fuzzy cognitive maps learning using particle swarm optimization. *Journal of Intelligent Information Systems*, 25(1), pp.95-121.

[19] Parsopoulos, K.E., Papageorgiou, E.I., Groumpos, P.P. and Vrahatis, M.N., 2003, December. A first study of fuzzy cognitive maps learning using particle swarm optimization. In *Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on* (Vol. 2, pp. 1440-1447). IEEE.

[20] “Hypercube” [Online]. [Accessed. March 2018]. Available: www.researchgate.net/figure/N-dimensional-Hypercube-Petrie-polygon-Orthographic-projections-from-n-1-up-to-n-8_fig8_268686702

[21] “Simplex” [Online]. [Accessed. March 2018]. Available: cdn.zmescience.com/wp-content/uploads/2017/06/170613_Brain2_Full.png

[22] Parsopoulos, K.E. and Vrahatis, M.N., 2002. Initializing the particle swarm optimizer using the nonlinear simplex method. *Advances in intelligent systems, fuzzy systems, evolutionary computation*, 216, pp.1-6.

[23] Hvizdos, J., Ubiquitous Robotics in Intelligent Space, New Approaches in Navigation of Ubiquitous Robots. PhD. Thesis. in preparation

[24] “Robot Operating System” [Online]. [Accessed. March 2018]. Available: www.ros.org/

Source Code Annotations in Development Environments Supporting Metadata

Ján Juhár

Department of Computers and Informatics
Technical University of Košice, Slovakia
jan.juhar@tuke.sk

Liberios Vokorokos

Department of Computers and Informatics
Technical University of Košice, Slovakia
liberios.vokorokos@tuke.sk

Abstract—Integrated development environments include many useful tools for program comprehension tasks. However, these tools are limited to the solution domain of software systems, due to the semantic gap. In this work we present metadata-aware development environments aiming to capture, preserve and present high-level metadata related to source code, with a goal to provide tools for program comprehension closer to the problem domain. We focus on their first aspect: support for an annotation process, during which metadata are bound to the source code with annotations. Contributions of the work are as follows.

First, a study observing how programmers annotate source code with metadata containing high-level concerns is conducted with the objective to examine used annotations granularity levels. Second, an abstracted annotating unified for available annotation types is designed and realized in a prototype plug-in implementation. On the basis of the implementation, the viability of adding metadata-aware tool support to contemporary integrated development environment is evaluated. Third, an experimental evaluation of implemented plug-in is presented. Two groups of programmers annotate source code with comment annotations: experimental group with the plug-in, control group in a standard setup. Differences in annotation comment placement consistency and annotating speed are statistically evaluated.

Abstract—Integrované vývojové prostredia obsahujú viacero nástrojov užitočných pre porozumenie programov. Tieto nástroje sú však obmedzené na doménu riešenia softvérových systémov, kvôli existencii sémantickej medzery. V tejto práci predstavujeme vývojové prostredia s podporou metaúdajov, ktoré majú za cieľ zachytiť, uchovať a prezentovať vysoko-úrovňové metaúdaje s cieľom poskytnúť nástroje pre porozumenie programov, ktoré budú pracovať bližšie k problémovej doméne. Zameriavame sa na ich prvý aspekt: podporu anotačného procesu, počas ktorého dochádza k prepojeniu metaúdajov s kódom prostredníctvom anotácií. Prínosy práce sú nasledovné.

Po prvé, je vykonaná štúdia, v ktorej sledujeme ako programátori anotujú zdrojový kód metaúdajmi obsahujúcimi vysoko-úrovňové záujmy, s cieľom skúmať granularitu použitých anotácií. Po druhé, je navrhnutý abstrahovaný anotačný proces, zjednotený pre dostupné typy anotácií. Tento je aj realizovaný ako prototyp zásuvného modulu pre vývojové prostredie. Na základe jeho implementácie je vyhodnotená realizovateľnosť podpory metaúdajov v súčasných vývojových prostrediach. A po tretie, je vykonané experimentálne overenie implementovaného zásuvného modulu. Dve skupiny programátorov anotovali kód pomocou komentárov: experimentálna skupina s modulom, kontrolná skupina v štandardnom prostredí. Rozdiely medzi skupinami ohľadom konzistentnosti umiestňovania anotačných komentárov a rýchlosti anotovania sú štatisticky vyhodnotené.

Index Terms—Code annotations, code metadata, development environments, program comprehension.

I. INTRODUCTION

Program comprehension is a cognitive process that involves analysis of the source code and retrieval of information and knowledge about the analysed system. As a number of researches point out, this process tends to take up to a half of programmers' time during their work with the source code [1]–[4]. The main hindrance programmers face while comprehending the source code is the wide *semantic gap* (also called *abstraction gap*) that exists between the problem domain and the solution domain [5]. The problem domain is represented by a high-level description of program's concerns and the solution domain by specific implementation of these concerns in a programming language. Much information of the problem domain is either lost or scattered during the transformation to the source code. This may be the reason why LaToza *et al.* [6] report the most frequently asked—and hard to answer—questions about source code deal with its intent: what it does, what it is intended to do and why it is implemented in a specific way? Also according to Vranić *et al.* [7] understanding the original intent behind a piece of code represents a significant problem in software development.

The supporting programming tools can be found either as stand-alone solutions or as parts of a suite of integrated tools known as *Integrated Development Environment* (IDE). Experiment conducted by Kosar *et al.* [1] shows that IDE tools have significantly positive influence on correctness of results of programming tasks. However, Damevski *et al.* [8], who observed how programmers locate features in source code using IDE search tools, call for context-aware tools in development environments.

A. Motivation

IDEs have become the most complex and complete toolsets for working with source code. Their code editors, various code structure browsers and search tools are used in the process of static code comprehension. In a modern IDE these tools “understand” the structure of the source code [9]–[11]: IDE parses the code to create its structured representation as a form of an *abstract syntax tree* (AST) and integrated tools can use it to provide *structure-aware* visualizations (e.g., file structure browser, semantic code highlighting) and operations (e.g. contextual code completion, refactoring).

Even though data and views that IDEs provide are extracted from the entire software project the programmer is working with, the extraction happens only at the (low) level of the solution domain. IDEs are constructed to work with code *intrinsic metadata* [11] stemming from the semantics and coding conventions of the implementation language, which in return makes them usable on any codebase. But tool support for bridging solution domain with the problem domain needs *additional* code-related metadata that capture the higher-level details.

All these reasons lead us to the main motivation of our work: a *metadata-aware IDE layer* that leverages the additional information present in *source code annotations*. In the following we present our reasoning behind the premise that code metadata are needed to bring the supporting tool’s “understanding” of a software system closer to the problem domain.

1) *Need of Code Metadata*: Two general approaches for retrieving information otherwise lost or scattered in the code shaped up over time:

- *recovery* of the information from the code by means of reverse engineering, and
- *preservation* of programmer’s thoughts and intentions in software artefacts.

In both cases, the retrieved information represents *source code metadata* (abbreviated: metadata).

Some kind of information, however, may be too dissolved within the code to be recovered by methods of reverse engineering. This is especially true for design decisions [12] because these do not translate into code (not even through naming conventions) that would made possible to identify them. On the other hand, methods that proactively preserve high-level details during *edit-time* have an advantage of being able to significantly narrow the semantic gap [13].

Consider, for example, a method of concern annotation through LLAs, an usage of which is shown on Java annotations in listing 1. The annotations `@NoteChange` and `@TagManagement` are used as additional high-level metadata that explicitly convey concerns implemented by the annotated method `addTag()`. As Sulír *et al.* show in [14], this method enables rapid construction of reader’s mental model of the implementation.

Listing 1. Java annotations as high-level concern metadata

```

1 @NoteChange
2 @TagManagement
3 public void addTag(String tag) {
4     // ...
5 }
```

It is thus evident that recovered metadata are of different nature than the preserved metadata. Recovering approaches use only *intrinsic metadata*, which define the source code elements themselves. In contrast to them, preserving approaches focus on *extrinsic metadata* which complement the intrinsic

ones, and cover high-level metadata explicitly assigned to the elements by a programmer.

Of course, the explicit recording of the code author’s mental model comes with an additional cost: the author must spend some extra time to record it. However, we hypothesize that *appropriate granularity* of high-level details combined with effective methods for *capturing*, *preserving* and *presenting* them can keep the benefits of more detailed mental model above this cost.

2) *The Role of Supporting Tools*: Ji *et al.* [15] argue that presence of feature-related metadata in a form of annotations embedded in comments was beneficial for software development. In their study that gained this result they did not use any metadata supporting tool that could simplify annotation process or provide advanced code visualizations based on the available metadata. But they presume that by employing a supporting tool, the benefits of the metadata could be further increased.

The usage of *comment annotations* in the study described above makes it clear that the language-level annotations are not the only way to associate—or *bind*—custom metadata to source code elements. However, if we want to treat the metadata bound within comments more sophisticatedly than just unstructured text present in source code, a supporting tool is even more important. A development environment recognizing and working with comment annotations similarly to *Java* annotations may contribute to the endeavour to reduce the cost of metadata recording.

Ideally, a programmer would not have to consider all the different ways in which metadata can be bound to the code, but simply *express the intention* to assign metadata to specific source code elements and let a tool perform and preserve the assignment. This goal is in our work proposed through the idea of *metadata-aware* development environment, introduced in section IV.

B. Research Goals of our Work

The *Metadata-Aware Development environment (MADE)*, as proposed later in section IV, is covered by three aspects. Each one of them presents challenges for both research and development. In this work, we primarily focus on the first aspect: on the *annotation process*.

Below we present research questions related to annotation process design and evaluation of its prototype implementation, outline contexts in which they are evaluated and discuss their impact on *MADE*. The primary research goal of this work are defined by these questions.

What levels of extrinsic metadata granularity are considered useful by programmers? To see how programmers use annotations from the perspective of annotated code fragments granularity, we perform a study in which source code authors annotate it with a simple free-form code annotating tool. The results of the study should provide an insight into what granularities should be supported by *metadata-aware* tools.

Is metadata awareness viable in current IDEs? To see whether and to what degree can be contemporary professional

IDEs made *metadata-aware*, we propose design of annotation process tool support and experiment with its implementation in an IDE plug-in that supports the process with both external and structured comment annotations. The outcome should be both prototype implementation of annotation process and experimental evidence of its viability by extension of a contemporary IDE.

Does IDE, aware of metadata in comments, help programmers in annotating code? Regarding our focus on the annotation process, we perform an experiment in which we evaluate benefits our IDE plug-in provides for this process. On a code annotation task performed by two groups of programmers (one group working with our IDE plug-in, the other with standard IDE) we assess the effects of the tool on programmers' annotating speed and consistency with provided rules.

II. SOURCE CODE ANNOTATIONS

Source code annotations (abbreviated: annotations) are often understood in a sense of annotations available in the *Java* language. We use the term *annotation* in a more general meaning: we consider any binding of metadata to source code as code annotation. Borrowing the basis of the annotation definition from Nosál' *et al.* [16], we define source code annotations in definition 1.

Definition 1 *Annotations are in-place or addressing bindings of custom metadata to source code elements.*

We also define the *annotation process* (abbreviated: *annotating*) in definition 2.

Definition 2 *Annotation process, or annotating, is a process in which metadata are being bound to code elements.*

In general, a programmer has three options to chose from when faced with a task to annotate code with metadata. Each of these options represent a concrete *annotation type*. These types are the following:

- *Language-level annotations* (LLAs) that use native programming language constructs for specifying metadata.
- *Structured comment annotations* (SCAs) that give special meaning to generic comments.
- *External annotations* (EAs) that are created and bound to the source code solely by means of a supporting tool.

Each of these annotation types has a different set of inherent limitations and thus fits different use cases. Fig. 1 shows them in relation to each other and we discuss them in the following.

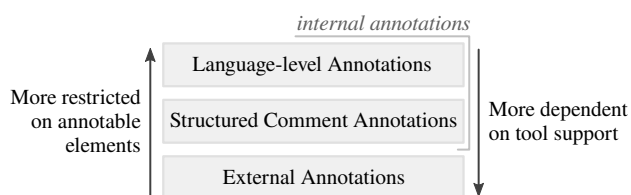


Fig. 1. Properties of annotation types

A. Language-level Annotations

We already touched on the topic of LLAs in section I-A1 where we gave an example with *Java* annotations. A notable advantage of this annotation type is that it represents a standard mechanism for adding metadata to source code elements in programming languages that support it. These annotations are formally defined: they are bound to code elements by in-place bindings defined directly in the language's grammar.

Because LLAs are a feature of their language, all standard language tools (e.g., parsers, interpreters, or analysers) support them. On the other hand, being language-level feature is also a significant disadvantage for LLAs: the feature must be present in the language. And if it is present, the question is which elements can be annotated with them.

B. Structured Comment Annotations

If LLAs are not available, their role in high-level concern preservation can be filled in by SCAs. Because they reuse general source code comments, there needs to be a way for parsing the persisted metadata, preferably formally and not by processing natural language used in comments. An example of a structured comment annotation using custom syntax is shown in listing 2. It contains the same metadata as *Java* annotations in listing 1.

Listing 2. High-level metadata in structured comment annotation

```

1 // [# note change ] [# tag management ]
2 public void addTag(String tag) {
3     // ...
4 }

```

SCA can be used in almost any language; the only requirement is that a comment can be put at the required place in the code. However, such annotation can be meaningfully processed only by a dedicated tool that recognizes their notation and is able to bind them to specific code elements.

C. External Annotations

When compared with LLAs an SCAs, external annotations (EAs) employ a significantly different approach to code annotation. The most notable difference is that EAs are not part of the source code files. They are superimposed over the code by means of an addressing mechanism that determines which code elements are annotated. Usually, elements annotated with EAs are graphically marked as annotated in a supporting code editor. An example of such marking is given in Fig. 2.

The most significant advantage of this annotation type is that arbitrary code fragments in any language can be annotated, even inside files a programmer cannot (or does not want to) modify. On the other side, their external nature raises a problem of keeping them in sync with changes made to the code they annotate. And also, the annotations are completely dependent on the supporting tool that can process used addressing mechanism and bind them to the code.

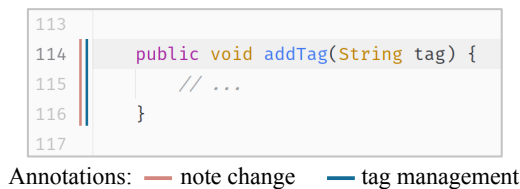


Fig. 2. Metadata bound to code fragment through external annotations displayed in the editor's gutter

III. METADATA AND SUPPORTING TOOLS

In this section we focus on the existing applications of source code metadata in tools supporting programming activities.

A. Usage of Intrinsic Metadata in IDEs

Parser-based nature of many of the current development environments provides an opportunity to integrate information extracted from a parsed source code structure into the environment and make it readily available for its users—programmers. All this information, presented through IDE code editors and views, is being leveraged by programmers [8], [17] and was shown to have positive effect on their ability to perform program comprehension tasks [1].

Among the first IDEs to include parsers in their infrastructure was *IntelliJ IDEA* [9], closely followed by *Eclipse*. The AST-based features, which relied on the parser, quickly became dominant among the IDE features [18]. Taking *IntelliJ IDEA* as an example, such features can be found in code editors (e.g., code folding, navigation, inlay elements) and code visualizations (e.g., numerous structure views and search tools).

B. Leveraging Extrinsic Metadata

In comparison with the intrinsic metadata extractable from the code, extrinsic metadata come from the outside; they may represent a programmer's knowledge of the code. There are several categories of tools that make use of such metadata:

- *Task-oriented tools*: metadata are gathered from programmer's interactions with the environment during a specific programming task and used to augment IDE tools. Arguably the most prominent example is represented by *Mylyn* [19].
- *Concern-oriented tools*: designed to support high-level concerns through various types of explicit source code annotations, associated with We can find tools that use concern assignment through external annotations (e.g., *Concern Highlight* by Nistor and Hoek [20]) or java annotations (*SSCE* by Nosál' [21]), accompanied by corresponding *in situ* visualizations (highlighting code pertaining to selected concerns) and projections (altering the view on the source code in editor).

C. Towards Integration of Custom Metadata

Analysing properties of reviewed solutions, we make the following observations:

- 1) IDEs are, by design, highly oriented towards usage of intrinsic metadata.
- 2) Extrinsic metadata are employed in various ways in works of researchers, who support task-oriented processes or focus on metadata explicitly representing high-level software concerns.
- 3) Supported granularity levels at which annotations are applicable are fixed for a specific tool and mostly restricted to the *declaration* level of classes and direct class members.
- 4) Annotations of all three available types are used by existing approaches, but no single approach support them all.

Especially the last two observations are highly relevant to our work. In the following section we present a concept of a development environment supporting extrinsic metadata, with its annotation process unified for all annotation types detailed later in section VI.

IV. METADATA-AWARE DEVELOPMENT ENVIRONMENT

The *metadata-aware IDE layer* is a representation of an idea to leverage extrinsic source code metadata in IDE tools and code views, in order to provide program comprehension support on higher level of abstraction. We developed this idea into a concept of what we call *Metadata-Aware Development Environment*. We recognize three aspects that, if incorporated into a development environment, would constitute the transition from traditional IDE to *MADE*. They are outlined in the following:

- *Support for the annotation process*. Different types of available annotations, conventions for annotatable source code element granularities or annotation placements; all together they represent a decision-making barrier a programmer must overcome when annotating source code. However, a supporting environment can automate some of those decisions and provide unified interface for performing individual steps of the annotation process in order to minimize the associated overhead (see section VI).
- *Preservation of annotations and metadata*. Outside of the cases of *semantic* changes to the code or explicit annotation removal by a programmer, the environment should ensure that annotated elements remain annotated and that bound metadata can be accessed.
- *Utilization of metadata*. Any improvements to program comprehension tasks the bound metadata may provide to programmers are determined by the means of utilization of these metadata in the development environment and other tool with access to the metadata. Fortunately, there is a plenty of options that present themselves, both already tried ones and those yet requiring proper design. They range from simple augmentation of IDE code structure views and search results, through metadata querying facilities, to advanced source code *projections*. Considering external information sources, metadata representing links between source code and relevant high-level design documentation are also possible.

V. DETERMINING USEFUL CONCERN GRANULARITY

One property common to many found and reviewed approaches is the granularity level they use to describe concerns in the code: *declaration* of classes, class methods and fields. Although there are arguments about a balance between required effort and usefulness of this granularity [22], finer granularities were not evaluated. However, if concern-oriented projection are to be constructed on the basis of concern description, the used granularity is important for the final result.

To find out what granularities would be used by programmers to capture concerns in the code if the used tool had no granularity limitations, we conducted a case study¹ comprising of 5 programmers “tagging” concerns in a known code base with our own simple tagging tool using external annotations (the tool can be seen in Fig. 2). Tagged codes were written in languages C (participants *C1* and *C2*), Java (participants *J1* and *J2*), and Python (participant *P*).

The resulting distribution of concern granularity levels among tagged code fragments is shown in Fig. 3. We can see that each participant used a significant amount of tags covering a statement or a group of consecutive statements inside methods. And 19 out of all 85 identified concerns had this *statement* tags as their coarsest granularity.

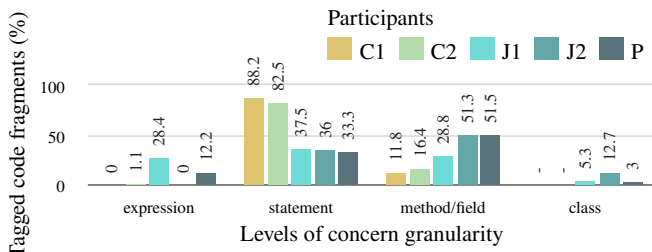


Fig. 3. Distribution of concern granularity levels among tagged fragments

The results of the study indicate that the usage of *sub-method* concern granularities should be considered, despite that most of existing tools do not use them.

VI. ABSTRACTED ANNOTATION PROCESS

As stated in definition 2, annotation process (or *annotating*) is an activity of binding metadata to source code. Our focus on custom extrinsic metadata, which often describe high-level concerns present in the source code, allows us to assume that this activity is going to be performed by humans—programmers, who possess such high-level knowledge. Their goal may be, e.g., to capture their mental model of the code within a form that can be leveraged by supporting tools and can also be helpful to other programmers. Thus, the process cannot be fully automated (if it could be, probably we would not need annotations in the first place). Nonetheless, a comprehensive tool support can be created if we identify those aspects of the process that can be automated. We provide our proposal of such tool support in the following:

¹The study was originally presented in [23].

- 1) *Specify object of annotation*: With structural rules for annotatable code fragments in place, metadata-aware tool can visualize which code fragments can be selected for annotation and mark as selected the one chosen by user.
- 2) *Specify subject of annotation*: Metadata-aware tool can fully automate selection of annotation type to use, according to their applicable contexts discussed in section II: LLAs should be used when supported by the language, EAs on read-only code, and SCAs in the rest of the cases.
- 3) *Perform annotation*: When provided with the metadata to use, the tool can prepare and apply the annotation to the selected annotatable code fragment with selected annotation type automatically. Comment annotations need to be specially supported by rules defining their relative placements to elements they annotate.
- 4) *Keep the annotation up-to-date*: Integration of metadata and annotations management into an IDE should be achieved through a set of actions unified across all annotation types.

VII. PROTOTYPE METADATA-SUPPORTING IDE LAYER

Based on the proposed tool support for annotation process, we implemented tool *Connotator*²—a prototype IDE plug-in for working with custom metadata.³

Connotator is designed with the following two key properties in mind. First, *the annotation process is an abstraction* that allows to work with each annotation type in the same way. This means the user can work with any annotation through a set of uniform operations for adding, deleting and managing them. And second, *granularity of annotatable code elements is configurable* by specifying code element tree patterns that restrict which code elements can be annotated based on their type and placement in the abstract syntax tree.

The plug-in is implemented for IDEs based on the *JetBrains IntelliJ*⁴ platform. It provides extension points for defining annotatable element patterns for specific programming languages (currently implemented for Java, Kotlin, and Python) and for handling different annotation types (currently EAs and SCAs).

Fig. 4 shows how *Connotator* augments IDE code editor to support metadata present in SCAs. Comment annotations shown there were placed automatically by the tool after the user performed code fragment annotating action. Comment annotation placement can be configured; in the shown code the annotation of the interface `Listener` is placed into documentation comment, while property `TOPIC` is annotated by an end-of-line comment.

Another goal of realization of the presented plug-in was to assess viability of implementation of such metadata-supporting tool in contemporary IDE. Based on the observed behaviour of *IntelliJ* platform during implementation of low-level extrinsic metadata support (i.e., of a requirement to keep annotations

²<https://git.kpi.fei.tuke.sk/jan.juhar/connotator>

³Parts of the design of the tool were previously presented in [24].

⁴<https://github.com/JetBrains/intellij-community>

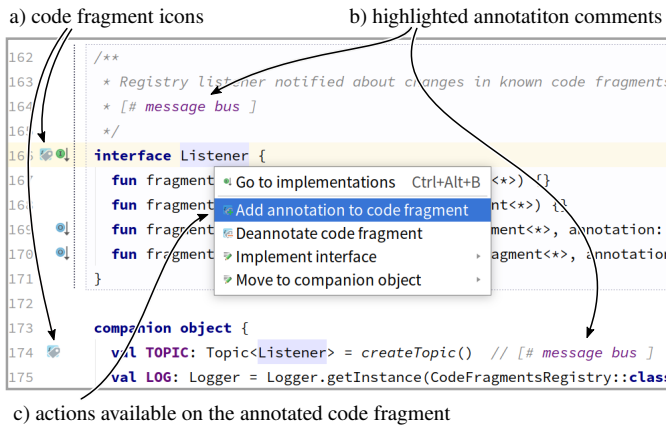


Fig. 4. IDE editor augmented with SCA metadata support: (a) location of annotated fragments is marked by gutter icons, (b) annotations present in comments are highlighted, and (c) annotation-related actions are available.

valid as the code changes) we can conclude that problems can arise due to the IDE’s design assumption that all metadata are based on the current state of the source code.

VIII. EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ANNOTATION PROCESS TOOL SUPPORT

For the purpose of evaluation of any improvements our tool *Connotator* can have on the annotation process, we prepared a task in which a portion of selected application’s code base is needed to be annotated with comments containing high-level concern metadata. We also specify what kinds of code elements can be annotated and what are the rules regarding placements of comments with metadata in relation to the annotatable elements: together, a set of constraints called annotation rules.

In this section we present an experiment in which we compare two groups of programmers performing the described task. The first, experimental group, uses *IntelliJ IDEA* with *Connotator* installed and the second, control group, uses *IntelliJ IDEA* in its default setup. Our hypothesis for the experiment is two-fold. We hypothesize that:

- The *placement consistency* of comment annotations created during code annotation task in the experimental group will be higher than the placement consistency in the control group.
- The *annotating speed* during code annotation task in the experimental group will be higher than the annotating speed in the control group.

We had 36 participants (students) in the experiment: 20 in the experimental group and 16 in the control group. The results of the experiment are summarized in table I. The unit *@/min* is used to represent annotating speed in number of annotations per minute. To calculate the statistical significance level *p* of the results we used the Mann-Whitney U test. Hypotheses were evaluated with a confidence level of 95%.

We successfully confirmed the hypothesis that *Connotator* increases placement consistency of comment annotations according to annotation rules. The group of participants working

TABLE I
RESULTS OF EXPERIMENTAL EVALUATION

groups	Placement Consistency [%]		Annotating speed [@/min]	
	Connotator	manual	Connotator	manual
median	100	92.8	1.72	1.32
mean	99.59	83.55	2.07	1.48
<i>p</i>	< 0.001		0.11	

with our tool achieved more than 7 percentage points higher placement consistency (practically 100%) in comparison to control group, with significance level $p < 0.001$.

On the other hand, we did not confirm the hypothesis that *Connotator* increases annotating speed. While group working with *Connotator* achieved more than 30% higher annotating speed (along with more than 22% lower duration of the annotating session) in comparison to the control group, the difference was not statistically significant with $p = 0.11$, which was above our significance level.

IX. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This work focused on source code annotations and on metadata they bind to the source code. The core idea of *metadata-aware* development environments (section IV) was developed primarily on the basis of calls for context awareness of tools in development environments to advance support of program comprehension tasks [2], [8], and on our observations regarding limits of extrinsic metadata support in areas of their granularity and types of applicable annotations (section III).

The design of abstracted annotation process, unified across all annotation types, began with a study for finding useful granularity levels for metadata-binding annotations (section V). Observations made in the study were utilized in design of an annotation process with customizable sets of annotatable code fragments (section VI), which was realized by implementation of IDE plug-in *Connotator* (section VII). The presented work ended with an experimental evaluation of the annotation process, showing positive effects on performance of programmers during annotating task (section VIII) and encouraging us towards further evolution and evaluation of developed ideas and solutions.

Regarding the future work, a *metadata model* consisting of both intrinsic and extrinsic code-related metadata can be designed. Such model can become a basis for the environment’s code querying facility, which is essential to extract code related to specific information expressed by the queries and contained in code-bound metadata. Considering all metadata to be bound to code elements, the queries can be realized as graph transformations, conceptually similar to those used in *FEAT* [25] or more recently in a concept of *scriptable IDE* by Asenov *et al.* [26]. Furthermore, linking external documents, as done by Baltes *et al.* [27] is another direction worth exploring. Combination of intrinsic and extrinsic metadata could further expand the potential of *MADE*.

Another goal is to work on *source code projections based on high-level metadata*, which will consist of designing and

implementing *multiple file* editable projections [21]. Such projection should be able to use metadata querying mechanism and transform the query's result into a concentrated view of a source code relevant to a programmer's task at hand, facilitating program comprehension and high-level concern exploration. It will require substantial design evaluation, primarily in relation to combining disjoint source code fragments of various granularities into a coherent code view.

Finally, another challenge will be preparation and execution of studies and experimental evaluations of the designed and implemented *metadata-aware* supporting tools. Evaluation on large-scale software projects will be required to comprehensively assess contributions of the supporting tools and of the whole idea of metadata awareness to the program comprehension activities.

REFERENCES

- [1] T. Kosar, M. Mernik, and J. C. Carver, "The impact of tools supported in integrated-development environments on program comprehension," in *33rd International Conference on Information Technology Interfaces (ITI'11)*, 2011, pp. 603–608.
- [2] W. Maalej, R. Tiarks, T. Roehm, and R. Koschke, "On the Comprehension of Program Comprehension," *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, vol. 23, no. 4, pp. 31:1–31:37, aug 2014.
- [3] R. Minelli, A. Mocchi, M. Lanza, and T. Kobayashi, "Quantifying Program Comprehension with Interaction Data," in *2014 14th International Conference on Quality Software*, oct 2014, pp. 276–285.
- [4] M.-A. Storey, "Theories, Methods and Tools in Program Comprehension: Past, Present and Future," in *13th International Workshop on Program Comprehension (IWPC'05)*. IEEE, 2005, pp. 181–191.
- [5] M. Nosál' and J. Porubán, "Program Comprehension with Four-layered Mental Model," in *13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES'15)*, Oradea, 2015, pp. 133–136.
- [6] T. D. LaToza and B. A. Myers, "Hard-to-answer questions about code," in *Evaluation and Usability of Programming Languages and Tools on - PLATEAU '10*. ACM Press, oct 2010, pp. 1–6.
- [7] V. Vranić, J. Porubán, M. Bystrický, T. Frt'ala, I. Polášek, M. Nosál', and J. Lang, "Challenges in Preserving Intent Comprehensibility in Software," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 12, no. 7, pp. 57–75, 2015.
- [8] K. Damevski, D. Shepherd, and L. Pollock, "A field study of how developers locate features in source code," *Empirical Software Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 724–747, apr 2016.
- [9] M. Fowler, "Projectional Editing," 2008. [Online]. Available: <http://martinfowler.com/bliki/ProjectionalEditing.html>
- [10] D. Jemerov, "Implementing refactorings in IntelliJ IDEA," in *Proceedings of the 2nd Workshop on Refactoring Tools - WRT '08*. ACM Press, oct 2008, pp. 1–2.
- [11] M. Nosál', J. Porubán, and M. Nosál', "Concern-oriented source code projections," in *Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Kraków, 2013, pp. 1541–1544.
- [12] P. Kruchten, R. Capilla, and J. C. Dueñas, "The Decision View's Role in Software Architecture Practice," *IEEE Software*, vol. 26, no. 2, pp. 36–42, mar 2009.
- [13] J. Porubán and M. Nosál', "Leveraging Program Comprehension with Concern-oriented Source Code Projections," *3rd Symposium on Languages, Applications and Technologies. OpenAccess Series in Informatics (OASISs)*, vol. 38, pp. 35–50, 2014.
- [14] M. Sulír, M. Nosál', and J. Porubán, "Recording concerns in source code using annotations," *Computer Languages, Systems and Structures*, vol. 46, pp. 44–65, nov 2016.
- [15] W. Ji, T. Berger, M. Antkiewicz, and K. Czarnecki, "Maintaining feature traceability with embedded annotations," in *Proceedings of the 19th International Conference on Software Product Line - SPLC '15*. New York, New York, USA: ACM Press, 2015, pp. 61–70.
- [16] M. Nosál', M. Sulír, and J. Juhár, "Language composition using source code annotations," *Computer Science and Information Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 707–729, 2016.
- [17] G. Murphy, M. Kersten, and L. Findlater, "How are Java software developers using the Eclipse IDE?" *IEEE Software*, vol. 23, no. 4, pp. 76–83, jul 2006.
- [18] D. Hou, "Studying the evolution of the Eclipse Java editor," in *Proceedings of the 2007 OOPSLA workshop on eclipse technology eXchange - eclipse '07*. ACM Press, oct 2007, pp. 65–69.
- [19] M. Kersten and G. C. Murphy, "Mylar: a degree-of-interest model for IDEs," in *Proceedings of the 4th international conference on Aspect-oriented software development - AOSD '05*. ACM Press, mar 2005, pp. 159–168.
- [20] E. C. Nistor and A. V. D. Hoek, "Concern highlight: A tool for concern exploration and visualization," in *Proceedings of the 2006 Workshop on Linking Aspect Technology and Evolution*, 2006. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.83.3370{\&}rep=rep1{\&}type=pdf>
- [21] M. Nosál', "Leveraging Program Comprehension with Concern-oriented Projections," PhD Thesis, Technical University of Košice, 2015.
- [22] M. P. Robillard and G. C. Murphy, "Concern graphs: finding and describing concerns using structural program dependencies," in *International Conference on Software Engineering, 2002. ICSE'02, 2002*, pp. 406–416.
- [23] J. Juhár and L. Vokorokos, "Separation of concerns and concern granularity in source code," in *2015 IEEE 13th International Scientific Conference on Informatics*. IEEE, nov 2015, pp. 139–144.
- [24] —, "Towards a Uniform Code Annotation Approach with Configurable Annotation Granularity," in *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics*, 2017, pp. 152–157.
- [25] M. P. Robillard and G. C. Murphy, "Representing concerns in source code," *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, vol. 16, no. 1, p. 38, feb 2007.
- [26] D. Asenov, P. Müller, and L. Vogel, "The IDE as a scriptable information system," in *Proceedings of the 31st IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering - ASE 2016*. New York, New York, USA: ACM Press, 2016, pp. 444–449.
- [27] S. Baltes, P. Schmitz, and S. Diehl, "Linking sketches and diagrams to source code artifacts," in *Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering - FSE 2014*. New York, New York, USA: ACM Press, 2014, pp. 743–746.

Výskum vplyvu elektromagnetických polí na biologické Systémy

Michal Kosterec, Juraj Kurimský
Katedra elektroenergetiky
Technická univerzita v Košiciach, FEI
Košice, Slovenská republika
michal.kosterec@tuke.sk, juraj.kurimsky@tuke.sk

Blažena Vargová
Parazitologický ústav
Slovenská akadémia vied
Košice, Slovenská republika
vargova@saske.sk

Abstract—The exposure of biological and technical systems to artificial electromagnetic fields is rapidly increasing with the development of wireless data transmission. Recently, studies are focusing on electromagnetic compatibility between sources of electromagnetic radiation and biological and technical systems. The sources of the electromagnetic field should not affect nor endanger the biological organisms and should not disturb the function of the technical devices. Many publications point to the fact that biological organisms react to electromagnetic fields. This work is focused on the research of the influence of the electromagnetic field on biological systems. This paper work presents 2 new methods for exposure of ticks (*Dermacentor reticulatus*), which are most explored in the territory of the Slovak Republic, by non-ionizing radiofrequency (900 MHz and 5000 MHz) electromagnetic fields are presented and implemented. Statistical methods have proven the sensitivity of ticks to electromagnetic fields.

Keywords—electromagnetic field, tick, exposure, influence of electromagnetic field;

Abstrakt-- Expozícia biologických a technických systémov umelými elektromagnetickými poliami sa rýchlo zvyšuje s rozvojom bezdrôtového prenosu údajov. V poslednej dobe sa štúdie zameriavajú na elektromagnetickú kompatibilitu medzi zdrojmi elektromagnetického žiarenia a biologickými a technickými systémami. Zdroje elektromagnetického poľa by nemali ovplyvňovať ani neohrozovať biologický organizmus a nemali by narúšať správnu funkciu technických zariadení. Mnoho publikácií poukazuje na to, že biologické organizmy reagujú na elektromagnetické polia. Táto práca je zameraná na výskum vplyvu elektromagnetického poľa na biologické systémy. Práca prezentuje návrhy a realizácie 2 nových metód pre expozičnú kliešťov (*Dermacentor reticulatus*), ktoré sa najviac vyskytujú na území Slovenskej republiky, neionizujúcimi rádiovými frekvenciami (900 MHz a 5000 MHz) elektromagnetickými poliami. Štatistickými metódami bola dokázaná citlivosť kliešťov na elektromagnetické polia.

Kľúčové slová—elektromagnetické pole, kliešť, ožarovanie, vplyv elektromagnetického poľa

I. ÚVOD

Elektromagnetické pole je dôležitým faktorom ovplyvňujúcim životné prostredie všetkých foriem života. Toto pole existovalo pred samotným životom. Prírodné zdroje produkujú elektromagnetické pole s hustotou výkonu 10^{-8} - 10^9 W/m² vo frekvenčnom rozsahu od 1 kHz do 300 GHz. Biologické systémy sú však vystavené podobnému, ale oveľa intenzívnejšiemu žiareniu. Je to umelé elektromagnetické pole nazývané aj elektromagnetický smog s povrchovou hustotou 10 - 2 W/m², vo vnútri budov až do 6 W/m². To znamená, že tieto hodnoty výrazne prevyšujú hodnotu elektromagnetických polí vychádzajúcich z prírodných zdrojov [1]. Živé organizmy sa počas vývoja prispôbili výhradne prirodzenému elektromagnetickému poľu. To naznačuje, že umelé elektromagnetické žiarenie je pre biologické systémy "cudzí", a preto môže spôsobovať zmeny v biologických systémoch.

Vplyvom elektromagnetického poľa na ľudstvo sa zaoberá Svetová zdravotnícka organizácia (WHO, World Health Organisation) a Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). ICNIRP vydalo usmernenie [2], podľa ktorého by zariadenia produkujúce elektromagnetické pole nemali prekračovať povolené hodnoty intenzít elektrického poľa alebo magnetického poľa. Prekročením povolených hodnôt sa elektromagnetické pole stáva potenciálne nebezpečné pre ľudské telo. V Slovenskej republike sú vydané vyhlášky, ktoré ustanovujú najvyššie prípustné hodnoty ožiarenia elektromagnetickým poľom a požiadavky na skúšanie rôznych zdrojov elektromagnetického žiarenia [3][4].

Biologický účinok elektromagnetického žiarenia na človeka závisí od niekoľkých objektívnych a subjektívnych parametrov [5]:

1. Fyzikálne parametre:
 - použitý rozsah frekvencií,
 - intenzita elektromagnetického žiarenia,
 - doba ožiarenia.
2. Fyzikálno-chemické vlastnosti organizmu:
 - rozmery,
 - hmotnosť,
 - elektrické vlastnosti odevu
 - hrúbky vrstiev (koža-tuková vrstva-svalstvo)
 - obsah vody
 - okamžitý zdravotný aj psychický stav organizmu
 - prípadné súčasné pôsobenie iných záťažových či stresových faktorov

Pri používaní mobilných telefónov, bluetooth zariadení, rádii a pod. sa telo vystavuje vysokofrekvenčnému elektromagnetickému poľu vo frekvenčnom rozsahu 30 kHz až 300 GHz. V pracovných priestoroch sa môže vyskytnúť vysoko výkonný zdroj produkujúci elektromagnetické pole s vyššou energiou ako elektromagnetické pole produkované mobilným telefónom, ale pritom lokálne pohltená energia mozgom je vo všeobecnosti nižšia v porovnaní s lokálne pohltanou energiou mozgom pri používaní mobilného telefónu. Priemerná expozícia pri používaní bezdrôtových pevných liniek je približne päťkrát nižšia ako u mobilných telefónov GSM, a telefóny tretej generácie (3G) vyžarujú v priemere približne 100 krát menej energie ako GSM telefóny. Podobne sa odhaduje, že priemerný vyžiarený výkon bluetooth bezdrôtových súprav je približne 100 krát nižší ako pri mobilných telefónoch [6].

V posledných rokoch sa vykonávajú štúdie na overenie priamych účinkov elektromagnetického poľa na funkcie buniek, baktérií, zvierat a dokonca aj ľudí. Dobrým predmetom štúdia efektov elektromagnetických polí môžu byť baktérie [7]. Fojt a spol. [8] študovali tri bakteriálne kmene: *Escherichiacoli*, *Leclerciaadecarboxylata* a *Staphylococcus aureus*. V tomto experimente použili valcovú cievku na generovanie magnetického poľa. Maximálny účinný prúd bol 1,9 A a frekvencia bola 50 Hz. Baktérie boli vystavené magnetickému poľu počas 12 minút. Amplitúda magnetického poľa sa menila v rozmedzí 2,7 až 10 mT. Teplota vnútri cievky bola 20 až 25 ° C. Z výsledkov je možné usúdiť, že najcitlivejšie na magnetické pole boli bunky *Escherichiacoli* a najmenej citlivé boli *Staphylococcus aureus*. Segatore a kol. [9] tiež testovali baktérie *Escherichiacoli* a *Pseudomonas aeruginosa*. Pozorovali vplyv elektromagnetického poľa, s rovnakou frekvenciou a amplitúdou ako [8], na rýchlosť rastu baktérií. Rovnaké výsledky sa potvrdili u baktérií *Escherichiacoli*. U baktérií *Pseudomonas aeruginosa* sa nezaznamenali žiadne významné zmeny.

V prebiehajúcich výskumoch sa čoraz viac kladie dôraz na účinky elektromagnetického žiarenia na mozog a nervový systém. Viaceré štúdie venujú pozornosť na túto samotnú otázku [10][11][12][13][14]. V týchto štúdiách boli použité zdroje rádiofrekvenčného žiarenia (20 kHz - 300 GHz) vo forme šírenia vlnoplôch, ale aj pulzného žiarenia, pričom skúmali vplyv mobilných telefónov, vysielačov alebo vysokofrekvenčných žiaričov na nervový systém zvierat a človeka. Elektromagnetické pole produkované mobilnými telefónmi môže mať negatívny vplyv na ľudský mozog. Môže zapríčiniť vznik Alzheimerového ochorenia, vyvolať poruchy motoriky tela alebo Parkinsonové ochorenie [15]. Skupina vedcov [14], s cieľom chrániť obyvateľstvo a predchádzať možným negatívnym účinkom na ľudský mozog, preukázala účinok žiarenia na mozog u myši mužského pohlavia. Použili rádiofrekvenčné elektromagnetické pole v troch rôznych frekvenčných úrovniach (400 MHz, 900 MHz a 2200 MHz) a absorpciu výkonu v rozmedzí od 2,05 do 35,7 W/kg. Zistili, že

aj keď toto žiarenie podráždilo nervový systém myši, nemalo trvalý účinok na fyziológiu a funkciu.

Elektromagnetické žiarenie vysiellané z mobilných telefónov má vplyv na zdravie ľudského tela a môže byť kategorizované ako: tepelné účinky, netepelné účinky, genotoxické účinky, zvýšená pravdepodobnosť výskytu mozgového nádoru a nešpecifikované príznaky [16][17]. Nešpecifické príznaky boli podané používateľmi mobilných telefónov a ich symptómy boli: bolesti hlavy, rozmazané videnie, bolesti ucha, strata krátkodobej pamäti, svrbenie, zlý spánok, vyčerpanie. Symptómy ako bolesti hlavy, únava, a problém so sústredením sa vyskytovali u ľudí, ktorí boli vystavení vyššej expozícii elektromagnetického žiarenia [17][18][19]. Najviac ohrozené orgány sú oči, semenníky a mozog. Oči a semenníky majú malý prietok krvi, ktorá je v ľudskom tele zároveň aj ako chladiace médium, čo môže spôsobiť prehriatie a poškodenie týchto orgánov. Mozog má veľký prietok krvi, ale pritom je veľmi citlivý už na menšie zvýšenie teploty [16].

Vplyv elektromagnetických polí sa študoval aj na bunkách, na zvieratách a tak isto aj na rastlinách. Balmori a kol. [20] dokázali, že elektromagnetické pole ovplyvňuje vápenaté, sodné a draselné iónové kanály a spôsobuje zmeny štruktúry bunkovej membrány. Yalcin a Erdem [21] zistili, že niekoľko enzýmov priamo reaguje na prítomnosť elektromagnetického poľa. Niektoré skupiny stavovcov a bezstavovcov sú navyše citlivé na elektromagnetické pole a niektoré zvieratá sa orientujú podľa prirodzeného elektromagnetického poľa [22]. Orientácia pomocou prirodzeného elektromagnetického poľa je zaznamenaná u vtákov, morských korytnáčiek a homárov. Orientácia spevavých vtákov pomocou prirodzeného elektromagnetického poľa je charakterizovaná v [23]. U cicavcov môže elektromagnetické pole ovplyvniť biorytmu v dôsledku modifikácie syntézy melatonínu a vylučovania niektorých hormónov [24][25].

Balmori a kol. [20] dokonca naznačili, že miesta s vysokým elektromagnetickým smogom môžu mať vplyv na populáciu vtákov. Zatiaľ čo úzkopásmové vysoko výkonné elektromagnetické polia nemôžu narušiť magnetickú orientáciu spevavých vtákov, slabé širokopásmové elektromagnetické polia narušujú ich orientáciu [26]. Ukázalo sa, že elektromagnetické pole v megahertzovom rozsahu ovplyvňuje orientáciu vtákov kvôli jeho interferencii s primárnymi procesmi magnetorecepcie [27][28].

Pokiaľ ide o bezstavovce, hmyz vníma magnetické pole a využíva ho na orientáciu. Magnetorecepcia v hmyze bola spojená s feromagnetickými časticami oxidu železa v tkanive spojené s receptorom citlivým na svetlo [29][30]. Túto magnetorecepciu narušuje elektromagnetické pole v oblasti rádiových vln [30]. Napríklad americký šváb je citlivý na slabé elektromagnetické pole v rádiových vlnách, ktoré spôsobuje dezorientáciu [31][32][33] a šváby vystavené elektrickému poľu vykazujú významné zmeny v pohybe: prešli kratšiu vzdialenosť, chodili pomalšie a otáčali sa častejšie [34]. Elektromagnetické pole s frekvenciou 900 MHz ovplyvňuje mravce a ich videnie [35] a impulzné

elektromagnetické pole vyžiarené z mobilných telefónov spôsobuje zmeny v správaní a strate kolónií včiel [36].

Iba obmedzený počet štúdií bol vykonaný na vplyv elektromagnetického poľa na kliešte, ktoré sa väčšinou zameriavali na vývoj kliešťov. Nízkovýkonové modulované mikrovlnné žiarenie potláčalo vývoj nakŕmených lariev a nymfiievkliešťov *Hyalommaasiaticum*[37]. Ožiarenie ovplyvnilo liahnutie lariev a to oneskorením z 3 dní na 20 dní, zvýšilo dobu aktivity vyliahnutých lariev o 17 až 24 dní a znížilo prežitie nenakŕmených lariev a nymfiiev o 4 až 10 dní [38].

Kliešte *Dermacentorreticulatus* vo svojom dospelom štádiu využívajú číhanie na nájdenie hostiteľov a dokážu prežiť až 4 roky bez potravy. Tieto kliešte majú vysokú reprodukciu a preukázalo sa, že je schopný prežiť a rozmnožovať sa rôznych oblastiach a môže prenášať širokú škálu patogénov škodlivých pre ľudí i voľne žijúcich živočíchov[39][40].

Rozhodnutie o realizácii tejto práce bolo ovplyvnené skutočnosťou, že táto oblasť vedy pri skúmaní vplyvu elektromagnetického poľa na kliešte je pomerne málo zmapovaná a že šance na získanie nových a obzvlášť významných výsledkov sú vysoké. Hlavným účelom tohto experimentu bolo zistiť, či elektromagnetické pole s nízkou intenzitou elektrického poľa ovplyvňuje číhanie a iné správanie kliešťov. Vplyv elektromagnetického poľa na kliešte bol skúmaný v spolupráci s Parazitologickým ústavom SAV v Košiciach.

II. METÓDY PRE VÝSKUM VPLYVU NA BIOLOGICKÉ SYSTÉMY

V tejto časti sú popísané metodiky týkajúce sa návrhov a usporiadaní pracovísk pre elektromagnetickú expozíciu a simulácie rozloženia elektromagnetického poľa. Zameriava sa na konštrukciu a charakterizáciu arén a fixtúr pre rozšírené pozorovania a zdroje pre umelé prostredie elektromagnetickej interferencie použité v experimente. Pri experimentoch sa pracovalo s umelými zdrojmi elektromagnetických polí s frekvenciami 900 MHz a 5000 MHz. Frekvencia 900 MHz bola zvolená, pretože je široko používaná pre komunikáciu použitím mobilných telefónov a frekvencia 5000 MHz bola zvolená, pretože sa využíva na lokálne bezdrôtové pripojenie na internet v mestách či obciach. Návrh a realizácia experimentálneho pozorovania bola založená na modifikovanom tzv. dark-light teste [41], ktorý pozostáva z analýz pozorovaní prejavov biologických objektov v elektromagneticke nezatienej a zatienenej časti. Tieto experimenty boli uskutočnené v spolupráci s Parazitologickým ústavom SAV v Košiciach.

A. Kliešte ako objekt výskumu

Ako biologické objekty výskumu boli zvolené kliešte druhu *Dermacentorreticulatus*. Tieto boli získané tzv. vľajkovaním (použitím bielej vlnenej látky) v lokalitách Hrhov (48°36'19, 45"N; 20°45'00, 44"E) a Košice-Dargovských hrdinov (48°44'51.5"N, 21°16'44.4"E). Podrobnosti o vľajkovaní sú popísané napr. v [42].

Kliešte boli uchovávané v polypropylénových (PP) skúmavkách v prostredí s teplotou 16 ° C a udržiavali sa pri relatívnej vlhkosti 90% v režime 16 hodín svetlo: 8 hodín tma.

Všetky kliešte boli udržiavané tak, aby na nich nepôsobili vonkajšie vplyvy, ako sú napríklad zápachy, ktoré by mohli ovplyvniť správanie kliešťov.

B. Popis pracoviska pre výskum vplyvu elektromagnetických polí na kliešte v interiéri

Experimenty boli uskutočnené v tieniacej bezodrazovej komore COMTEST model 1710-100, aby sa zabezpečilo, že žiadne vonkajšie elektromagnetické polia nebudú ovplyvňovať experimenty. Komora spĺňa normu EN 50147-1. Vonkajšie oceľové tienenie komory je trvalo uzemnené a interiér komory je vyskladaný magnetickými absorbérmi vo forme feritových dlaždíc pokrývajúcich frekvenčný rozsah bez odrazov od 30 MHz do 1,5 GHz. Miestnosť je vybavená absorbérmi mikrovln s plochým vrcholom pyramídového tvaru, ktoré rozširujú bezodrazovú prevádzku komory do 18 GHz. Ako zdroj rádiokvencného elektromagnetického poľa bol použitý generátor signálu Agilent N5183A, ku ktorému bola pripojená lieviová anténa R&S HF907 s vertikálnou polarizáciou. Anténa bola pripevnená na drevenej trojnožke R&S HZ-1. Výstupný výkon generátora bol vypočítaný pomocou (1) a nastavený tak, aby vo vzdialenosti 1 m alebo 2 m od antény bola hustota toku výkonu 1 mW/m², čo je intenzita elektrického poľa 0,6 V/m (Tabuľka 1). Táto hodnota bola vybraná z predbežných usmernení pre preventívnu ochranu zdravia ľudí [43]. Nameraná intenzita elektrického poľa nameraná ručným analyzátorom spektra Spectran HF-60105 s pripojenou anténou HyperLog 60100 vo vzdialenosti 2 m od antény bola pre všetky frekvencie ±0,6 V/m.

$$P = E + a_p - G_i - 107,78 + 20 \log(r) \quad (1)$$

kde:

P – výstupný výkon v dBm

E – intenzita elektrického poľa v dBμV/m

a_p – útlm kábla v dB

G_i – zisk antény

r – vzdialenosť od antény v m

TABUĽKA 1 VÝSTUPNÉ VÝKONY GENERÁTOR PRE FREKVENCIE 900 MHz A 5000 GHz

Frekvencia [MHz]	Výkon na generátore [dBm] pre vzdialenosť objektu výskumu 1 m od antény	Výkon na generátore [dBm] pre vzdialenosť objektu výskumu 2 m od antény
900	5,6	11,61
5000	7,39	13,41

Na ožarovanie kliešťov boli použité dve metódy:

1. Metóda číhacej single arény pre výskum vplyvu rádiokvencného elektromagnetického poľa na odozvu kliešťov - skúmalo sa trhnutie tela a nôh jednotlivcov kliešťov bez pôsobenia a s pôsobením 900 MHz elektromagnetického poľa s nízkou intenzitou elektrického poľa.

- Metóda multi-arény pre výskum rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa ako atraktora kliešťov-skúmal sa presun kliešťov do nezatienenej časti arény pri pôsobení 900 MHz a 5000 MHz elektromagnetického poľa s nízkou intenzitou elektrického poľa.

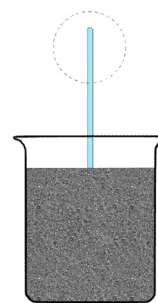
1. Metóda číhacej single arény

Na testovanie bola použitá sklenená kadička s priemerom 10 cm, naplnená pieskom s vloženou 20 cm sklenenou stopkou (Obrázok 1). Pozorovanie správania kliešťa sa uskutočnilo v oblasti zobrazenej prerušovanou kružnicou. Okraj misky bol potretý bezzápachovým mazivom, aby sa zabránilo úniku kliešťov z arény.

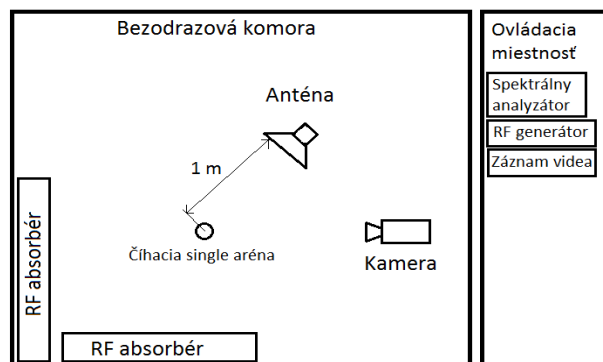
Táto metóda bola zameraná na trhanie tiel a nôh jednotlivcov kliešťov pri pôsobení a bez pôsobenia elektromagnetického poľa. Hypotéza bola stanovená: Kliešte reagujú na zmenu elektromagnetického poľa trhnutím tela, nôh alebo aj tela aj nôh. Správanie kliešťov bolo zaznamenané kamerou a následne štatisticky analyzované. Na testovanie hypotézy boli vypracované tri štatistické všeobecné lineárne zmiešané modely (GLMM, Generalised Linear Mixed Model) [44]. Identifikácia testovaných jedincov a počet uplynutých minút experimentu sa považovali za náhodné premenné. V prvom štatistickom modeli sa testoval vplyv elektromagnetického žiarenia na trhanie kliešťov (súčet trnutí telom a končatín). Rozličné správanie samcov a samíc bolo skúmané v prítomnosti elektromagnetického poľa, pretože pri testovaní bez elektromagnetického poľa nedošlo k žiadnym významným rozdielom v správaní medzi pohlaviami. Ďalšie dva štatistické modely boli vypracované oddelene pre trhanie tiel a nôh, rovnako ako v prvom modeli. Modely boli skontrolované na nadmerné rozptýlenie extrakciou Pearsonových zvyškov [45] a nevykazovali žiadne známky nadmerného rozptýlenia. Štatistické analýzy boli vykonané v R [46] a modely GLMM boli vypočítané pomocou balíka "lme4" [47]. Výsledky boli považované za významné ak hodnoty $P < 0,05$.

Experiment bol uskutočnený v bezodrazovej komore, kde teplota bola 23 °C (± 1 °C) (Obrázok 2). Pozorovanie každého kliešťa trvalo 8 minút, pričom pozostávalo zo 4 preiód. Prvá perióda trvala 3 minúty a bola na prispôbenie sa prostrediu a bez pôsobenia elektromagnetického poľa (T1-T2-T3 Obrázok 3). Druhá perióda trvala 3 minúty a kliešte boli vystavené pôsobeniu elektromagnetického poľa s frekvenciou 900 MHz s výkonovou amplitúdou podľa tabuľky 2 (T4-T5-T6 Obrázok 3). Tretia perióda trvala 1 minútu a bola zotavovacia bez pôsobenia elektromagnetického poľa (T7 Obrázok 3) a posledná perióda trvala 1 minútu s pôsobením elektromagnetického poľa (T8 Obrázok 3). Pred a po každom ožarovaní bola stopka vyčistená so 70% etanolom, aby sa zabránilo ovplyvňovaniu kliešťov pachom. Piesok bol navlhčený destilovanou vodou, aby sa vytvoril relatívny gradient vlhkosti vzduchu v rozmedzí od 80% na povrchu piesku až po 40% na vrchole tyčky.

Pri tejto metóde boli použité kliešte *Dermacentorreticulatus*. Celkový počet kliešťov pri tejto metóde bol 100 (50 samcov a 50 samíc) a boli umiestnený na vrchol sklenenej tyčky.



Obrázok 1 Číhacia single aréna



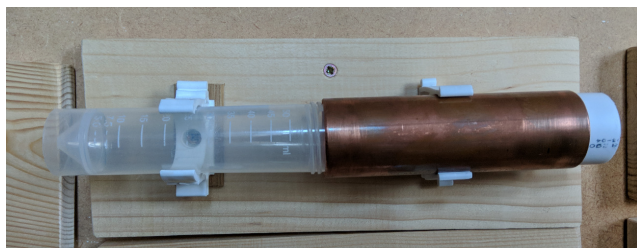
Obrázok 2 Usporiadanie pracoviska pre sledovanie vplyvu elektromagnetického poľa na behaviorálnu odozvu kliešťov



Obrázok 3 Experimentálny dizajn

2. Metóda multi-arény

Bola navrhnutá nová metóda ožarovania a vyhodnocovania výsledkov. Pre zabránenie možných vplyvov prítomnosti osoby pri spočítavaní kliešťov bola použitá, polovične tienená aréna (Obrázok 4). Pozostáva z dvoch polypropylénových trubiek prilepených lepiacou páskou k sebe, kde jedna trubka je navyše tienená medenou rúrkou. Takto vznikne polovične tienená aréna. Každá polypropylénová trubka je dlhá 110 mm s priemerom 27 mm. Medená rúrka má dĺžku 110 mm s priemerom 32 mm a hrúbkou steny 1 mm. Táto aréna je upevnená na drevenej doske pomocou plastových držiakov. Drevená doska a ani obidva plastové držiaky neovplyvňujú dopadajúce elektromagnetické pole. V každej aréne bolo do stredu umiestnených 10 kliešťov buď samíc, alebo samcov, ktoré majú možnosť vybrať si tienенú alebo netienенú časť (Obrázok 5).



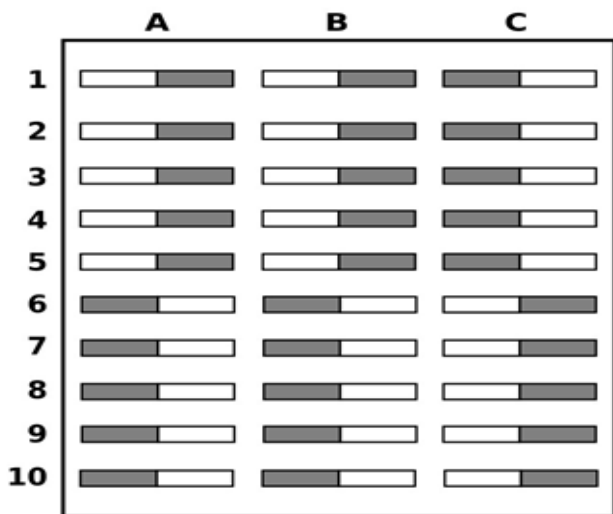
Obrázok 4 Polovične tienená aréna



Obrázok 5 Umiestnenie kliešťov v polovične tienenej aréne pred začatím ožarovania

Multi-aréna pre rozšírené pozorovania

Pole s viacerými arénami sa použilo pre zvýšenie efektivity experimentu (Obrázok 6aObrázok 7), ktoré pozostávalo z 30-tich polovične tienených arén. Tieto arény boli prichytené na drevenej doske o rozmeroch cca 1 x 1 m. Vzdialenosť medzi stredmi blízkych arén bola 9 cm vo vertikálnom smere a 26 cm v horizontálnom smere. Multi-aréna bola skonštruovaná tak, aby spĺňala kritériá randomizácie. Tienenia na arénach boli náhodne rozmiestnené tak, aby sa eliminoval vplyv preferencie smeru migrácie kliešťov na jednu stranu bez ohľadu na to, či je to zatienená alebo nezatienená časť (Obrázok 6).



Obrázok 6 Umiestnenie tienení (šedá časť - medené tienenie)



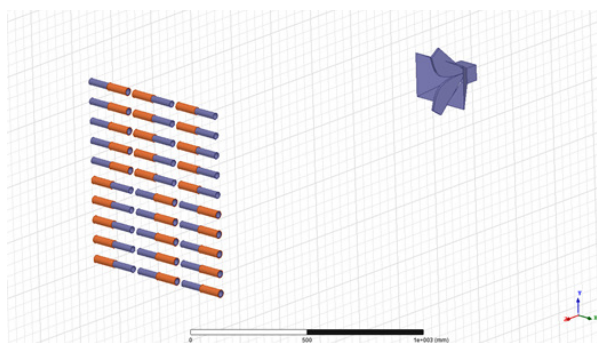
Obrázok 7 Multi-aréna s 30 polovične tieneními arénami umiestnených v bezodrazovej komore

Počítačový model rozloženia intenzity elektrického poľa

Pre lepšiu predstavu rozloženia elektrického poľa bol vytvorený simulačný model multi-arény (Obrázok 8) v softvéri ANSYS HFSS. Zhotovený bol reálny model antény R&S HF907. Simulačný model ožarovania bol zjednodušený a bol bez podpornej dosky a plastových držiakov. Simulácia bola vykonaná pre frekvencie 900 MHz a 5 GHz. Vlastností použitých materiálov sú uvedené v tabuľke 2.

TABUĽKA 2 VLASTNOSTI MATERIÁLOV POUŽITÝCH V POČÍTAČOVEJ SIMULÁCII

Materiál	Relatívna permitivita	Relatívna permeabilita	Vodivosť [S/m]	Hustota [kg/m ³]
Vzduch	1,0006	1,000000	0	1,1614
Med'	1	0,999991	58x10 ⁶	8933
PP	2,7	1	0	946
Hliník	1	1,000021	38x10 ⁶	2689



Obrázok 8 3D model multi-arény a antény pre účely počítačovej simulácie

Sledovaný bol počet kliešťov v nezatienenej časti polovične tienenej arény po ukončení experimentu. Hypotéza experimentu bola stanovená takto: elektromagnetické pole pôsobí ako atraktor kliešťov. Ak je hypotéza pravdivá, tak by sa mal vyskytnúť väčší počet kliešťov v nezatienenej časti arény pri experimentoch s900 MHz alebo 5000 MHz elektromagnetickým poľom ako počet kliešťov pri kontrolnej

skupine. Ak nebol žiadny účinok elektromagnetického poľa, nemal by existovať rozdiel medzi počtom kliešťov v netienenej časti arény pri pôsobení elektromagnetického poľa a počtom kliešťov netienenej časti počas experimentu s kontrolnou skupinou.

Hypotéza bola testovaná použitím vyššie spomenutého štatistického modelu GLMM. Podľa experimentálneho návrhu boli testované tri nezávislé premenné:

1. prítomnosť / neprítomnosť EM poľa v netienenej časti arény (tri úrovne faktora: bez poľa, 900 MHz a 5 GHz),
2. pohlavie (mužské, ženské),
3. strana, na ktorej je tienená časť arény (l - vľavo, r - vpravo).

Vplyv elektromagnetického poľa na kliešte bol rozdelený na tri účinky:

1. žiadny účinok vzhľadom na pohlavie - obe pohlavia reagujú rovnakým spôsobom,
2. aditívny účinok vzhľadom na pohlavie- jedno z pohlaví reaguje vo vyššej miere na rozdielne elektromagnetické polia,
3. interaktívny pohlavný účinok - obe pohlavia reagujú inak na elektromagnetické polia pri rôznych experimentálnych a kontrolných podmienkach.

Zo spracovaných pozorovaní vo foriem tabuliek boli vypracované dva štatistické modely (GLMM). Prvý model zahŕňal interakciu medzi frekvenciami elektromagnetického poľa, pohlavím a výberom strany, kde testuje rozdielnu reakciu samcov a samíc na elektromagnetické pole. Druhý model zahŕňal účinok elektromagnetického poľa a pohlavie (aditívny účinok pohlavia). Ak bol niektorý z faktorov štatistického modelu významný ($P < 0,05$), potom výstupy boli korigované pomocou vyššie spomenutej Tukeyovej metódy[48]. Použitý bol softvér R[46].

Multi-aréna bola umiestnená v bezodrazovej komore 2 m od antény a vo výške 50 cm. V experimente bol použitý náhodný prístup pri výbere kliešťov, kedy kliešte neboli vybrané podľa akýchkoľvek kritérií, ktoré by mohli ovplyvniť výsledky. Prvé experimentálne pozorovanie bolo vykonané na kontrolnej skupine kliešťov bez pôsobenia elektromagnetického poľa. Kontrolná skupina pozostávala z 220 kliešťov. Kliešte boli umiestnené v multi-aréne, bez prístupu svetla alebo iných známych vplyvov na kliešte, počas 24 hodín bez pôsobenia elektromagnetického poľa. Kliešte mali možnosť presunúť sa do tienenej alebo netienenej časti polovične tienenej arény. Druhý a tretí pokus sa uskutočnil s novým súborom kliešťov. Pri 900 MHz bolo použitých 290 kliešťov a pri 5 GHz bolo použitých 300 kliešťov. Na konci každého experimentu boli spočítané kliešte, ktoré migrovali do nezatienej časti.

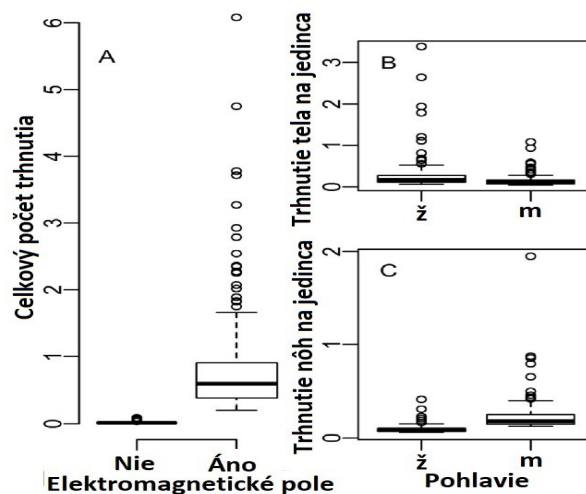
Pri tejto metóde boli použité kliešte *Dermacentorreticulatus* s celkovým počtom 420 samíc a 390 samcov.

III. VÝSLEDKY A DISKUSIA

1. Metóda číhacej single arény

Pri tejto metóde boli spracované tri rôzne štatistické modely GLMM týkajúce sa vplyvu elektromagnetického poľa na trhanie kliešťov (Tabuľka 3, M1-M3). Modelom M1 bolo testované, či kliešte vystavené elektromagnetickému poľu sa trhali častejšie než bez pôsobenia elektromagnetického poľa. Model M2 a model M3 testovali, či sa kliešte prispôbili elektromagnetickému poľu a či samce a samice reagovali rôzne vzhľadom na trhnutie tela a nôh.

Výsledky z modelu M1 (Tabuľka 3, Obrázok 9A) poukazujú na skutočnosť, že kliešte vykazujú výrazne intenzívnejšie trhnutia v prítomnosti elektromagnetického poľa. Pretože existujú významné rozdiely medzi testami s pôsobením elektromagnetického poľa a bez pôsobenia, boli analyzované podmnožiny údajov. Pre testy s pôsobením elektromagnetického poľa a boli vytvorené osobitné štatistické modely pre trhnutie tela a trhnutie nôh. Výsledky testov na trhnutie tela a nôh s ohľadom na pohlavie neboli významné (modely M2 a M3, Tabuľka 3). To znamená, že neexistuje žiadny interaktívny rozdiel medzi pohlaviami v reakcii (súčasné trhnutie tela i nôh) na elektromagnetické pole. Preukázal sa však aditívny vplyv. Bolo zistené, že samice reagovali na prítomnosť elektromagnetického poľa intenzívnejším trhaním tela (Obrázok 9B) a samci reagovali na prítomnosť elektromagnetického poľa intenzívnejším trhaním nôh (Obrázok 9C). Vzhľadom na P-hodnotu testu je hypotéza, že kliešte reagujú na prítomnosť elektromagnetického poľa, potvrdená.



Obrázok 9Kvantilová analýza vplyvu elektromagnetického poľa na trhanie kliešťov *Dermacentor reticulatus*

TABUĽKA 3 VÝSLEDKY ZO ŠTATISTICKÝCH MODELOV M1—M3 PRE VPLYV ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA NA TRHANIE KĹIEŠŤOV DERMACENTOR RETICULATUS

M1 – reakcia: trhnutie tela a nôh	Odhad	Štandardná chyba	z hodnota	Pr(> z)
(Intercept)	-4.242	1.006	-	-
Pokus	0.018	0.370	0.049	0.961
Elektromagnetické pole [áno]	4.590	1.003	4.573	<0.001
Pokus*Elektromagnetické pole [áno]	-0.378	0.367	-1.028	0.304
Id (r)	0.726	0.852	-	-
Pokus (r)	0.038	0.196	-	-
M2 – reakcia: trhnutie tela				
(Intercept)	-0.901	0.345	-	-
Pokus	-0.341	0.127	-2.692	0.007
Pohlavie [Ž]	-0.569	0.286	-1.992	0.046
Pokus*Pohlavie	nevýznamné	nevýznamné	nevýznamné	nevýznamné
Id (r)	1.292	1.137	-	-
Pokus (r)	0.051	0.226	-	-
M3 – reakcia: trhnutie nôh				
(Intercept)	-1.801	0.375	-	-
Pokus	-0.244	0.164	-1.482	0.138
Pohlavie [m]	0.787	0.248	3.178	0.002
Pokus*Pohlavie	nevýznamné	nevýznamné	nevýznamné	nevýznamné
Id (r)	1.083	1.041	-	-
Pokus (r)	0.069	0.262	-	-

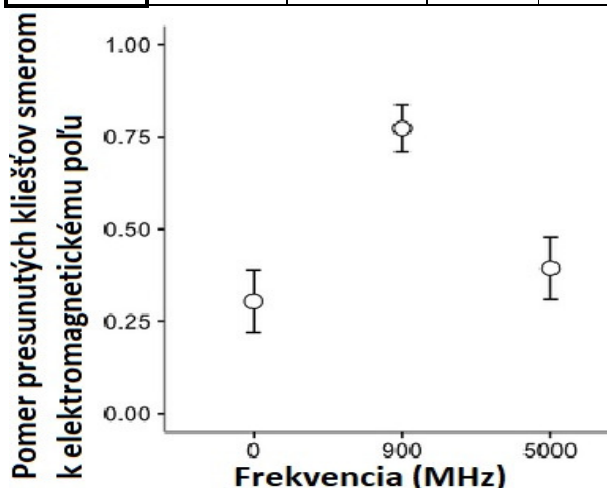
2. Metóda Multi-arény

Pretože počas skúšobných pokusov sa veľa kliešťov nepohlo zo začiatočného bodu (z 10 jednotlivcov: 34% v 0 MHz, 25% v 5000 MHz a 0% v 900 MHz), bola vybraná ako závislá premenná počet kliešťov, ktoré sa presunuli do netienenej časti. Preto jednotka /1/ pri vyhodnocovaní znamenala, že 10 kliešťov sa presunulo smerom do nezatienenej časti arény, a nula /0/ znamenala, že žiadny z kliešťov sa nepresunul do nezatienenej časti arény, čiže ostali v počiatočnom bode alebo sa presunuli do zatienenej časti arény. Bol vypracovaný štatistický model so tromi vstupmi: vplyv elektromagnetických polí s rôznymi frekvenciami, vplyv pohlavia a vplyv umiestnenia tienenej časti na pomer kliešťov, ktoré migrovali do nezatienenej časti polovične tienenej arény. Nebol zaznamenaný výrazný efekt vplyvu

elektromagnetického poľa s rozdielnou frekvenciou medzi pohlavím (P=0,193). Znamená to, že ani jedno z pohlaví nepreferuje jednu z frekvencií viac ako druhé pohlavie. Keď bola vstupom frekvencia 900 MHz bol zaznamenaný výrazný efekt (P<0,001). V prípade kedy bola premenná pohlavie bolo zistené, že tento efekt nebol významný (P=0,094), čo celkovo nenaznačuje žiadnu sexuálnu preferenciu voči elektromagnetickému poľu. Strana testovacej arény bola nevýznamná (P=0,628). Ak by tento faktor bol významný, naznačoval by, že návrh experimentu nebol náhodne vykonaný. Odhadnuté parametre testovaného účinku sú uvedené v tabuľke 4. Tukeyova metóda mnohonásobného porovnania ukazuje, že časť kliešťov sa premiestňovala smerom k 900 MHz vo výrazne vyššom počte (p < 0,001), než v prípade bez pôsobenia elektromagnetického poľa. V prípade pôsobenia elektromagnetického poľa s frekvenciou 5000 MHz v porovnaní s kontrolnou skupinou bez elektromagnetického poľa nedošlo k rozdielu migrovania kliešťov smerom do netienenej časti polovične tienenej arény (P=0,304). Kliešte sa výrazne premiestňovali k elektromagnetickému poľu s frekvenciou 900 MHz (Obrázok 10). Hypotéza, že elektromagnetické pole pôsobí ako atraktor pre kliešte, sa potvrdila pre elektromagnetické pole s frekvenciou 900 MHz.

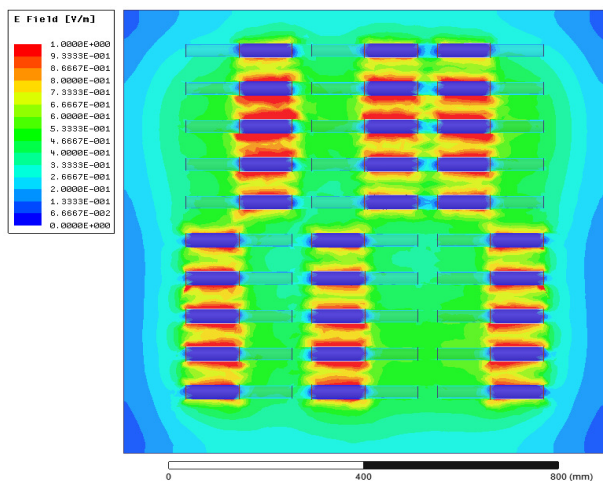
TABUĽKA 4 VÝSLEDKY ZO ŠTATISTICKÝCH MODELOV

Koeficienty	Odhad	Štandardná chyba	t	P
(Intercept)	0.285	0.050	-	-
900 MHz	0.462	0.055	8.355	<0.001
5000 MHz	0.082	0.055	1.483	0.14
Pohlavie [m]	0.074	0.044	1.695	0.09
Strana [r]	-0.021	0.044	-0.486	0.63

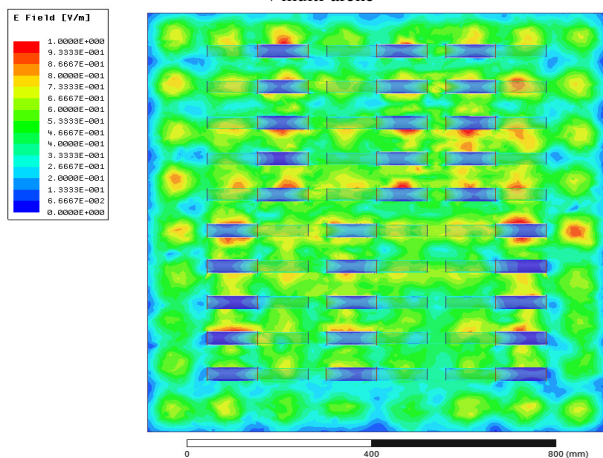


Obrázok 10 Rozdiely vplyvu pôsobenia elektromagnetického poľa na kliešte Dermacentor reticulatus

Hlavná charakterizácia polovične tienenej arény spočíva v jej tieniacej účinnosti. Ako vidno vo výsledkoch zo simulácie, medená rúrka dostatočne tienila polovicu arény pred dopadajúcou elektromagnetickou vlnou s frekvenciou 900 MHz (Obrázok 11). Pri elektromagnetickom poli s frekvenciou 5 GHz je vidieť, že elektrické pole presahuje hranu medenej tieniacej rúrky dovnútra tieneneho priestoru (Obrázok 12). Je to spôsobené odrazom dopadajúcej vlny od ostatných tienení a zároveň medená rúrka pôsobí ako vlnodod pri frekvencii 5 GHz. Vzniká vlnová difrakcia, ktorá sa nazýva Huygens - Fresnelov princíp. Tento jav popisuje, že všetky body v priestore, v ktorom sa vlna šíri, sa stávajú bodovými zdrojmi vln a elementárnymi vlnovými plochami a súčet týchto elementárných vlnoplôch určuje formu novej vlny.



Obrázok 11 Rozloženie elektromagnetického poľa s frekvenciou 900 MHz v multi-arény



Obrázok 12 Rozloženie elektromagnetického poľa s frekvenciou 5 GHz v multi-arény

Na Obrázok 13 je znázornená veľkosť intenzity elektrického poľa pozdĺž polovične tienenej arény pri frekvenciách 900 MHz a 5 GHz. Línia, po ktorej sa zaznamenala intenzita elektrického poľa, je vyznačená na Obrázok 14.

Pozície polovične tienenej arény pre vykreslenie intenzity elektrického poľa boli B6 a A1 pri 5 GHz a pri 900 MHz to bola poloha B6 (Obrázok 6). V tienenej časti polovične tienenej arény na pozícii B6 je najvyššia intenzita elektrického poľa a na pozícii A1 je najnižšia intenzita elektrického poľa v tienenej časti pri frekvencii 5 GHz. Maximálna vypočítaná intenzita elektrického poľa v netienenej časti na pozícii B6 pre 900 MHz je 0,55 V/m, čo je v prepočte na plošný výkon 0,8 mW/m². Pri 5 GHz je intenzita elektrického poľa v netienenej časti 0,73 V/m, čo je v prepočte na plošný výkon 1,49 mW/m². Najnižšia vypočítaná intenzita elektrického poľa vnútri tienenia na pozícii B6 pre 900 MHz je 0,3 mV/m, čo je v prepočte na plošný výkon 0,2 nW/m². Pri 5 GHz je intenzita elektrického poľa v tienenej časti 0,18 V/m, čo je v prepočte na plošný výkon 85,94 μW/m². Účinnosť tienenia medenej rúrky pri frekvencii 900 MHz je 68,29 dB, zatiaľ čo pri 5 GHz je to 13,78 dB. Účinnosť tienenia sa vypočítala pomocou rovnice (2).

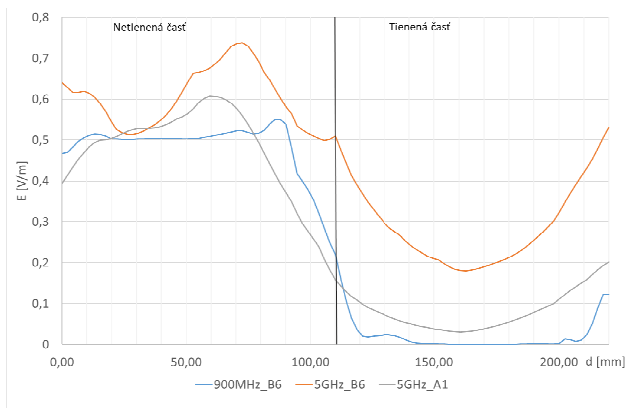
$$\text{---} \quad (2)$$

kde:

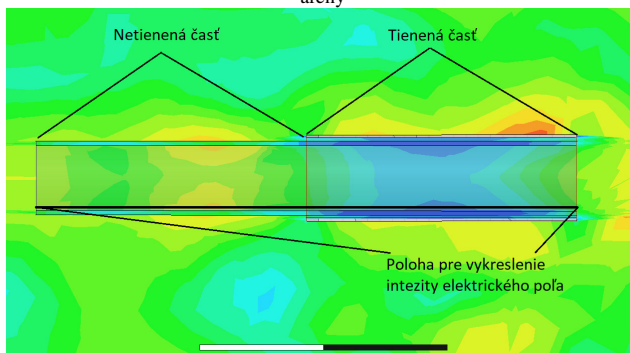
S.E. – účinnosť tienenia v dB

E_{dop} – intenzita elektrického poľa dopadajúcej vlny vo V/m

E_{pr} – intenzita elektrického poľa prenesenej vlny cez tienenie vo V/m

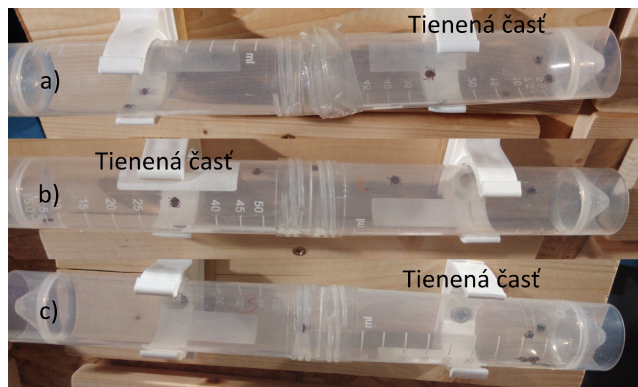


Obrázok 13 Závislosť intenzity elektrického poľa od dĺžky polovične tienenej arény



Obrázok 14 Poloha v polovične tienenej arény pre vykreslenie intenzity elektrického poľa

Z dôvodu difrakcie elektromagnetického poľa pri frekvencii 5 GHz sa skúmala poloha kliešťov na špecifických miestach multi-arény (A1, B6 a C7). Tienenie bolo opatrne odstránené a poloha kliešťov bola zaznamenaná kamerou (Obrázok 15). Pri porovnaní Obrázok 12 a Obrázok 15 sú kliešte v tienenej časti rozmiestnené inverzne k elektromagnetickému poľu zasahujúcemu do tieniacej časti polovične tienenej arény v polohách A1 a C7 (Obrázok 15a) a Obrázok 15c)). V obidvoch prípadoch sa 8 kliešťov nachádzalo v tienenej časti. To môže znamenať, že kliešte sú veľmi citlivé na malé zmeny intenzity elektrického poľa. Pri polohe B6 (Obrázok 15b)), kde elektromagnetické pole zasahuje do celej dĺžky tieniacej časti, sú kliešte náhodne umiestnené, pritom 6 kliešťov sa nachádzalo v netienenej časti.



Obrázok 15 Rozmiestnenie kliešťov v polohách: a) A1, b) B6, c) C7

IV. ZÁVER

Keďže kliešte sú možným nosičom patogénov pre človeka, je potrebné sa pred nimi chrániť. Oplyvnenie správania sa kliešťa je možné dosiahnuť zmenou teploty, vlhkosti a pachov. Vplyv cudzieho elektromagnetického poľa na správanie sa kliešťov doteraz nebol skúmaný. Výsledky predložené v tejto práci preukazujú, že elektromagnetické pole v rádiovýfrekvenčnom spektre má významný vplyv na správanie a číhanie kliešťov na hostiteľa. Kliešte intenzívnejšie číhajú v prítomnosti elektromagnetického poľa s frekvenciou 900 MHz a s nízkou intenzitou elektrického poľa 0,6 V/m, aj keď sa hostiteľ v blízkosti nenachádza. Je pravdepodobné, že elektromagnetické pole ovplyvňuje Hallerov orgán v prednom páre končatín, ktorým kliešť detegujú hostiteľa. Tak isto bolo potvrdené, že 900 MHz elektromagnetické pole priťahuje kliešťov, ktoré takto migrovali do nezatienej časti arény, kde pôsobilo elektromagnetické pole. Zo zistení z experimentov je možné tvrdiť, že elektromagnetické pole má vplyv na výskyt a polohu kliešťov. Používanie zdroja elektromagnetického poľa, napríklad mobilného telefónu v prírode môže teda nepriamo znamenať zvýšené riziko nakazenia sa chorobami prenášanými kliešťami, v dôsledku presunu kliešťov ku zdroju.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438.

Táto práca bola podporená vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky (MŠVVaŠ SR) a Slovenskej akadémie vied (SAV) v rámci projektov VEGA 1/0340/18 a VEGA 2/0141/16.

ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] K. Marton, R. Cimbala, I. Kolcunová: „Biological systems and electromagnetic compatibility”, Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, 2011, vol. 6, issue no. 1, sep. 2011 page 146-148, ISBN: 978-80-553-0724-4
- [2] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection: „ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74 (4):494-522, 1998, ICNIRP publication
- [3] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky o ochrane zdravia pred neionizujúcim žiarením 271/2004 Z.z.
- [4] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky o podrobnostiach a požiadavkách na zdroje elektromagnetického žiarenia a na limity expozície obyvateľov elektromagnetickému žiareniu v životnom prostredí 534/2007 Z.z.
- [5] Z. Cabanová: „Biological effects of electromagnetic field,“ Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2011, str.: 24-29, dostupné online [Cit 10-11-2015]: <<http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/83673/AEEE-2004-3-4-24-cabanova.pdf?sequence>>
- [6] R. Baan: „Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields“, The Lancet Oncology, Volume 12, Issue 7, 624 - 626
- [7] H. Berg: „Problems of weak electromagnetic field effects in cell biology”, Bioelectrochem. Bioenerg., 48 (1999), pp. 355-360
- [8] L., Fojt, L., Strašák, V., Vetterl: „Comparison of the low-frequency magnetic field effects on bacteria Escherichia coli, Leclercia adecarboxylata and Staphylococcus aureus“ Bioelectrochemistry, Vol. 63, pp. 337 - 341
- [9] B. Segatore, D. Setacci, F. Bennato, R. Cardigno, G. Amicosante, R. Iorio: „Evaluations of the Effects of Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields on Growth and Antibiotic Susceptibility of Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa“ International Journal of Microbiology 2012
- [10] D. Mat, F. K. W. Tat, K. Kipli, A. Joseph, K. Lias, A. S. W. Marzuki: „Visualization and Analytical Measurement of Electromagnetic Radiation from Handheld Mobile Phones,“ Second International Conference on Computer Engineering and Applications (ICCEA), 2010, vol. 2, pp. 246-250.
- [11] A. Paffi, F. Apollonio, G. d' Inzeo, G. A. Lovisolo, M. Liberti: „Real time radio frequency exposure for bio-physical data acquisition”, Real-Time Systems, Architecture, Scheduling and Application, InTech, 2012, page 293-312, ISBN 978-953-51-0510-7
- [12] J. E. Tattersall, I. R. Scott, S. J. Wood, J. J. Nettell, M. K. Bevir, Z. Wang, N. P. Somasiri, X. Chen: „Effects of low intensity radiofrequency electromagnetic fields on electrical activity in rat hippocampal slices”, Brain Res. 2001 Jun 15;904(1):43-53
- [13] Z. Sienkiewicz, M. Repacholi: „The effects of radiofrequency radiation on brain physiology and function”, 22-dec-2009. dostupné online [Cit. 15-3-2018]: <http://www.mthr.org.uk/research_projects/documents/RUM1FinalReport.pdf>
- [14] N. C. D. Mifsud, I. R. Scott, A. C. Green: „Temperature effects in brain slices exposed to radiofrequency fields”, Book of abstracts of 8th International congress of the European BioElectromagnetics Association, 11-apr-2007.
- [15] Hardell, L., Sage, C., 2008: „Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards”, Biomedicine & Pharmacotherapy 62, 104-109
- [16] Z. Cabanová: „Vyhodnotenie vplyvu EMP na živé organizmy“, Diplomová práca, ŽU Žilina, 2004

- [17] L. Pekárek: „Informace NRL č. 13/2002: Směrování k jednotným hygienickým limitům pro neionizující záření.“ Hygienická stanice Praha, Národní referenční laboratoř pro neionizující pole a záření, 2002
- [18] D. Coggon: „Health Risk from Mobile Phone Base Stations.“ dostupné online [Cit 30-11-2015]: <<http://oem.bmj.com/cgi/content/full/63/5/298>>
- [19] M. Rössli: „Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: A systematic review“. Environmental Research, June 2008, 107 (2): 277–287
- [20] A. Balmori: „Electromagnetic pollution from phone masts. Effects on wildlife“, Pathophysiology, 16, 191–199, 2009
- [21] S. Yalçın, G. Erdem: „Biological effects of electromagnetic fields“, African Journal of Biotechnology, 11, 3933–3941, 2012
- [22] A. Balmori: „Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation“, Science of The Total Environment, 518–519, 58–60 2015
- [23] W. Wiltschko, R. Wiltschko: „Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals“, Journal of Comparative Physiology. A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 191, 675–693, 2015
- [24] A. Koyu, G. Cesur, F. Ozguner, M. Akdogan, H. Mollaoglu, S. Ozen: „Effects of 900 MHz electromagnetic field on TSH and thyroid hormones in rats“, Toxicology Letters, 157, 257–262, 2005
- [25] B. W. Wilson, E. K. Chess, L. E. Anderson: „60-Hz electric-field effects on pineal melatonin rhythms: Time course for onset and recovery“, Bioelectromagnetics, 7, 239–242, 1986
- [26] S. Schwarze, N. L. Schneider, T. Reichl, D. Dreyer, N. Lefeldt, S. Engels, N. Baker, P. J. Hore, H. Mouritsen: „Weak Broadband Electromagnetic Fields are More Disruptive to Magnetic Compass Orientation in a Night-Migratory Songbird (Erithacus rubecula) than Strong Narrow-Band Fields“, Frontiers in Behavioral Neuroscience, 10, 1–8, 2016
- [27] R. Wiltschko, P. Thalau, D. Gehring, C. Nießner, T. Ritz, W. Wiltschko: „Magnetoreception in birds: the effect of radio-frequency fields“, Journal of The Royal Society Interface, 12, 2014–1103, 2015
- [28] R. Wiltschko, W. Wiltschko: „Sensing Magnetic Directions in Birds: Radical Pair Processes Involving Cryptochrome“, Biosensors, 4, 221–242, 2015
- [29] S. Cucurachi, W. L. M. Tamis, M. G. Vijver, W. J. G. M. Peijnenburg, J. F. B. Bolte, G. R. de Snoo: „A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF)“, Environment International, 51, 116–140, 2013
- [30] J. B. Phillips, R. Muheim, P. E. Jorge: „A behavioral perspective on the biophysics of the light-dependent magnetic compass: a link between directional and spatial perception?“, Journal of Experimental Biology, 213, 2010
- [31] M. Vácha, T. Půžová, M. Kvíčalová: „Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach“, Journal of Experimental Biology, 212(21), 3473–3477, 2009
- [32] M. Vácha, T. Půžová, D. Drštková: „Ablation of antennae does not disrupt magnetoreceptive behavioural reaction of the American cockroach to periodically rotated geomagnetic field“, Neuroscience Letters, 435(2), 103–107, 2008
- [33] M. Vácha, M. Kvíčalová, T. Půžová: „American cockroaches prefer four cardinal geomagnetic positions at rest“, Behaviour, 147, 425–440, 2010
- [34] C. W. Jackson, E. Hunt, S. Sharkh, P. L. Newland: „Static electric fields modify the locomotory behaviour of cockroaches“, The Journal of Experimental Biology, 214, 2020–2026, 2011
- [35] M. C. Cammaerts, P. De Doncker, X. Patris, F. Bellens, Z. Rachidi, D. Cammaerts: „GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues“, Electromagnetic Biology and Medicine, 31, 151–165, 2012
- [36] D. Favre: „Mobile phone-induced honeybee worker piping“, Apidologie, 42, 270–279, 2011
- [37] I. Korotkov, B. La, B. Ms, P. Vlu: „The impact of electromagnetic radiation at microwave frequency (9.8 HhZ) on the embryonic and postembryonic development of the tick Hyalomma asiaticum (Acarina, Ixodidae)“, Meditsinskaia parazitologiya i parazitarnye bolezni, 1, 38–42, 1999
- [38] I. Korotkov, M. S. Burenkov, L. A. Burenkova, V. I. Pichugin, S. P. Chunikhin, V. V. Engovatov: „The reaction of the tick Hyalomma asiaticum (Acarina, Ixodidae) to 1- to 4-GHz microwaves“, Meditsinskaia Parazitologiya I Parazitarnye Bolezni, 4, 28–31, 1996
- [39] G. Földvári, P. Široký, S. Szekeres, G. Majoros, H. Sprong: „Dermacentor reticulatus: a vector on the rise“, Parasites & Vectors, 9, 314, 2016
- [40] K. Siuda: „Kleszcze polski (Acari: Ixodida). Systematya i Rozmieszczenie czest II“, Polskie Towarzystwo Parazytologiczne, 1993
- [41] A. Ennaceur: „Tests of unconditioned anxiety — Pitfalls and disappointments“, Physiology & Behavior, 135: 55–71, 2013
- [42] F. Dantas-Torres F, R.P. Lia, G. Capelli, D. Otranto: „Efficiency of flagging and dragging for tick collection“, Exp Appl Acarol. 2013 Sep, 61(1):119-27
- [43] „Salzburg Resolution on Mobile Telecommunication Base Stations International Conference on Cell Tower Siting Linking Science & Public Health“, Salzburg, Austria, June 7-8, 2000
- [44] W. W. Stroup: „Generalized Linear Mixed Models“, CRC Press, 2012
- [45] M. Lesnoff, R. Lancelot: „aods3: Analysis of Overdispersed Data Using S3 Methods“, aods3 Package Version 0.4–1, 2013, dostupné online [Cit 9-4-2018]: <<http://CRAN.R-project.org/package=aods3>>
- [46] R Core Team: „A Language and Environment for Statistical Computing“, 2014
- [47] D. M. Bates, B. B. Maechler, S. Walker: „lme4: Linear Mixed-Effects Models Using Eigen and S4. R Package Version 1.1–7, 2014 dostupné online [Cit 9-4-2018]: <<http://CRAN.R-project.org/package=lme4>>
- [48] J. Tukey: „Comparing Individual Means in the Analysis of Variance“, Biometrics, 5 (2): 99–114, 1949

Bezdrôtové viacpreskokové siete s využitím kognitívneho rádia

Martin Matis

Katedra elektroniky a multimediálnych komunikácií
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
martin.matis@tuke.sk

Lubomír Doboš

Katedra elektroniky a multimediálnych komunikácií
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
lubomir.dobos@tuke.sk

Abstrakt— Tento článok sa zaoberá bezdrôtovými sieťami bez infraštruktúry, ktoré je možné používať pre prípady neexistencie infraštruktúry, či zničenia existujúcej z ľubovoľných dôvodov. Taktiež môžu koexistovať popri existujúcej infraštruktúre. Článok má zameranie sa na oblasť Ad-Hoc siete, konkrétne podľa oblasti použitia na Mobilné Ad-Hoc siete, siete tolerujúce oneskorenie a Hybridné MANET-DTN siete. Následne je oblasť záujmu v článku zameraná na mobilné Ad-Hoc siete s využitím kognitívneho rádia. Hlavná myšlienka, ktorou je využívanie licencovaného spektra nelicencovaným používateľom po dobu neaktivity primárnym používateľom a zároveň neovplyvňovanie primárneho používateľa v jeho činnostiach, je využitá pre účely mobilných Ad-Hoc sietí. Následne je v práci predstavený návrh smerovania pre CR-MANET siete, ktorý využíva proces vnímania spektra, inteligentného výberu spektra na základe fuzzy logiky pre nelicencovaných používateľov, ako aj samotný proces nachádzania spojenia za účelom odoslania správy medzi zdrojovým a cieľovým uzlom. Na základe vnímania spektra a získaných parametrov z vnímania inteligentná metóda dokáže autonómne medzi dvojicami uzlov navrhnúť optimálny komunikačný kanál z istého rozsahu a zároveň vyhodnotiť jeho kvalitu. Článok obsahuje vlastné návrhy smerovaní, pre ktoré sú odsimulované a vyhodnotené.

Keywords— *autonómna bezdrôtová sieť; mobilné Ad-Hoc siete; siete tolerujúce oneskorenie; hybridné siete; kognitívne rádio; kognitívne rádiové mobilné Ad-Hoc siete; sociálny model pohybu; fuzzy logika*

I. ÚVOD

Výskum v článku sa zaoberá mobilnými sieťami. Ide konkrétne o siete, ktoré nepotrebujú k svojej funkčnosti infraštruktúru, teda hovoríme o Ad-Hoc sieťach. Sú tvorené iba zariadeniami, ktoré si na odosielanie informácií medzi sebou vystačia sami a nepotrebujú žiadny centralizovaný manažment. Využitelnosť takejto témy je vysoká. Keďže dokážu zabezpečiť prenos informácií pomocou bežne dostupných zariadení s bezdrôtovými rozhraniami, pri ľubovoľnej živej pohrome dokážu ľudia v prípade potreby aj naďalej komunikovať. Zameranie sa v oblasti Ad-Hoc komunikácie medzi zariadeniami je v článku konkretizované na zariadenia podliehajúce mobilite a dostatočnej hustote siete, teda rozanalyzovaná je téma mobilných Ad-Hoc sietí (MANET) najmä z pohľadu smerovacích protokolov. Pre iný typ prostredia je viac vhodné použitie sietí tolerujúce

oneskorenie (DTN). Každá z týchto sietí sa hodí na rozdielne prostredia. Existuje medzi nimi premostenie, takzvané hybridné MANET-DTN siete. V rámci návrhov vlastných riešení bol navrhnutý smerovací protokol pre DTN siete a hybridné MANET-DTN siete. Tieto návrhy aj s existujúcimi riešeniami MANET smerovania boli odsimulované a porovnané.

Po využití poznatkov z viacpreskokových sietí sa obzor v rámci výskumu rozšíril o využitie kognitívneho rádia pre účely MANET sietí. Keďže tento koncept predpokladá prítomnosť kognitívneho rádia, teoretický rozbor bol zameraný na vnímanie spektra mobilnými zariadeniami a inteligentné pridelovanie voľne dostupného spektra. Keďže hovoríme o kognitívnom rádiu, nelicencovaný používateľ má snahu využívať licencované spektrum do tej miery, aby licencovaného používateľa neovplyvňoval v jeho činnostiach, alebo popri prípade sa mu vedel dostatočne vyhnúť. Zozbierané informácie u takéhoto zariadenia spolu so zvolenými spektrami inteligentnou metódou sú nevyhnutné na efektívne doručovanie správy v CR-MANET sieti. Článok obsahuje aj návrh smerovania pre CR-MANET sieť rozdelený na funkčné bloky vnímania spektra, jeho inteligentného pridelovania na základe Fuzzy logiky a voľby vhodného smerovacieho prístupu v závislosti na prostredí. Daný návrh bol spracovaný vo forme simulačných blokov. Odsimulované boli rôzne smerovacie prístupy, ako aj nové návrhy vhodné pre CR-MANET prostredie.

II. AD-HOC SIETE

Ad-Hoc siete sú sieťami bez pevne danej infraštruktúry. Tvoria ich zariadenia navzájom priamo prepojené, ktoré dokážu ľubovoľnou formou medzi sebou prenášať informácie, teda komunikovať. Podľa prostredia, do akého je táto myšlienka komunikácie a vzájomného spojenia terminálov bez infraštruktúry vložená, je možné hovoriť o viacerých typoch sietí bez infraštruktúry. Prvým typom sú Mobilné Ad-Hoc siete (MANET-Mobile Ad-Hoc Network), ktoré tvoria terminály podliehajúce pohybu a viacskokovej komunikácii medzi nimi. Tú zabezpečujú rôzne druhy smerovacích protokolov. Druhým typom sú siete tolerujúce oneskorenie a príležitostnú komunikáciu (DTN-Delay Tollerant Network). Tvoria ich taktiež mobilné terminály (MT) zväčša podliehajúce mobilite, no čas doručenia môže byť aj dlhší. Dôležité je, aby sa správa

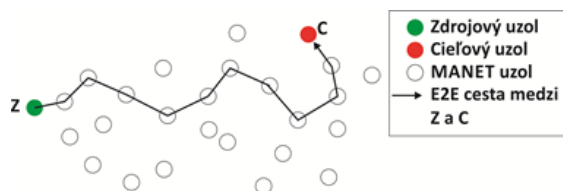
doručila do cieľa. Tretím typom sietí sú Hybridné MANET-DTN siete. MANET, ale aj DTN siete majú svoje výhody, rovnako aj nevýhody. Z tohto dôvodu je snahou Hybridných MANET-DTN vyzdvihnúť výhody oboch typov sietí, potlačiť ich nevýhody a vhodne ich skombinovať na dosiahnutie čo možno najlepších výsledkov a univerzálnosti pre rôzne prostredia, kde by mohli byť nasadené. [1], [2]

A. MANET Siete

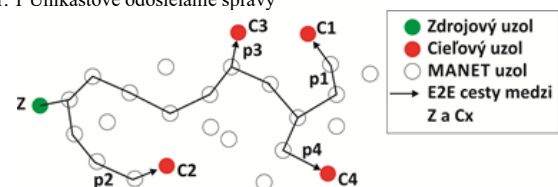
MANET je súbor mobilných uzlov, ktoré tvoria dočasnú sieť bez pomoci centralizovanej správy alebo štandardných zariadení a pravidelne riadia smerovanie a dostupnosť uzlov ako v konvenčných sieťach. Tieto uzly majú zvyčajne obmedzený rozsah prenosu, a tak každý uzol využíva pomoc svojich susedných uzlov pri zasielaní paketov. Týmto uzlom, ktoré zabezpečujú viacsokovú komunikáciu, sa v MANET sieťach môže hovoriť nexthopy. Tak uzol môže odovzdávať pakety medzi inými uzlami, tiež aj beh užívateľských aplikácií pomocou viacsokovej komunikácie. Tieto typy sietí sú vhodné pre situácie, kde buď žiadna pevná infraštruktúra neexistuje alebo jej používanie nie je možné. MANET siete našli mnoho uplatnení v rôznych oblastiach, ako sú vojenské, núdzové, záchranné, konferencie a senzorové siete. Každá z týchto aplikačných oblastí má svoje špecifické požiadavky na smerovacie protokoly.

Funkcionalitu MANET sietí zabezpečuje mnoho protokolov. Počnúc protokolmi, ktoré formujú topológiu a kontrolujú ju, zabezpečujú smerovanie medzi uzlami v sieti, cez transportné protokoly zabezpečujúce prenos správ, ale aj protokoly šetriace energiu a riešiacie otázky bezpečnosti. [1]

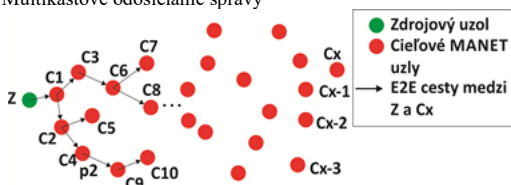
Prvý pohľad na smerovacie protokoly nám hovorí o tom, koľko kópií správ je odosielaných v sieti medzi zdrojom (Z) a cieľom (C) po end-to-end (E2E) ceste. Hovoríme o unicastových (Obr. 1), multicastových (Obr.2) a broadcastových (Obr.3) protokoloch.



Obr. 1 Unikastové odosielanie správy

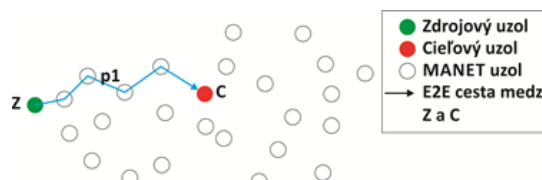


Obr. 2 Multikastové odosielanie správy

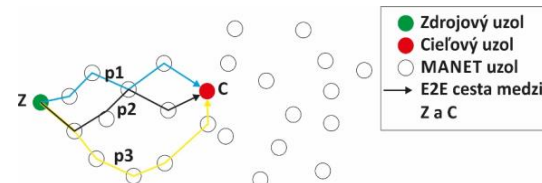


Obr. 3 Broadcastové odosielanie správy

Druhý pohľad na smerovacie protokoly hovorí o počte nachádzaných ciest, konkrétne sa spomínajú jednocestné (Obr. 4) a viaccestné (Obr. 5) protokoly.



Obr. 4 Jednocestné odosielanie správy



Obr. 5 Viaccestné odosielanie správy

Tretím pohľadom na odosielanie správ v MANET prostredí je typ použitého smerovacieho protokolu. V základnom pohľade hovoríme o reaktívnych (DSR [3]), proaktívnych (DSDV [4]) a hybridných (ZRP [5]), ktoré kombinujú vlastnosti proaktívnych a reaktívnych protokolov.

B. DTN Siete

Siete tolerujúce oneskorenie (DTN) sa vyznačujú občasnou konektivitou s vysokým oneskorením a môžu byť označené aj ako siete tolerujúce rozdelené siete. Koncept oneskoreného prenosu, mechanizmu store-carry-forward je prispôbený pre dizajn oportunistických mobilných sietí (OPP sietí). Týmto dizajnom, ktorý je vhodný pre komunikáciu medzi inteligentnými zariadeniami v MANET sieti (v oportunistickej MANET sieti – OPMANET sieti), v ktorej je povolené oneskorenie, sa budem ďalej v práci venovať.

Smerovanie v oportunistickej mobilnej ad-hoc sieti (OPMANET) je charakterizované občasnou a sporadickou príležitosťou komunikovať medzi podporovanými zariadeniami. V dôsledku toho existuje cesta medzi zdrojom a cieľom, poprípade cieľmi, krátko a v nepravidelných časových okamihoch, čo vedie k vytváraniu viacerých oddielov siete, ostrovov či podsietí. Väčšina existujúcich smerovacích prístupov lokálne ukladá dátové pakety a preposiela ich vtedy, keď dosiahne iný mobilný uzol, ktorý je schopný odnieť informácie, teda dátový paket, bližšie k cieľu. [6][7][8]

Existujú 4 základné metódy odosielania správ pre MANET prostredie pomocou DTN mechanizmov:

- metóda základného preposielania – využíva myšlienku odosielania vždy jednej kópie správy,
- metóda záplavového preposielania – odosiela správy každému koho stretne kvôli maximalizovaniu úspešnosti doručenia správy,
- metóda kombinujúca základné a záplavové preposielanie – odosielanie iba obmedzeného počtu kópií správ sa snaží zabezpečiť zvýšenie úspešnosti a nezaťaženie siete,

- metóda založená na sociálnom správaní – využíva sociálne vzťahy medzi uzlami na optimálne odosielanie správ.

C. Hybridné MANET-DTN Siete

Na posielanie dát v MANET sieťach je nutné spojenie medzi zdrojom komunikácie a cieľovým uzlom (E2E – End-to-End). Pri strate takéhoto spojenia v konečnom dôsledku dochádza aj k ukončeniu prenosu a tento prenos sa považuje za neúspešný. Možnosťou, ako tento postup zvrátiť, je začleniť mechanizmy, ktoré by zabezpečili doručenie správy aj v prípade existencie, či neexistencie E2E spojenia, straty už existujúceho spojenia, rozpojenia existujúcej topológie siete ale aj zničenia infraštruktúry.

Tento spôsob môže zabezpečiť doručenie správy pri príležitostnom strete s inými uzlami aj v prípade, že sa nevytvorí spojenie s cieľovým uzlom za cenu vysokého oneskorenia. Z toho dôvodu tento typ prenosu nebude vhodný pre real-time aplikácie. Daným spôsobom by bolo možné prenášať napríklad SMS, MMS, e-maily a mnoho ďalších aplikácií s podobným zameraním, teda s nenáročnosťou na čas doručenia.

Myšlienka hybridnej siete spočíva v komunikácii medzi zariadeniami bez infraštruktúry v rámci prepojených ostrovov pomocou hľadania ciest medzi jednotlivými ostrovmi s využitím DTN mechanizmov a príležitostných stretnutí uzlov.

Základná aplikácia Hybridných MANET sietí môže byť v oblastiach bez infraštruktúry alebo v oblastiach, kde bola existujúca infraštruktúra zničená živelnou pohromou. Ostrovy konektivity sú meniace sa z dôvodu mobility a pokiaľ v dobre prepojenom ostrove je možné si vystačiť s MANET metódami, komunikácia medzi ostrovmi možná nebude. Pre tento prípad by hybridné protokoly dokázali zabezpečiť komunikáciu jednak v ostrove, ale aj plynule medzi ostrovmi aj za cenu zvýšenia oneskorenia. Pretože ideou týchto sietí a protokolov v nich je zabezpečiť doručenie správy a garantovať najvyššiu prenosovú rýchlosť. Pre tento prípad je výhodné využiť zariadenia denného využitia ako smartfóny a tablety, ktorých komunikáciu by zabezpečoval Hybridný MANET-DTN smerovací protokol, pozostávajúci z kombinácie MANET a DTN smerovania [9-12].

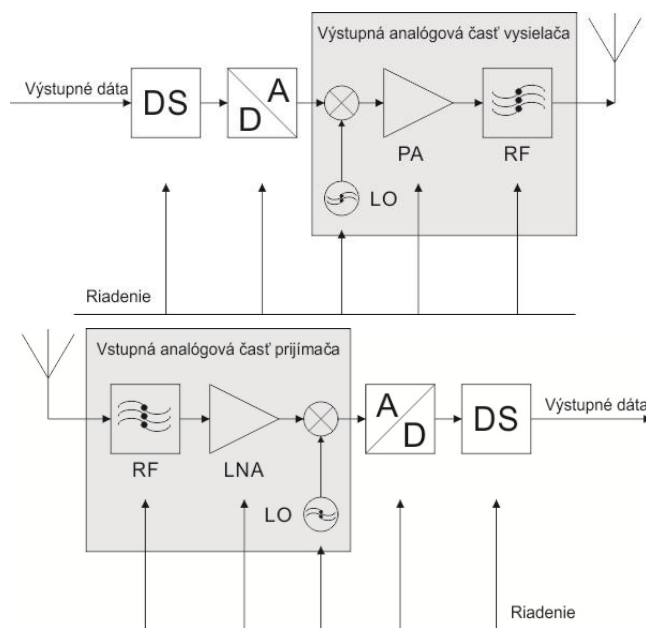
Pre hybridné MANET-DTN siete bolo publikované nemalé množstvo smerovacích protokolov. Medzi nich patria napríklad DT-DYMO [13], HYMAD [14], SF-BATMAN [15], STAR [9], AODV-DTN [9], DTN-OLSR [9], R3 [16], SCaTR [17].

III. KOGNITÍVNE RÁDIOVÉ MOBILNÉ AD-HOC SIETE

Kognitívne rádiové MANET (CR-MANET) siete využívajú tzv. kognitívne rádio. Ide o zariadenie, ktoré dokáže na základe prijímaného signálu zmeniť parametre softvérového definovaného rádia (SDR) tak, aby sa prispôbilo okolitému prostrediu (technológii, moduláciám a pod.). Tieto zmeny sa vykonávajú zmenou softvéru v softvérovom definovanom rádiu (Obr. 6). Po prispôbení technológie a ďalších parametrov v SDR dokáže kognitívne rádio plniť svoje základné funkcie potrebné pre CR-MANET siete, konkrétne vnímať okolité

spektrum, vyhľadávať voľný priestor v závislosti na technológii a podľa potreby ho využiť na komunikáciu.

CR-MANET je špeciálnym typom kognitívnej rádiovéj siete bez centralizovaného riadenia. V dôsledku decentralizovaného riadenia tejto siete je za potreby, aby sekundárni používatelia (SU – využívajúci nelicencované frekvenčné spektrum) dokázali spolupracovať a vymieňať si informácie týkajúce sa siete. Ide o informácie týkajúce sa napríklad prítomnosti primárnych používateľov (PU – využívajúci licencované frekvenčné spektrum), konfigurácie susedných uzlov, voľného dostupného licencovaného spektra a podobne. Tieto informácie sa získavajú prostredníctvom lokálneho pozorovania a snímania spektra a môžu sa použiť na účely rekonfigurácie a smerovania. CRAHN sa vyznačujú aj vlastnými vlastnosťami, vrátane dynamických topológií, heterogénnosti spektra, architektúry s viacerými skokmi, samokonfigurovateľnosťou a energetickým obmedzením zdrojov zariadení, keďže hovoríme o mobilných zariadeniach. CRAHN je veľmi zaujímavou oblasťou, v ktorej je možné venovať sa výskumu na zefektívnenie a čo najviac optimálne využitie dostupného frekvenčného spektra. [18], [19]



Obr. 6 Schéma softvérového definovaného rádia

Kognitívne rádio v CR-MANET sieťach pristupuje k spektru dynamicky. Na to aby to bolo možné je nevyhnutné neustále vnímanie spektra, riadenie spektra, jeho mobilita ale aj zdieľanie.

A. Smerovanie v CR-MANET

Tak ako aj pri klasických MANET sieťach s podporou alebo bez podpory oneskoreného, či hybridného prenosu aj CR-MANET siete majú hlavnú požiadavku a to úspešne prenášať informácie medzi Z a C v bezdrôtovom viacpreskokovom prostredí ale aj s využitím spektra primárnych používateľov za cenu ich neovplyvňovania. Preto je možné hovoriť o rôznych typoch smerovania pre CR-

MANET siete. Prvá skupina je tvorená modifikáciou protokolov vhodných pre viacpreskovú sieť a druinou su vytvorené nové protokoly na základe modelovania (optimalizovaného, pravdepodobnostného alebo grafového). [20]

B. Metódy pridelenia spektra v CR-MANET

Mobilné zariadenia v CRAHN sieťach sú autonómne zariadenia bez centralizovaného riadenia a z toho dôvodu každý uzol SU vykonáva rozhodovanie sám vo svojom bezprostrednom okolí. Tieto rozhodnutia môžu a nemusia zohľadňovať situáciu, ktorá je v ich okolí. To znamená, že SU bezprostredne po zistení svojich susedov a zosnímaní spektra je schopný pridelit' komunikačný kanál a nadviazať spojenie. Môže to urobiť bez akéhokoľvek procesingu a výmeny základných informácií so susednými SU. Hovoríme o takzvanom neinteligentnom spôsobe pridelenia spektra alebo už komunikačného kanálu. Druhou možnosťou je využitie doplnkovej informácie od susedných uzlov a daná dvojica si vyberie optimálny kanál na komunikáciu s využitím inteligentnej metódy autonómneho rozhodovania. [18]

1) *Neinteligentné metódy*: Hlavná myšlienka týchto metód spočíva v pridelení komunikačného kanálu medzi dvojicou uzlov v dosahu z pohľadu uzla, ktorý nadväzuje spojenie a neberie sa do úvahy procesing informácií okolitých uzlov a ich už existujúce spojenia. Ide o základný a jednoduchý typ metód, ktorý častokrát nie je efektívny z pohľadu využívania zdrojov, ale je rýchly.

2) *Inteligentné metódy*: Ak sa hovorí o metódach pridelenia frekvenčného spektra (komunikačného kanálu) inteligentnou metódou, myslí sa tým zohľadňovanie veľkého množstva parametrov získaných od okolitých susedných uzlov. Vo všeobecnosti je možné postup inteligentného pridelenia zo strany jedného uzla voči ostatným rozdeliť do fáz zistenia susedov, zosnímania spektra, zistenia dostupnosti spektra, zozbierania informácií zo snímania spektra od susedných uzlov a výber optimálneho komunikačného spektra alebo kanálu medzi jednotlivými dvojicami uzlov v sieti. Existuje niekoľko inteligentných metód, ktoré je možné využiť na aplikáciu v procese inteligentného pridelenia spektra. Snahou je využívať čo možno najviac primárne získaných informácií od uzla a jeho procesu vnímania spektra. Na autonómne rozhodovanie uzlov je možné použiť niekoľko inteligentných metód:

- a) *Fuzzy logiku*
- b) *Teóriu hier*
- c) *Teóriu grafov*
- d) *Genetické algoritmy*

IV. NÁVRHY SMEROVANÍ

Pre viacpreskovú bezdrôtovú sieť sme navrhli viaceré smerovacie mechanizmy. Niektoré z nich boli modifikáciami existujúcich mechanizmov, iné boli návrhmi nových. Návrhy a zmeny boli vytvárané pre oblasti MANET smerovacích

protokolov reaktívneho ale aj proaktívneho prístupu, DTN smerovacích protokolov ale aj Hybridných MANET-DTN smerovacích protokolov s využitím sociálnych väzieb. Následne sa naše návrhy uberali myšlienkou viacpreskových MANET sietí s využitím kognitívneho rádia a inteligentnej metódy pridelenia frekvenčného spektra.

A. Návrh sociálneho oportunistického smerovania SBOR

Navrhovaný smerovací protokol SBOR (Social Based Opportunistic Routing) je protokolom pre siete tolerujúce oneskorenie (Obr. 7). Využíva základné princípy týchto sietí a ich modifikácie pre optimalizáciu prenosu správ cez sieť pozostávajúcu z mobilných terminálov bez infraštruktúry. Konkrétne ide o upravené epidemické šírenie a sociálne vzťahy nadobudnuté z minulosti medzi uzlami. Tento protokol funguje na princípe histórie kontaktov a počítania pravdepodobnosti stretnutia sa s daným kontaktom. Proces smerovania je možné rozdeliť do fáz *zistenie susedov*, *odoslanie požiadavky na prenos správy*, *výber vhodného kandidáta*, *odoslanie/neodoslanie správy*.

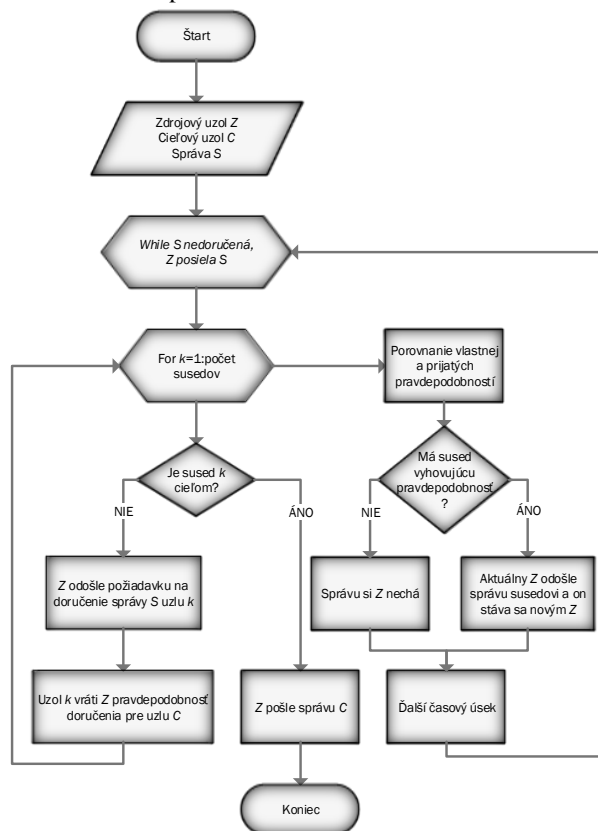
1) *Zistenie susedov*: Počas prvého kroku, kedy sa uzol ocitne v sieti, začne s nadviazaním spojenia s ostatnými uzlami vo svojom rádiovom dosahu. Začína si vytvárať lokálnu históriu kontaktov, kedy, s kým a ako dlho bol v kontakte počas svojho pohybu.

2) *Odoslanie požiadavky na prenos správy*: Akonáhle ľubovoľný uzol v takto vytvorenej sieti sa rozhodne poslať inému uzlu správy, využije sa na to DTN mechanizmus priamo z uzla na uzol (D2D – Device-to-Device), s využitím histórie kontaktov. Každý uzol pozná svojich susedov, ktorým odošle broadcastovým vysielaním informáciu, komu chce odoslať správu. Každý uzol požiadavku prijme a spracuje ju. V procese spracovania prebehne na každom uzle kontrola lokálnej tabuľky histórie kontaktov a vypočíta sa pravdepodobnosť stretnutia s požadovaným uzlom. Tento údaj sa okamžite vracia už iba ako numerická hodnota zdrojovému uzlu, ktorý vykoná rozhodnutie o voľbe vhodného kandidáta na odoslanie správy.

3) *Výber vhodného kandidáta*: Zdrojový uzol po prijatí informácie o pravdepodobnosti doručenia z každého susedného uzla daný údaj porovná sám so sebou. V prípade, že pravdepodobnosť doručenia pre daný cieľ je na ľubovoľnom uzle nižšia, uzol si ju buď nechá, ak je pravdepodobnosť podprahová, pričom počká na vhodnejších kandidátov. Môže ju odoslať aj v prípade s nižšou pravdepodobnosťou doručenia akú má on sám, ak je predpoklad, že zdrojový uzol sa určite nedostane do blízkosti alebo kontaktu s cieľom. Pre opačný prípad, kedy z porovnania vyplynie, že pravdepodobnosť susedného uzla je vyššia, správa sa mu odošle. Ak sa nájde vhodný kandidát na odoslanie správy alebo si ju uzol ponechá po istú dobu, zopakuje sa celý proces, pokiaľ sa správa nedoručí do cieľového uzla. Predpokladom sú sociálne väzby medzi komunitou uzlov, ktoré sa pravidelne stretávajú a ich pohyb

podlieha sociálnemu pohybu na maximalizovanie úspešnosti doručenia a minimalizovanie času doručenia.

4) *Odoslanie/neodoslanie správy*: Ak nastanú vhodné podmienky na odoslanie správysmerom k susednému uzlu, tak bude správa odoslaná. V inom prípade si zdrojový uzol správu ponechá a bude čakať na vhodnejších kandidátov na odoslanie správy. V prípade osobného stretnutia s cieľom je správa odovzdaná cieľu v plnom rozsahu.



Obr. 7 Proces odosielenia správy protokolom SBOR

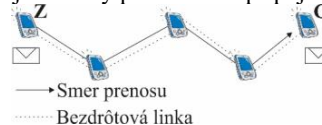
B. Návrh Hybridného MANET-DTN smerovania HSBR

Na posielanie dát v MANET sieťach je nutné spojenie medzi zdrojom komunikácie a cieľovým uzlom (E2E – End-to-End). Pri strate takéhoto spojenia v konečnom dôsledku dochádza aj k ukončeniu prenosu a tento prenos sa považuje za neúspešný. Možnosťou, ako tento postup zvrátiť, je začleniť mechanizmy, ktoré by zabezpečili doručenie správy aj v prípade: *existujúceho E2E spojenia, neexistujúceho E2E spojenia, straty už existujúceho spojenia, rozpojenia existujúcej topológie siete, zničenia infraštruktúry*.

Myšlienka hybridnej siete spočíva v komunikácii medzi zariadeniami bez infraštruktúry v rámci prepojených ostrovov pomocou hľadania ciest medzi jednotlivými ostrovmi s využitím DTN mechanizmov a príležitostných stretnutí uzlov. Základná aplikácia Hybridných MANET sietí môže byť v oblastiach bez infraštruktúry alebo v oblastiach, kde bola existujúca infraštruktúra zničená živelnou pohromou. Ostrovy konektivity sú meniace sa z dôvodu mobility a pokiaľ v dobre

prepojenom ostrove je možné si vystačiť s MANET metódami, komunikácia medzi ostrovmi možná nebude. Pre tento prípad by hybridné protokoly dokázali zabezpečiť komunikáciu jednak v ostrove, ale aj plynule medzi ostrovmi aj za cenu zvýšenia oneskorenia. Pretože ideou týchto sietí a protokolov v nich je zabezpečiť doručenie správy a garantovať najvyššiu prenosovú rýchlosť. Pre tento prípad je výhodné využiť zariadenia denného využitia ako smartfóny a tablety, ktorých komunikáciu by zabezpečoval Hybridný MANET-DTN smerovací protokol, pozostávajúci z kombinácie MANET a DTN smerovania.

1) *MANET smerovanie*: Vyžaduje E2E spojenie medzi zdrojom a cieľom na prenos údajov (Obr. 8). Pri strate a neudržaní E2E spojenia komunikácia padá a prenos je neúspešný. Nie je vhodný pre občasne pripojené siete.



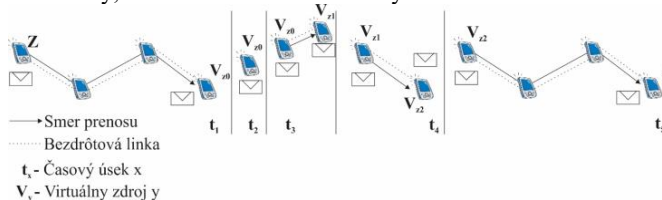
Obr. 8 Prenos správy MANET mechanizmom

2) *DTN smerovanie*: Nevyžaduje E2E spojenie medzi zdrojom a cieľom na prenos údajov, využíva sa tzv. device-to-device (D2D) spojenie (Obr 9.). Využíva mechanizmus store-carry-forward a príležitostné stretnutia s uzlami. Môže odosielať buď jednu alebo viaceré kópie správy.



Obr. 9 Prenos správy DTN mechanizmom

3) *Hybridné MANET-DTN smerovanie*: Snaží sa využívať E2E cesty, mechanizmus store-carry-forward alebo ich kombinácie na zabezpečenie doručenia správy pre rôzne vznikajúce topológie siete (Obr. 16). Časť MANET smerovania sa využíva v dobre prepojených sieťach a DTN časť vtedy, ak MANET smerovanie zlyháva.

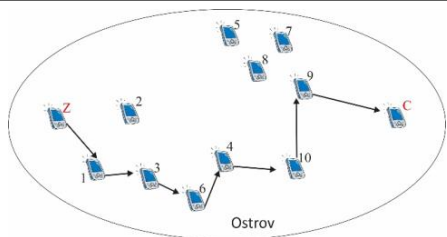


Obr. 10 Hybridný prenos správy MANET a DTN mechanizmami

V rámci základnej funkcionality HSBR smerovania je zahrnuté doručovanie správ pomocou E2E mechanizmu (MANET smerovanie), ale aj D2D mechanizmu (DTN smerovanie). Tento návrh v konečnom dôsledku zohľadňuje sociálne vzťahy medzi uzlami a je použiteľný pre prostredia s rôznymi rýchlosťami pohybu zariadení.[5]

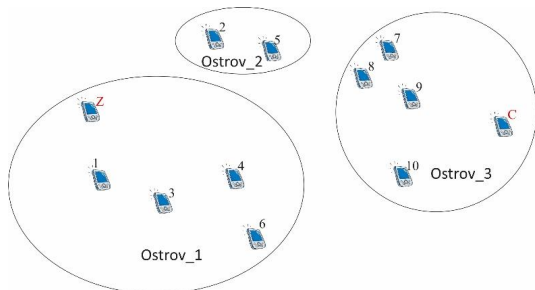
Našou snahou bolo navrhnúť taký protokol, ktorý by dobre fungoval pre prostredia, kde:

- *E2E spojenie existuje* – je možné vytvoriť a udržať cestu medzi Z a C počas komunikačnej relácie (Obr.11).



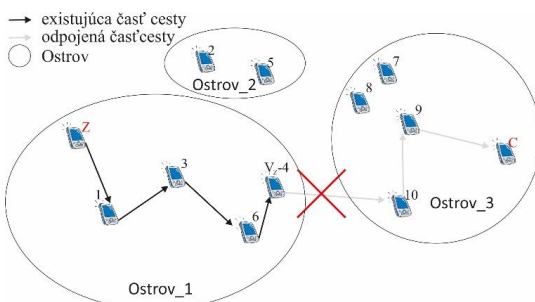
Obr. 11 Existencia E2E spojenia

- *E2E spojenie neexistuje* – zdroj a cieľ sa nachádzajú na počiatku komunikačnej relácie v dvoch vzájomne neprepojených ostrovoch a E2E spojenie nie je možné. Z toho dôvodu sa začne komunikačná relácia D2D mechanizmom (Obr. 12).



Obr. 12 E2E spojenie neexistuje

- *E2E spojenie existovalo, ale zaniklo* – na počiatku komunikačnej relácie bolo možné naviazať E2E spojenie, ale vplyvom mobility, výpadku uzla a pod. došlo k prerušeniu spojenia a mechanizmy udržania komunikácie zlyhali, keďže sa sieť rozpadla na menšie podsiete. No ani v takej zložitej situácii komunikačná relácia nezaniká, ale za pomoci DTN mechanizmov a navrhovaného protokolu pokračuje (Obr. 13).



Obr. 13 E2E spojenie existovalo, ale zaniklo

Navrhovaný protokol vychádza z MANET smerovacieho protokolu DSR, ktorý bolo nutné pre účely implementovania DTN mechanizmov modifikovať a prispôbiť. Návrh protokolu zahŕňa DTN zložku smerovania založenú na jednodúhokopiovom odosielaní správy na základe vyhovujúcej vypočítanej pravdepodobnosti zo sociálnych väzieb medzi uzlami [21].

1) *Modifikácia MANET smerovania:* M-DSR protokol je nami navrhnutá modifikácia štandardizovaného protokolu DSR, ktorý predstavuje jednoduchý a efektívny protokol pre mobilnú viacskokovú bezdrôtovú ad-hoc sieť, hľadajúci cesty na vyžiadanie. Obsahuje dva základné mechanizmy, Hľadanie

cesty (Route Discovery) a Udržanie cesty (Route Maintenance). Tieto dva mechanizmy bolo potrebné modifikovať pre potreby vytvorenia M-DSR protokolu, ktorý má hlavnú úlohu pri fungovaní hybridného návrhu. Modifikácia v sebe zahŕňa:

a) *Úpravu Route Request paketu:* tento paket E-RREQ (extended RREQ) bol rozšírený o doplnkovú informáciu, ktorú do neho vložil iniciátor komunikačnej relácie. Doplnkovou informáciou boli sociálne informácie.

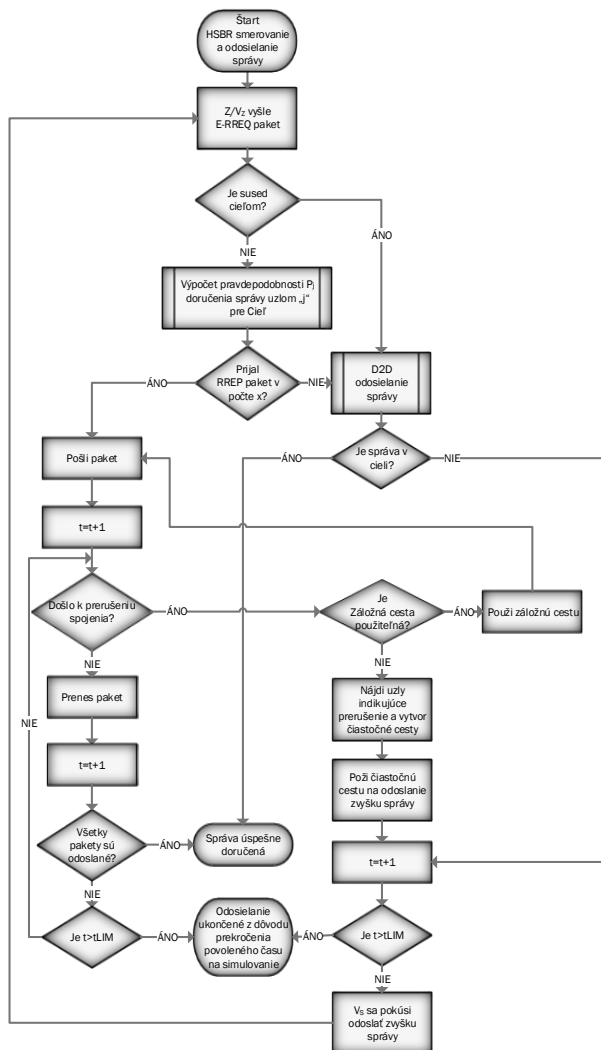
b) *Výpočet pravdepodobnosti doručenia v každom uzle:* uzly, ktoré prijaly E-RREQ vypočítali pravdepodobnosť doručenia.

c) *Detegovanie a použitie posledného uzla:* zo všetkých použiteľných ciest k cieľu pre danú komunikačnú reláciu sa detegovali uzly, za ktorými nastalo rozpojenie ciest. Tieto uzly sú vnímané ako potenciálne virtuálne zdroje pre budúce odosielanie.

2) *Mechanizmy pokračovania komunikácie:* Tieto mechanizmy je možné použiť v prípade, že DSR smerovanie zlyhá a je nutné udržať komunikáciu aj v prípade, že neexistuje cesta do cieľového uzla. Typickým príkladom mechanizmu je DTN mechanizmus založený na odoslaní z jedného uzla na druhý priamo, teda ide o D2D prenos alebo využitie čiastočnej cesty - PPath, ktorá využíva znalosť potenciálnych virtuálnych uzlov a čiastočných ciest v smerovacej tabuľke M-DSR. Samotný mechanizmus, ktorý zabezpečuje pokračovanie posielania správy, existuje v dvoch formách. Prvou je D2D odosielanie správy a druhou formou je využívanie čiastočnej cesty. [21]

3) *HSBR smerovanie:* Ako je znázornené vo vývojovom diagrame (Obr. 14), smerovanie hybridného protokolu začína zo zdroja alebo virtuálneho zdroja odosielaním E-RREQ, zistí sa, či sused nie je cieľom a následne prebieha výpočet pravdepodobnosti doručenia na uzloch, ktoré dostali E-RREQ pre danú komunikačnú reláciu. Po prijatí istého počtu RREP paketov (pre naše simulácie hodnota $x=2$ kvôli získaniu záložných ciest) zdroj využije cesty alebo odoslanie susedovi, alebo správu bude v konečnom dôsledku niesť do ďalšieho časového okamihu, kde nastáva opätovný proces. Pri využívaní ciest sa kontroluje ich funkčnosť a v prípade potreby sa spojenie udržiava náhradnou cestou, v krajnom prípade čiastočnou cestou, ktorá určí nový virtuálny zdroj, ktorý je bližšie k cieľu, pre zvyškovú správu. Hneď na začiatku môže nastať situácia, že cesty nebudú nájdené alebo použiteľné a v takej situácii sa hľadá nový zdroj/virtuálny zdroj pomocou D2D odosielania správ. Výsledkom D2D odosielania je jednoskokové odoslanie správy susednému uzlu na základe pravdepodobnosti doručenia, alebo nesenie správy v prípade nevybudovania cesty medzi zdrojom a cieľom.

Detailne popisy výpočtu pravdepodobnosti, D2D odosielania správy, definície tabuliek kontaktov a ďalších návrhov, či modifikácií pre HSBR je možné vidieť v [21], [22]



Obr. 14 Hybridné MANET-DTN smerovanie HSRB

C. Návrh Smerovanie pre CR-MANET siete

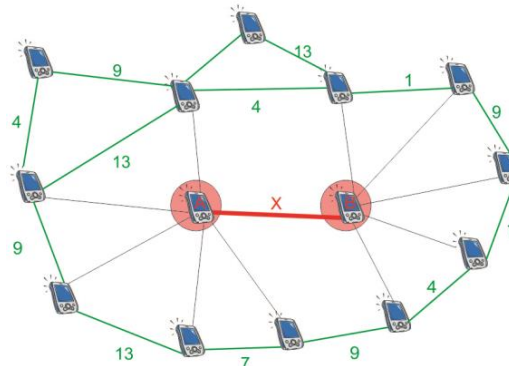
Na základe analýzy CR-MANET sietí a existujúcich smerovacích protokolov som spolu s vedeckým kolektívom našej katedry vypracoval návrh smerovacieho algoritmu pre CR-MANET siete, ktorý pozostáva z niekoľkých funkčných blokov (FB) zobrazených na Obr. 49. Keďže je algoritmus navrhnutý pre CR-MANET, nutnou súčasťou je využívanie funkčného bloku snímania spektra, zisťovanie vhodných komunikačných kanálov, zber čo možno najväčšieho množstva informácií z procesu vnímania spektra. Výsledky spektrálneho vnímania boli použité ako vstupné parametre pre funkčný blok inteligentného pridelenia spektra medzi dvojicu uzlov, ktoré sú vo vzájomnom rádiovom dosahu. Pre účely nášho návrhu sme použili Fuzzy logiku, ako autonómny a inteligentný mechanizmus pridelovania spektra. Táto inteligentná metóda neurčí iba optimálny kanál medzi danou dvojicou uzlov, ale aj ohodnotí kvalitu linky pri voľbe daného komunikačného kanálu. Kvalita je v tomto návrhu vnímaná

ako jedna numerická hodnota získaná z parametrov vnímania spektra a vyhodnotená Fuzzy logikou pre danú komunikačnú linku. Pre kompletizáciu smerovacieho algoritmu je nutné implementovať do návrhu funkčný blok smerovania pre odosielanie spravy autonómny spôsobom. Pre náš návrh je možné použiť ľubovoľné smerovanie vhodné pre CR-MANET siete vychádzajúce z teoretického rozboru problematiky smerovania CR-MANET sietí.



Obr. 15 Základné funkčné bloky návrhu smerovania pre CR-MANET

4) *FB vnímania spektra*: Tento funkčný blok je prvým blokom, ktorý prinesie uzlu základné informácie z jeho okolia. Ide najmä o informácie, kto sa tam nachádza, aké frekvenčné spektrum využíva a podobne. Z procesu vnímania spektra je možné získať mnoho informácií priamo alebo nepriamo (výpočtom). Pre účely našej simulácie sme z procesu vnímania spektra použili parametre ako výkon prijatého signálu, pomer signálu k šumu a prevádzku. Pre návrh je použitý predpoklad nesymetrickej prevádzky typický pre tento typ sietí s časovým duplexom TDD (Time Division Duplex). Riadenie tejto prevádzky zabezpečuje CSMA/CA. Na základe týchto predpokladov pre modelový stav siete (Obr. 16), kde sa vyšetruje kanál X medzi uzlom A a B, vieme ukázať, ktoré parametre a odkiaľ sú brané do úvahy pre funkčný blok vnímania spektra. Parametre vnímania spektra pre vyšetrenú dvojicu uzlov a linku medzi nimi sú dôležité z pohľadu budúceho inteligentného pridelenia spektra (komunikačného kanálu) a smerovanie pre budúcu komunikáciu.



Obr. 16 Vyšetovaná linka medzi A a B a jej interferujúce linky

a) *Výkon prijatého signálu*: Ako prvým parametrom priamo získaným zo snímania spektra je RSSI. Tento parameter je možné získať z bezdrôtovej karty zariadenia a hovorí nám o tom, či daná dvojica uzlov A a B (Obr. 16) sú vôbec vo vzájomnom vysielačom dosahu, či bol signál vysielať z vysielačej antény zariadenia A prijatý prijímacou anténou zariadenia B a s akou intenzitou. Tento parameter je pre budúcnosť nezávislý od použitého kanálu z ľubovoľného rozsahu.

b) *Pomer signálu k šumu*: Parameter SIR nám vyjadruje, ako je linka medzi uzlami A a B (Obr. 16) s nejakým zvoleným komunikačným kanálom ovplyvňovaná okolím. Nejde pri tom o priame okolie uzla A ani B, pretože tie si svoje komunikačné linky (čiernej farby) synchronizujú a nedochádza na nich k rušeniam. Ide o tie linky (zelenej farby), ktoré existujú v rádiovom dosahu linky medzi A a B, ale nie sú s nimi synchronizované. Každá z tých liniek má pridelený komunikačný kanál, ktorý môže ovplyvňovať viac, menej alebo vôbec našu vyšetrovanú linku. Zo všeobecnej definície výpočtu S/I (1) vyplýva, že ide o pomer hodnôt výkonu signálu na prijímacej anténe (S) k súčtu pomerov interferenčných zložiek (I_i).

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^n I_i} \tag{1}$$

Po prispôbení tohto všeobecne platného vzorca pre návrh je možné dostať (2), kde $RSSI_X$ je výkon prijatého signálu linky X (v našom prípade červenej podľa (Obr. 16) a suma vyjadruje súčet všetkých n zložiek, ktoré by mohli danú linku X ovplyvňovať (podľa Obr. 16 zelené). To, do akej miery je linka X ovplyvnená, vyjadruje parameter α . Je to priamo závislé od toho, aký kanál bude uvažovaný pre linku X. Linky priamo prepojené s uzlami A a B (podľa Obr. 16 čierne) sa neuvažujú ako ovplyvňujúce linku X, pretože uvažujeme s TDD.

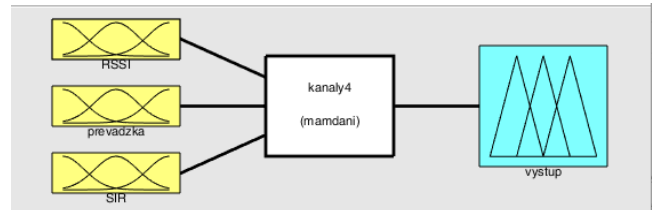
$$SIR = \frac{RSSI_X}{\sum_{i=1}^n (\alpha \cdot RSSI_i)} \tag{2}$$

c) *Prevádzka*: V procese snímania spektra je zisťovaný aj parameter bitová rýchlosť (BR) na linke a oznamovaná je aj podporovaná rýchlosť (PR) zvolenej technológie. Na základe týchto parametrov podľa (3) je možné nepriamo vypočítať prevádzku (P) na linke, ako ďalší parameter pre budúce použitie.

$$Prevádzka = \frac{BR[b/s]}{PR[b/s]} * 100\% \tag{3}$$

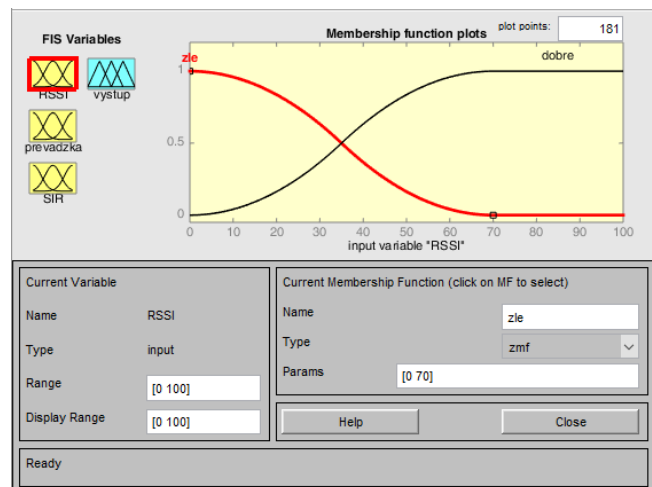
5) *FB inteligentného pridelovania spektra*: Druhým dôležitým funkčným blokom pre navrhovaný algoritmus je funkčný blok inteligentného pridelenia spektra. Inteligencia spočíva v autonómnom rozhodovaní sa každého uzla na základe spektrálneho snímania určiť optimálnu komunikačnú linku medzi uzlami A a B. Pre účely nášho algoritmu som sa rozhodol použiť Fuzzy logiku ako mechanizmus pre funkčný blok inteligentného pridelenia spektra. Tento funkčný blok dokáže na základe troch vstupných parametrov vytvoriť zoznam komunikačných kanálov, ktoré by boli optimálnou voľbou pre každý z uzlov A a B. Po vzájomnej dohode si uzly volia komunikačný kanál. Okrem informácie, aký komunikačný kanál bol zvolený, inteligentná metóda dokáže na základe vstupných parametrov aj kvantifikovať vlastnosti zvoleného kanálu a teda poskytnúť parameter metriky pre daný komunikačný kanál.

a) *Popis použitej Fuzzy logiky*: Fuzzy logika je nadmnožinou booleovskej logiky. To znamená, že pracuje s konceptom čiastočnej pravdy. To znamená, že pri porovnávaní nejakých parametrov nás nezaujíma iba ich existencia alebo neexistencia, ale aj nameraná hodnota. Fuzzy logika je volená kvôli jej jednoduchosti a pochopiteľnosti. Je možné pomocou nej modelovať ľubovoľné nelineárne funkcie (funkcie príslušnosti), ktoré sú ľubovoľnej zložitosti. Tie reprezentujú príslušnosť v rozsahu [0,1] pre vstupné parametre definovaného rozsahu, napríklad [0,10], na základe čoho je možné rozhodnúť o vlastnosti parametra podľa funkcie príslušnosti. Pre implementáciu návrhu inteligentnej metódy pridelovania spektra na základe Fuzzy logiky bol použitý Fuzzy logic designer, ako súčasť programu Matlab. Návrh inteligentnej metódy pre algoritmus vo Fuzzy logic designeri je možné rozdeliť do troch celkov (Obr. 17), ktoré sú navzájom prepojené. Prvý celok je pre všetky vstupné parametre pre Fuzzy logiku. Druhým celkom je súbor pravidiel, ktoré definujú vzťahy medzi jednotlivými vstupnými parametrami, ale aj to, o akú hodnotu v rámci parametra ide. Výsledkom celého procesu je definovanie výstupov, ktoré vytvoria numerické vyhodnotenie vstupných parametrov na základe pravidiel. Toto vyhodnotenie slúži ku voľbe optimálneho kanála a jeho kvality.



Obr. 17 Schéma návrhu FB inteligentného pridelovania spektra vo Fuzzy logic designeri

b) *Popis vstupného parametra RSSI*: Hodnota parametra RSSI sa určuje v kroku vnímania spektra a každý uzol si ho určuje pre svojho suseda autonómne. Ide o silu signálu prijatého na prijímacej anténe.

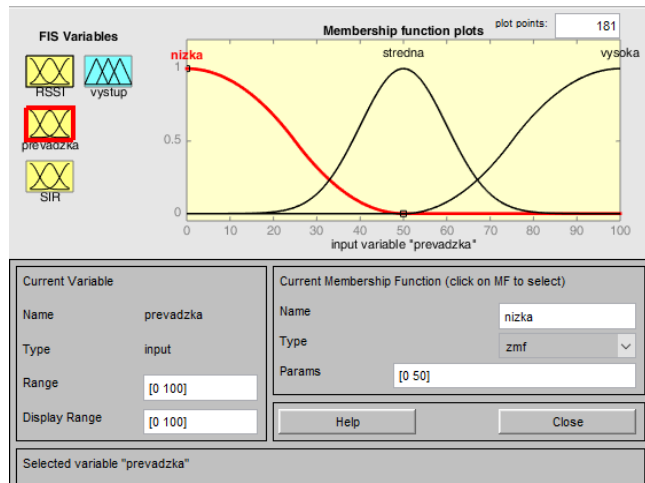


Obr. 18 Definícia funkcií príslušnosti pre vstupný parameter RSSI

Pre môj návrh je vyjadrený percentuálnou hodnotou od 0 % (minimálna/nulová hodnota prijatého signálu) do 100 %

(maximálna možná hodnota prijatého signálu v závislosti od vysielacieho dosahu pre simulácie). Pre vstupný parameter RSSI sú definované dve funkcie príslušnosti v pozitívnom a negatívnom zmysle. Sú zadané dve funkcie príslušnosti, „zle“ a „dobre“. Prvá sa nazýva „zle“ a vyjadruje svoj priebeh pomocou krivky „zmf“. Hovorí o tom, pre ktoré hodnoty je tvrdenie „zle“ úplne pravdivé, teda nadobúda hodnotu 1 a ako slabne tvrdenie, že RSSI je „zle“ zmenou samotných hodnôt RSSI. Druhá funkcia príslušnosti sa nazýva „dobre“ a je tvorená krivkou „smf“. Úroveň prijatého RSSI s minimálnou, resp. nulovou hodnotou nám vyjadruje úplnú nepravdu pre tvrdenie „dobre“. Toto tvrdenie zo zvyšujúcou sa hodnotou vstupného parametra RSSI narastá na pravdivosti (Obr. 18).

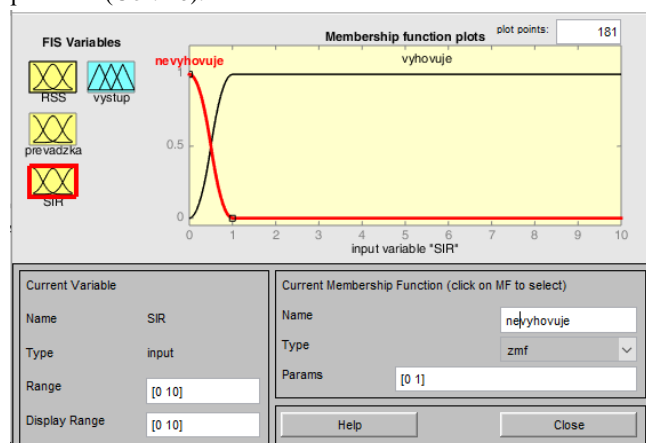
c) *Popis vstupného parametra Prevádzka:* Tento parameter je nepriamo získaný z procesu vnímania spektra pomocou výpočtu z dátovej a podporovanej rýchlosti podľa (7). Vstupná hodnota je prepočítaná na percentá, ktoré sú vstupným parametrom pre FL. Pre vstupný parameter prevádzka pre inteligentný blok Fuzzy logiky som definoval tri typy prevádzok. Každý jeden typ je definovaný vlastnou krivkou príslušnosti. Zadefinoval som funkcie príslušnosti ako nízku, strednú a vysokú prevádzku. Prvým typom prevádzky je „nízka“ a je reprezentovaná krivkou „zmf“. Pre vstupný parameter prevádzky 0 % môžeme hovoriť o úplnej pravde, teda výsledok tvrdenia nadobudne hodnotu 1. Postupným zvyšovaním prevádzky na kanále pravdivosť tvrdenia „nízka“ klesá. Druhým typom prevádzky je „stredná“. Funkcia príslušnosti pre strednú prevádzku je „gaussmf“, kde je nutné definovať, odkiaľ pokiaľ funkcia narastá. Tvrdenie, že prevádzka je „stredná“, je nepravdivé pre vstupné hodnoty od 0 % do 20 %. Následne začne vzrastať pravdivosť tvrdenia na základe funkcie príslušnosti. Pre hodnotu 50 % prevádzky je tvrdenie o strednej prevádzke úplne pravdivé. Následne pravdivosť tvrdenia klesá až po hodnotu 80 % prevádzky. Všetko nad 80 % vstupného parametra prevádzky je považované za nepravdu v zmysle funkcie príslušnosti „stredná“ prevádzka. Tretím typom prevádzky je „vysoká“ a je definovaná funkciou príslušnosti typu „smf“.



Obr. 19 Definícia funkcií príslušnosti pre vstupný parameter prevádzka

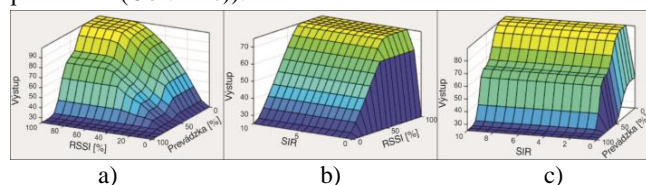
Pravdivosť tvrdenia funkcie príslušnosti „vysoká“ narastá zo zvyšovaním sa vstupnej percentuálnej hodnoty prevádzky od 50 %. Pri dosiahnutí 100 % je tvrdenie úplne pravdivé (Obr. 19).

d) *Popis vstupného parametra SIR:* Vypočítaná hodnota parametra SIR získaná v procese vnímania spektra vstupuje do Fuzzy logiky ako posledný parameter na inteligentné a autonómne rozhodovanie sa uzlov pre voľbu frekvenčného spektra, respektíve komunikačného kanálu. Tento vstupný parameter som definoval dvoma funkciami príslušnosti, vyhovuje a nevyhovuje. Prvá funkcia príslušnosti pre SIR v zmysle „nevyhovuje“ predstavuje krivku typu „zmf“. Toto tvrdenie je úplne pravdivé, ak prijatá hodnota SIR pre logiku dosiahne hodnotu nula. Pri náraste hodnoty SIR klesá pravdivosť tvrdenia. Druhá funkcia príslušnosti s významom „vyhovuje“ je úplne pravdivá pre prijaté hodnoty jedna a viac. S prijatím nižších hodnôt SIR bude dané tvrdenie čiastočne pravdivé (Obr. 20).

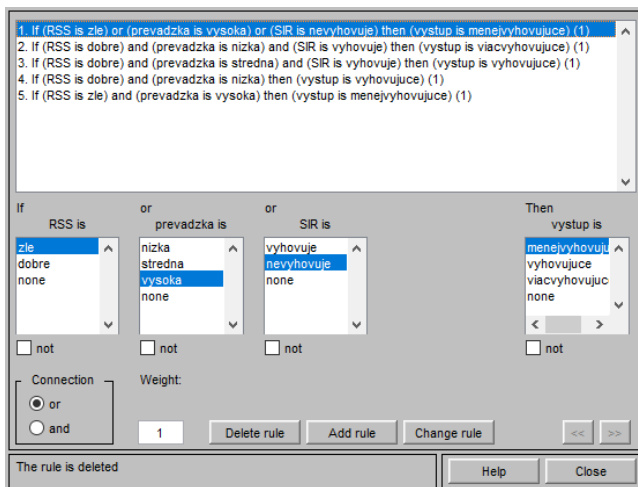


Obr. 20 Definícia funkcií príslušnosti pre vstupný parameter SIR

e) *Definícia pravidiel pre FL:* Vstupné parametre podliehajú funkciám príslušnosti a ich definovaniu, ohraničeniu a prechodom. Na základe pomenovania funkcií príslušnosti je možné vytvoriť súbor pravidiel, ktoré budú charakterizovať správanie sa inteligentného nástroja Fuzzy logiky nato, aby bola schopná na základe ľubovoľnej vstupnej hodnoty rozhodnúť, čo sa bude diať ďalej. Preto som definoval súbor pravidiel, ktorý je zobrazený v druhom bielom bloku (Obr. 17). Definoval som päť pravidiel pre vstupné parametre. Ich presné definovanie je zobrazené na Obr. 22. Priebehy funkcií príslušnosti a definícia pravidiel vytvoria grafické výstupy znázornené na obrázkoch pre závislosti RSSI-prevádzka (Obr. 21 a)), RSSI-SIR (Obr. 21 b)) a SIR-prevádzka (Obr. 21 c)).

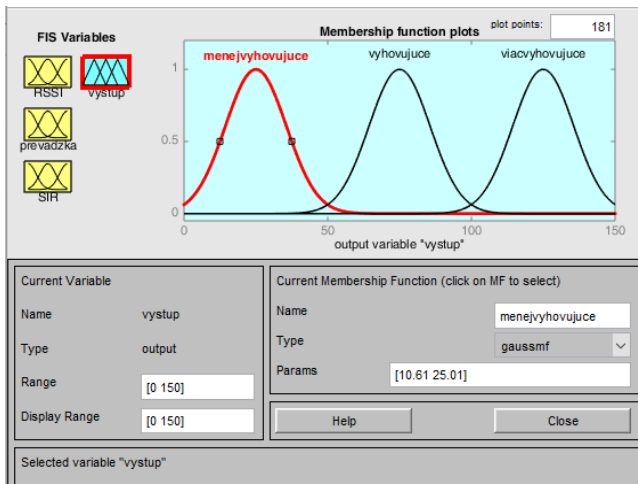


Obr. 21 Grafický výstup funkcií príslušnosti a pravidiel z pohľadu rôznych kombinácií vstupných parametrov

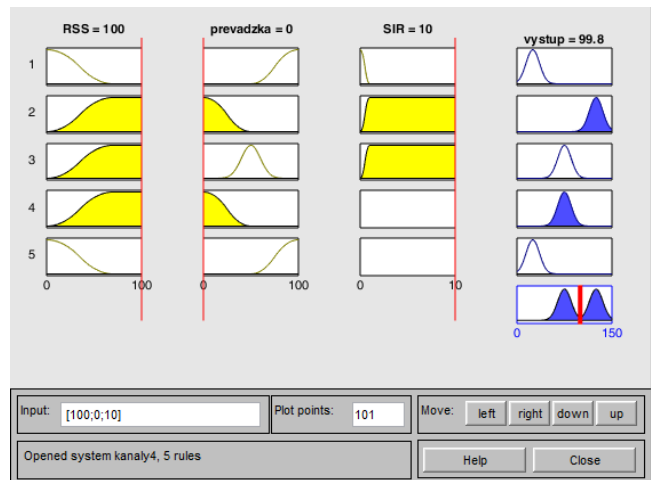


Obr. 22 Rozhodovacie pravidlá FB inteligentného pridelovania spektra vo Fuzzy logic designeri

f) *Definícia logického výstupu:* Výstup procesu inteligentného spracovania vstupných údajov som rozdelil do troch funkcií príslušnosti. Konkrétne išlo o funkciu „menejvyhovujúci“, „vyhovujúci“ a „viacvyhovujúci“, čo je možné vidieť na Obr. 23. Všetky priebehy boli na základe „gaussmf“ funkcie príslušnosti a lišili sa svojimi nastavenými hranicami.



Obr. 23 Definícia funkcií príslušnosti pre výstup návrhu Fuzzy logic designera. Celý proces fungovania mnou navrhnutého logického systému je zobrazený na Obr. 24, kde je možné vidieť maximálne možnú priaznivú alternatívu vstupných parametrov k tomu, aby sa dosiahol najvýhodnejší stav, teda logika to vyhodnotila maximálnou možnou numerickou hodnotou. Podľa toho, aké vstupné parametre prichádzajú do FL, sa posúva červená os po jednotlivých grafoch a na základe súboru piatich pravidiel vzniká výstupná hodnota $[\min FL; \max FL]$, pre náš prípad v numerickom znení $[25,2; 99,8]$. Pre nastavenie a prezentáciu návrhu Fuzzy logiky bol použitý Fuzzy logic designer, v ktorom je možné ručne zadávanie vstupných hodnôt v poličku „Input“. Pre rozsiahlosť nášho návrhu, ktorý uvažuje o autonómnosti celého systému, je nutné využívať týmto



Obr. 24 Priebeh fungovania FL pre zadávané vstupné hodnoty a získaný výstup spôsobom nastavenú Fuzzy logiku a zakomponovať ju do smerovacieho algoritmu.

g) *Popis ohodnotenia kanálov:* V návrhu sa vyšetruje každá existujúca linka medzi dvojicou uzlov (Obr. 26). Keďže vieme, o ktorú dvojicu sa jedná, každý uzol vykoná vnímanie spektra a získanie vstupných parametrov pre logiku autonómne v tvare tabuľky (TABUĽKA 1). Tá obsahuje informáciu o vstupnom parametre a o potenciálnom nastavenom komunikačnom kanále v rozsahu $[1, n]$.

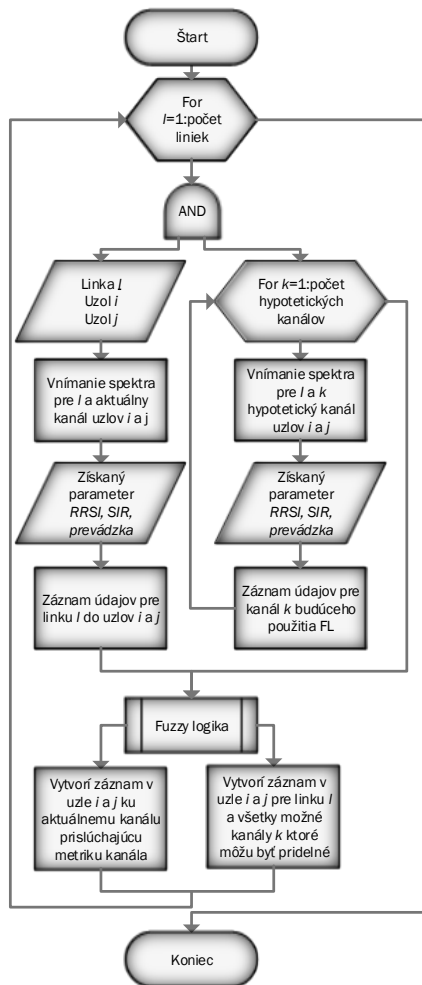


Obr. 25 Algoritmus Fuzzy logiky

TABUĽKA 1 UKLADANIE VNÍMANÝCH PARAMETROV KAŽDÝM UZLOM PRE VŠETKY MOŽNÉ KANÁLY

Vnimané parametre	Kanály			
	Kanál 1	Kanál 2	...	Kanál n
RSSI	68 %	68 %	...	68 %
prevádzka	20 %	20 %	...	20 %
SIR	0,1	0,25	...	1,4

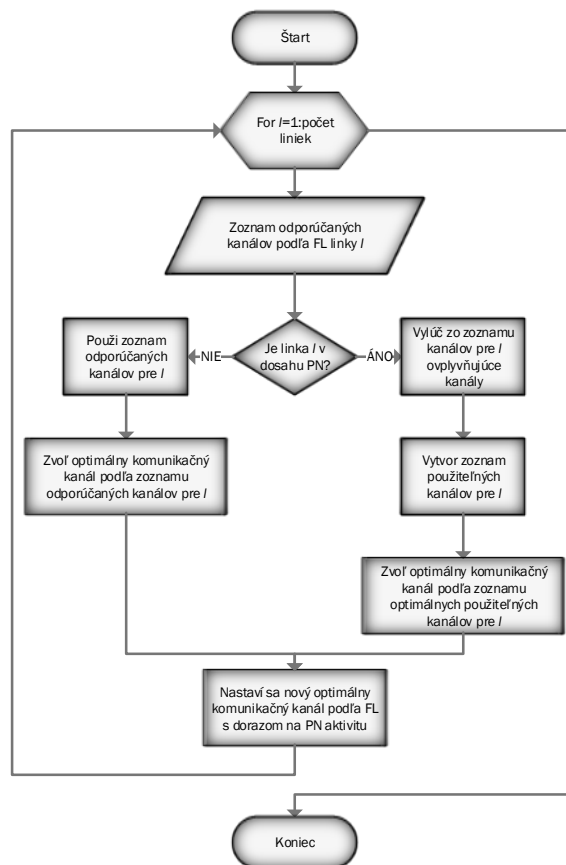
Každý uzol odošle informácie vo formáte [RSS,prevádzka,SIR]_n do FL (Obr. 25) a pre každý hypoteticky prideliteľný kanál n. Vykona sa rozhodovanie a pridelí sa mu numerická hodnota. Keďže najvyššia hodnota z Fuzzy logiky je najlepšia, zoradia sa komunikačné kanály podľa numerických hodnôt. Tiež ich môžeme nazývať aj metriky/kvality daných kanálov, alebo QoS parameter pre kanál. Toto zoradenie vykonajú oba uzly.



Obr. 26 Proces ohodnotenia linky v sieti

h) *Proces pridelenia komunikačného kanálu na základe FL:* Každá linka v sieti prešla procesom jej ohodnotenia na základe kanálov, ktoré mala pridelené. Proces inteligentného ohodnotenia, aktuálneho kanálu a hypotetických kanálov vytvoril zoznam od najviac vyhovujúceho kanálu po najmenej vyhovujúci. Na základe tohto rozhodnutia FL z informácií z vnímania spektra sa dvojica uzol rozhodne pre voľbu pre

nich optimálneho komunikačného kanálu zo stanoveného rozsahu (Obr. 64). Do úvahy sa samozrejme berú aj afektované linky primárnym používateľom. Všetky kanály, ktoré by mohli komunikáciu primárneho používateľa ovplyvňovať, sú z procesu inteligentného pridelovania vynechané a zo zostatkových liniek sa volí optimálny komunikačný kanál. Celá vzniknutá CR-MANET sieť s optimálne nastavenými kanálmi sa skontroluje pomocou inteligentnej metódy a numericky sa vyhodnotia aktuálne pridelené komunikačné kanály.



Obr. 27 Proces pridelovania optimálneho komunikačného kanálu

i) *Ukončenie pridelovania kanálov:* Pre každý uzol a jeho suseda vzniká informácia s pôvodne nastaveným komunikačným kanálom a jeho metriku, ako aj nový pridelený komunikačný kanál s novou metriku. Tieto informácie boli získané pomocou FB vnímania spektra a FB inteligentného pridelenia spektra. Výstupné uložené parametre v jednotlivých zariadeniach sú kľúčovými informáciami pre Funkčný blok smerovania.

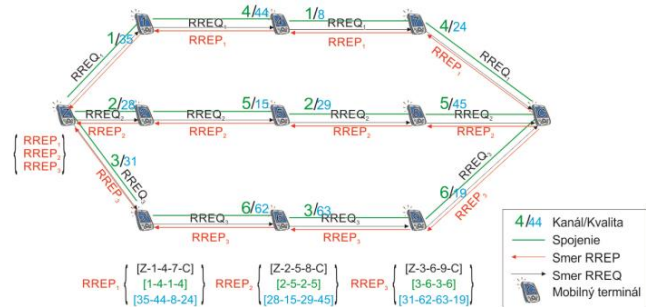
j) *Aktivita PU:* Keďže tento protokol je návrhom pre CR-MANET, berie do úvahy aj aktivitu primárneho používateľa (PU). Ako z podstaty CR-MANET vyplýva, PU pri svojej potrebe komunikovať nesmie a nemôže byť o túto možnosť ukrátený sekundárnym používateľom (SU). Návrh uvažuje s ľubovoľne veľkým spektrom, ktoré je využiteľné pomocou SU aj PU. V rámci neho je možné definovať kanály,

ktoré budú reprezentovať licencované, ale aj nelicencované spektrum. Nelicencované spektrum je v plnej miere využívané SU, no tie za predpokladu neovplyvňovania a neaktívneho stavu PU môžu využívať v plnej miere aj licencované pásmo. Pri pridelovaní spektra je aktivita PU kľúčovou informáciou v rámci návrhu.

6) *FB smerovania*: Funkčný blok smerovania má za úlohu prenos správ medzi zdrojovým a cieľovým uzlom v CR-MANET sieti. Tejto úlohy sa zmočňujú kognitívne smerovacie protokoly vychádzajúce z teoretického rozboru smerovania pre CR-MANET siete. Náš návrh dokáže pracovať s ľubovoľným typom smerovania. Od zvoleného typu smerovania sa líši celkový výzor konceptu celého algoritmu. Niektoré smerovacie protokoly si vymieňajú pravidelne svoje lokálne informácie a tým pádom vzniká ucelená topológia siete v každom zariadení, tzv. proaktívne smerovanie. Iný druh smerovania vykonáva iba nevyhnutné kroky potrebné pre CR-MANET, a to vnímanie a Fuzzy logiku. Tieto informácie ostávajú uložené lokálne a v prípade hľadania sa vysielajú broadcast s požiadavkou nájsť cieľ. Ide o tzv. reaktívne CR-MANET smerovanie. Taktiež je možné použiť aj oportunistický druh smerovania, ktorý využíva informácie z prvých dvoch funkčných blokov. Hybridný druh smerovania, ktorý kombinuje metódy reaktívneho/proaktívneho smerovania s oportunistickým smerovaním, a to založeným na sociálnom správaní, je možné použiť pre tento typ nami navrhovaného algoritmu. Pre návrh FB smerovania vstupujú do FB dva základné parametre z inteligentného pridelovania spektra kanály a kvalita. FB smerovania má výhodu využívať rôzne mechanizmy smerovania, ktoré boli pre tieto účely navrhnuté.

a) *Návrh adaptívneho reaktívneho smerovania v CR-MANET*: Celkový algoritmus adaptívneho smerovania na základe reaktívneho protokolu pre CR-MANET (ARS-CR) využíva základný koncept funkčných blokov s tým, že konkretizuje funkčný blok smerovania. Informácie zo snímania spektra sú ukladané len v každom zariadení. Tieto informácie putujú do FB inteligentnej metódy pridelovania spektra. Tu sa informácie spracujú pre každú existujúcu linku z oboch zainteresovaných zariadení. Výstupom je pridelený komunikačný kanál a metrika. Tieto informácie si ukladá každý z dvojice uzlov, ktorých sa vyšetruje linka týkala. Tieto uložené informácie v zariadeniach sú kľúčové pre FB smerovania. Modifikovaný RREQ (Route Request) paket zaznamenáva okrem informácie, cez ktoré uzly putoval, aj to, aké boli parametre komunikačnej linky v zmysle pridelený komunikačný kanál a kvalita linky (výstupná hodnota z inteligentnej metódy). Po nájdení cieľového uzla je späť vyslaný modifikovaný RREP (Route Reply), ktorý obsahuje všetky zozbierané informácie. Zdrojový uzol sa na základe doručených RREP rozhoduje pre voľbu optimálnej E2E cesty na odoslanie správy. Optimálna cesta je volená na základe najnižšej kvality cesty z jednotlivých kvalít liniek, ktoré FB inteligentného pridelovania vyhodnotil. Každá správa v RREP obsahuje cestu medzi zdrojom a cieľom (čierna šípka), informáciu o komunikačných kanáloch na danej ceste (zelená

šípka) a kvality jednotlivých liniek (modrá šípka). Každá najnižšia hodnota kvality z každého RREP sa porovná v zdroji a vyberá sa tá cesta, ktorá má najvyššiu hodnotu z minimálnych kvalít jednotlivých ciest (Obr. 28).



Obr. 28 Mechanizmus odosielania a prijímania RREQ a RREP pre ARS-CR

b) *Návrh adaptívneho proaktívneho smerovania v CR-MANET*: Pri návrhu funkčného bloku smerovania s využitím proaktívnych techník pre CR-MANET (APS-CR) sa medzi uzlami v sieti neustále šíria informácie o susedných linkách. To má za následok, že každý uzol v sieti vždy pozná celé logické rozmiestnenie uzlov v sieti. Rozhodovania na odoslanie správy sú preto veľmi rýchle. Má to ale za následok aj zvýšenú prevádzku tvorenú periodickými aktualizáciami. Náš celkový algoritmus založený na proaktívnom smerovaní vo funkčných blokoch je rozšírený okrem blokov pre uzly o blok pre sieť nazývaný distribúcia topológie. Tento blok je prepojený s jednotlivými funkčnými blokmi uzla. Do bloku distribúcie parametrov sa symetricky zapisujú informácie pre uzly, ktoré sú vo vzájomnom rádiovom dosahu. Informačný obsah spočíva v zázname o komunikačnom kanále (KY) pre hornú diagonálu a hodnote kvality linky (KvY) s daným komunikačným kanálom pre spodnú diagonálu. Takúto informáciu o spojeniach si vytvára a aktualizuje každý MT (Obr. 71). Na základe týchto údajov sú tvorené cesty medzi Z a C, ak je to možné. Vyberá sa cesta s najkvalitnejšími spojeniami medzi jednotlivými uzlami. Je možné vybrať cestu, ktorá nie je z hľadiska počtu skokov najkratšia, ale je najvhodnejšia, no s väčším počtom skokov.

	IDU1	IDU2	IDU3	IDU4	...	IDUN
IDU1	x	K1	K2	K4	...	K11
IDU2	Kv1	x	K3	K5	...	K12
IDU3	Kv2	Kv4	x	K3	...	K13
IDU4	Kv3	Kv5	Kv6	x	...	K14
...	x	...
IDUN	Kv11	Kv12	Kv13	Kv14	...	x

Obr. 29 Distribuovaná informácia o kvalitách liniek a pridelených komunikačných kanáloch

c) *Návrh oportunistického smerovania v CR-MANET*: Návrh oportunistického smerovania pre kognitívne siete SBOR-CR vychádza z použitia FB pre vnímanie spektra a inteligentného pridelenia spektra. Tieto informácie sa opätovne ukladajú v zariadeniach. Aplikovaním FB smerovania na základe oportunistického smerovacieho

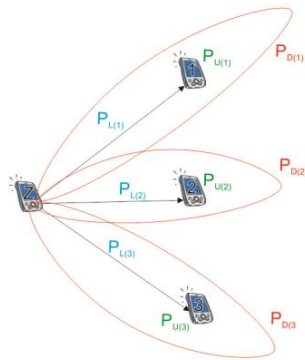
protokolu SBOR vzniká algoritmus, ktorý neberie do úvahy iba informáciu o histórii kontaktov, ale aj parameter komunikačnej linky s dohodnutým komunikačným kanálom. Tieto dva základné rozhodovacie parametre sú pri príležitostnej komunikácii brané do úvahy na voľbu vhodného kandidáta pre odoslanie správy (Obr. 30). Všeobecné vyjadrenie pravdepodobnosti doručenia PD, ktoré zohľadňuje pravdepodobnosť linky aj uzla, je vyjadrené rovnicou (4).

$$P_d = \frac{P_U + P_L}{2} \tag{4}$$

Parameter P_U je získaný zo samotného smerovania SBOR a výpočtu pravdepodobnosti doručenia na základe histórie kontaktov. Parameter P_L je pravdepodobnosť linky a vo všeobecnosti je možné ju vyjadriť v percentuálnom stave podľa rovnice (5). Parameter H danej rovnice je hodnota získaná ako výstup z mnou navrhnutej Fuzzy logiky. Jej numerická hodnota v sebe zahŕňa informáciu o tom, či sa v danej oblasti primárny používateľ nachádza alebo nie. To má na starosti FB inteligentného pridelenia spektra.

$$P_L = \frac{H - \min FL}{\max FL - \min FL} * 100\% \tag{5}$$

Smerovací protokol SBOR-CR má pre účely simulácie vytvorené aj svoje varianty. Tie sa týkajú rozhodovania o výbere susedného uzla, ktorý sa stane novým zdrojom informácie. Základný režim je označovaný ako SBOR-CR_komb, ktorý v sebe kombinuje pravdepodobnosť linky a uzla k nej prislúchajúcemu. Ďalší variant je zameraný iba na pravdepodobnosť doručenia na základe susedného uzla a nesie označenie SBOR-CR_uzol. Posledný variant SBOR-CR protokolu vykonáva rozhodovania o poslaní správy iba na základe pravdepodobnosti linky a pravdepodobnosť uzla do úvahy neberie. Jeho označenie pre budúce účely simulácie je SBOR-CR_linka.



Obr. 30 Model výpočtu pravdepodobnosti kanála a uzla pre SBOR-CR

d) *Návrh hybridného smerovania v CR-MANET:* Návrh hybridného smerovania pre MANET siete bol popísaný pri návrhoch smerovaní pre MANET siete. Jeho rozšírenie je nutné pre aplikáciu v CR-MANET sieťach. Ako bolo uvedené, HSBR pozostáva z dvoch hlavných mechanizmov, mechanizmus hľadania E2E ciest na základe reaktívneho smerovania a D2D odosielania správy na základe pravdepodobnosti doručenia oportunistickým spôsobom. Môj návrh hybridného smerovania pre CR-MANET siete, HSBR-

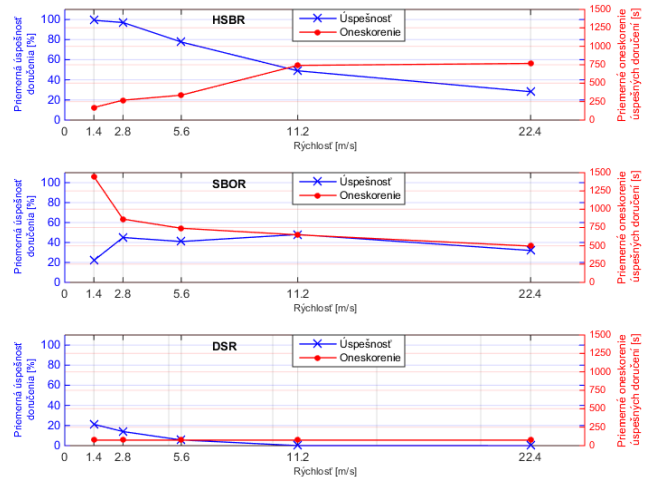
CR spočíva vo využití predstavených mechanizmov kognitívneho reaktívneho smerovania v kombinácii s myšlienkou kognitívneho oportunistického smerovania na základe pravdepodobnosti doručenia. Výpočet kvality každej linky sa vykonáva pomocou FB vnímania spektra a FB inteligentného pridelenia kanálu, ktorý odporučí optimálny kanál a jeho kvalitu medzi dvojicou uzlov. Mechanizmus E2E hľadania cesty tieto informácie berie do úvahy a na základe nich volí optimálnu cestu medzi zdrojom a cieľom. V prípade rozpojenia spojenia sa určuje virtuálny zdroj ako nový zdroj komunikácie. Ten sa použije ako najvzdialenejší uzol z cesty, ktorá avizovala rozpojenie. Ten v prípade neschopnosti vytvoriť optimálne E2E spojenie sa pokúša odoslať správu oportunisticky na základe pravdepodobnosti doručenia a kvality linky podľa vzorca (4). Pre účely budúcich simulácií boli navrhnuté dve verzie hybridného smerovania. Prvá je postavená na proaktívnom hľadaní cesty medzi Z a C. Druhá verzia protokolu je postavená na reaktívnom hľadaní cesty.

V. SIMULÁCIE A VÝSLEDKY

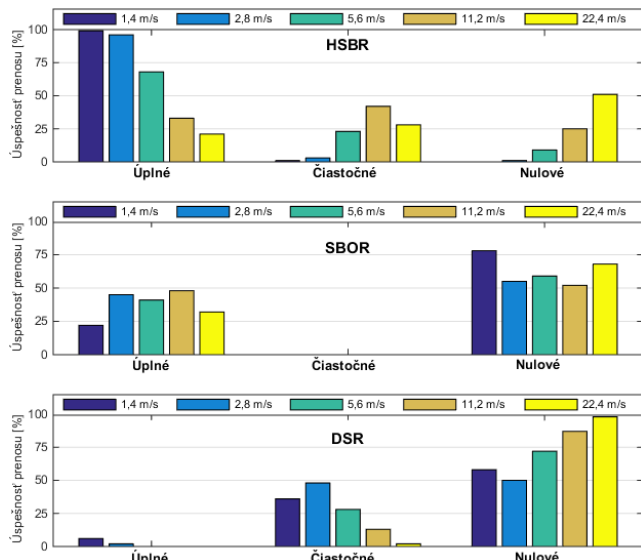
Simulácie boli vykonané pre navrhované smerovania MANET ale aj CR-MANET prostredia. Výsledky zobrazujú a porovnávajú jednotlivé návrhy, alebo ich iba vyhodnocujú.

A. Porovnanie smerovaní MANET/DTN/Hybrid MANET-DTN

Táto simulácia zobrazuje výsledky odosielania správ pomocou troch smerovacích protokolov, ktoré je možné použiť vo viacpreskokovom bezdrôtovom prostredí. Simulácia pozostávala zo 100 mobilných terminálov, ktoré podliehali rôznym rýchlostiam pohybu v závislosti od danej verzie simulácie. Ich pohyb bol definovaný ako náhodný. Pozorovaná bola najmä priemerná úspešnosť doručenia a priemerné trvanie simulácie (Obr. 31) ale aj percentuálny podiel úplných, čiastočných a nulových prenosov (Obr. 32)



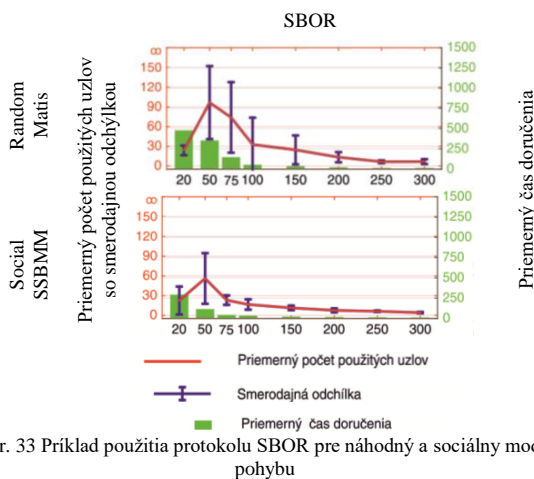
Obr. 31 Priemerná úspešnosť doručenia paketov porovnaná s priemerným oneskorením úspešne ukončených prenosov pre tri smerovacie protokoly a 5 úrovni rýchlosti



Obr. 32 Úspešnosť doručenia troch typov prenosov pre DSR, SBOR a HSBR smerovací protokol

B. Porovnanie sociálneho a náhodného pohybu pomocou protokolovo závislých metód

Pre účely tejto simulácie bol použitý sociálny model pohybu ako aj náhodné modely. Hlavným cieľom bolo poukázať na výhody použitia sociálneho modelu pohybu s protokolmi fungujúcimi na báze sociálnych vzťahov. Detailné výsledky ako aj popisy je možné vidieť v [23], [24].



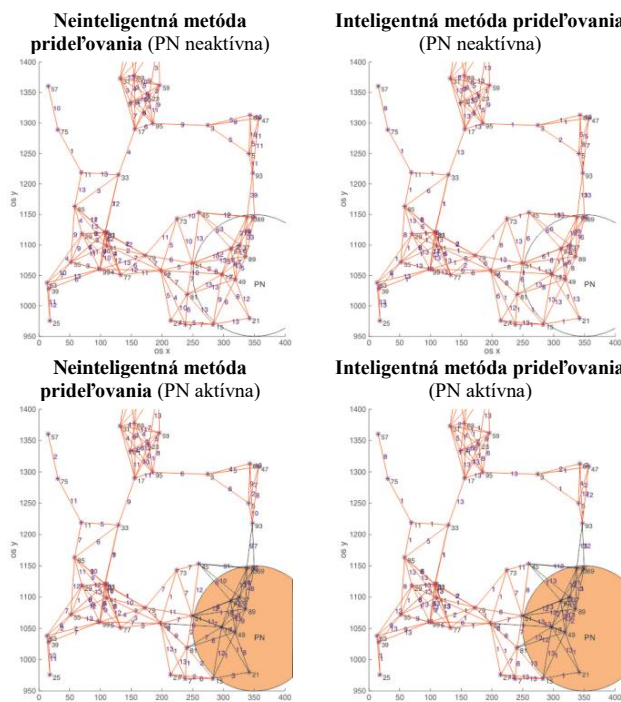
Obr. 33 Příklad použitia protokolu SBOR pre náhodný a sociálny model pohybu

C. Inteligentné a neinteligentné pridelovanie kanálov v SN s a bez aktivity PN

Hlavnými myšlienkami simulácií bolo vytvoriť CR-MANET sieť pozostávajúcu z mobilných terminálov a zistiť ich konektivitu medzi sebou navzájom. Následne boli pridelené komunikačné kanály medzi dvojicami terminálov autonómnym neinteligentným mechanizmom. Zvolené bolo postupné pridelovanie kanálov. Na daný stav siete bol aplikovaný SB vnímania spektra a inteligentného pridelovania kanálov. Fuzzy logika vyhodnotila aktuálny stav kanálov v zmysle kvality liniek a odporúčala zmeny pre každú vyšetrovanú linku. Vo

výsledku je porovnané pridelenie kanálov neinteligentnou a inteligentnou metódou.

V rámci simulácie sa načíta rozmiestnenie uzlov do simulačného priestoru. Načítané uzly sú sekundárnymi uzlami a reprezentujú sekundárnu sieť (SN). Neinteligentná metóda postupného pridelovania kanálov pridelí komunikačné kanály v rozsahu 1-13 v zmysle postupného obsadzovania kanálov od prvého po posledný možný. SB vnímania spektra vyčíslí vzniknutý stav náhodne pridelených komunikačných kanálov. Následne odovzdá relevantné informácie z vnímania spektra (RSSI a SIR) SB inteligentného pridelovania spektra. FL spracuje údaje každej dvojice uzlov, a teda každej komunikačnej linky a navrhne optimálny komunikačný kanál. Keď vznikne odporúčanie medzi všetkými dvojicami uzlov, proces vnímania spektra a ohodnotenia pridelených komunikačných kanálov na základe FL sa zopakuje. Po týchto úkonoch disponujeme informáciou o každej komunikačnej linke pred a po použití inteligentnej metódy v zmysle komunikačného kanálu a kvality danej linky. V prípade aktivity PN, ktorá pre účely našich simulácií má vyhradený komunikačný kanál č. 7, FL má obmedzené možnosti na pridelenie komunikačného kanálu pre afektované linky len z rozsahu kanálov, ktoré nijakým spôsobom nekolidujú s kanálom PN. Vyhodnotené bolo správanie sa siete a najmä kvalita liniek pred a po použití FL ako nástroja na inteligentné a optimálne pridelenie kanálov. Simulácia sa vykonala s aktivitou a bez aktivity PN.



Obr. 34 Pridelované kanály medzi uzlami SN v topológii s pasívnou a aktívnou PN pomocou neinteligentnej a inteligentnej metódy

Výsledky zobrazené na Obr. 34 znázorňujú rozmiestnenie kanálov v časti siete. Numerické hodnoty výsledkov danej simulácie v TABUĽKA 3 ukazujú na početnosti a priemerné kvality pridelených kanálov inteligentnou a neinteligentnou metódou.

TABUĽKA 2 NUMERICKÉ HODNOTY KVALÍT KANÁLOV A SIETE PRE PN NEAKTÍVNU A AKTÍVNU

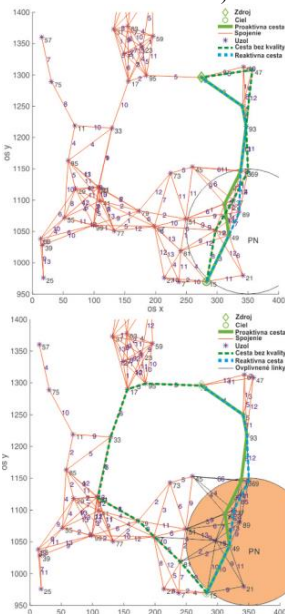
Neinteligentná metóda (PN neaktívna)				Inteligentná metóda (PN neaktívna)			
Kanál	Početnosť	Ø Kvalita/kanál	Ø Kvalita	Kanál	Početnosť	Ø Kvalita/kanál	Ø Kvalita
1	17	54,9574	46,8717	1	66	48,6752	56,6767
2	19	45,1731		2	8	48,9990	
3	15	44,3114		3	5	72,6250	
4	13	42,7024		4	2	70,4036	
5	25	48,2865		5	8	58,0675	
6	14	48,6657		6	27	43,4116	
7	13	42,7561		7	5	58,9755	
8	12	46,5066		8	30	49,8240	
9	24	46,0710		9	4	49,2776	
10	22	49,4152		10	3	70,3610	
11	18	46,0255		11	5	45,4255	
12	14	46,7459		12	6	70,4101	
13	21	47,7151		13	58	50,3410	

Neinteligentná metóda (PU aktívna)				Inteligentná metóda (PU aktívna)			
Kanál	Početnosť	Ø Kvalita/kanál	Ø Kvalita	Kanál	Početnosť	Ø Kvalita/kanál	Ø Kvalita
1	24	46,6279	46,7224	1	63	50,7260	55,3657
2	19	45,0003		2	18	43,0655	
3	13	51,5341		3	1	34,2918	
4	17	50,5718		4	2	86,1974	
5	17	44,6437		5	10	46,8193	
6	16	42,1274		6	18	48,6939	
7	25	44,3930		7	10	63,5401	
8	13	44,7621		8	19	48,9133	
9	18	45,8518		9	7	49,2864	
10	10	44,5603		10	4	76,3122	
11	16	46,6824		11	5	73,9966	
12	20	47,0846		12	10	43,8809	
13	19	53,5517		13	60	48,0307	

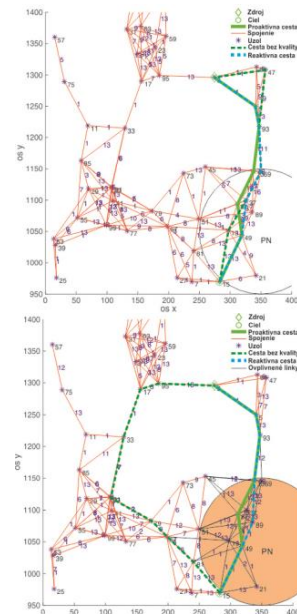
D. Nájdanie cesty v inteligentnom a neinteligentnom prostredí SN s a bez aktivity PN

Simulácie tohto typu nám ukázali, aké cesty sa dajú najst' pomocou reaktívnych a proaktívnych metód v CR-MANET sieti a aká je ich optimálnosť pri použití neinteligentných a inteligentných metód pridelenia kanálov z rozmedzia 1-13. Porovnanie nám ukazuje aj hraničný prípad použitia jedného komunikačného kanálu pre SN a PN. Simulácie počítali aj s prípadom aktivity PN.

Reaktívna/Proaktívna/Čistá cesta v neinteligentnom prostredí (PN neaktívna/aktívna)



Reaktívna/Proaktívna/Čistá cesta v inteligentnom prostredí (PN neaktívna/aktívna)



Obr. 35 Nájdne cesty v CR-MANET prostredí

TABUĽKA 3 NUMERICKÉ HODNOTY NÁJDENÝCH CIEST PRE PN NEAKTÍVNU A AKTÍVNU

		Neinteligentné prostredie (PN neaktívna)	Inteligentné prostredie (PN neaktívna)
Optimálna proaktívna cesta	Uzly	[15 49 87 13 93 5 3]	[15 49 87 13 93 5 3]
	Kanály	[3 13 2 13 6 9]	[13 6 1 1 13 1]
	Kvality	[35,21 25,50 48,20 43,19 59,76 36,92]	[35,62 25,50 49,07 42,89 71,75 43,03]
	Ø Kvalita	41,6324	44,6431
	MIN Kvalita	25,5014	25,5014
Optimálna reaktívna cesta	Uzly	[15 49 89 13 93 5 3]	[15 49 37 69 93 5 3]
	Kanály	[3 7 12 13 6 9]	[13 9 7 1 13 1]
	Kvality	[35,21 28,18 26,45 43,19 59,76 36,92]	[35,62 27,00 45,85 36,88 71,75 43,03]
	Ø Kvalita	38,2841	43,3559
	MIN Kvalita	26,4518	27,0025
Cesta bez kvality	Uzly	[15 19 37 69 93 47 3]	[15 19 37 69 93 47 3]

		Neinteligentné prostredie (PN aktívna)	Inteligentné prostredie (PN aktívna)
Optimálna proaktívna cesta	Uzly	[15 49 89 13 93 5 3]	[15 49 87 13 93 5 3]
	Kanály	[10 4 3 8 11 4]	[1 1 1 1 13 1]
	Kvality	[35,23 25,50 48,11 42,32 60,85 37,96]	[35,51 25,50 49,62 43,12 69,60 45,15]
	Ø Kvalita	41,6634	44,7497
	MIN Kvalita	25,5006	25,5014
Optimálna reaktívna cesta	Uzly	[15 49 37 69 93 5 3]	[15 49 89 13 93 5 3]
	Kanály	[10 13 11 12 11 4]	[1 1 1 1 13 1]
	Kvality	[35,23 29,26 46,41 37,23 60,85 37,96]	[35,51 27,61 27,15 43,12 69,60 45,15]
	Ø Kvalita	41,1588	41,3561
	MIN Kvalita	29,2628	27,1508
Cesta bez kvality	Uzly	[15 81 67 79 91 33 17 95 3]	[15 81 67 79 91 33 17 95 3]

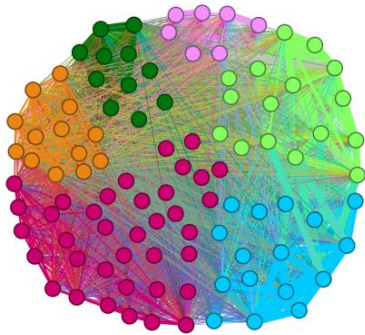
E. Odosielanie správy v inteligentnom prostredí pomocou navrhnutých CR-MANET smerovacích algoritmov

Obsahom simulácií tohto typu bolo odosielanie správy zo zdrojového do cieľového uzla. Boli pozorované zmeny počas odosielania pomocou smerovacích techník na základe predstavených návrhov. Jednotlivé smerovacie návrhy boli vyhodnotené a na záver porovnané medzi sebou navzájom. Pozorovania tohto typu simulácií boli zamerané v prvom rade na úspešné doručenie celej správy do cieľa. Pozorovaná bola úspešnosť doručenia, čas, za ktorý sa správa do cieľa dostala pomocou rôznych CR-MANET smerovacích algoritmov, aká bola efektívnosť volených ciest, výberu uzlov a podobne. Použité boli 4 smerovacie metódy a ich modifikácie pre CR-MANET, ktoré boli popísané ako návrhy v tomto článku. Simulácie slúžia na ukázanie efektivity jednotlivých návrhov, ako sa vysporiadali s použitým sociálnym pohybom a inteligentným pridelením komunikačných kanálov s a bez aktivity PN.

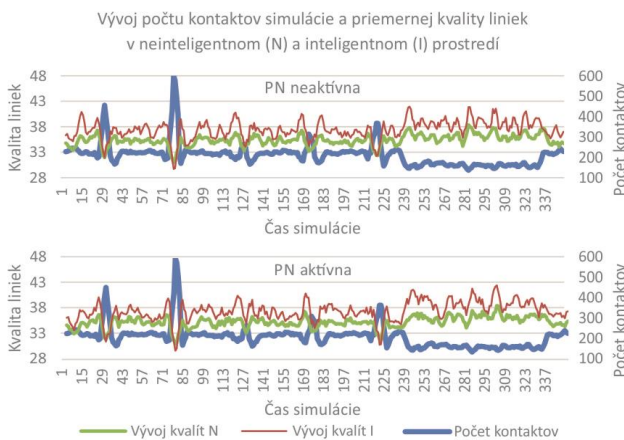
Požité smerovacie protokoly boli ARS-CR, APS-CR, SBOR-CR, HSBR-CR a ich predstavené variácie. Správa sa odosiela v sieti medzi uzlami 15 a 3. veľkosť správy bola 50 paketov.

Model pohybu a pridelenia komunikačných kanálov: To, že ide o pohyb sociálny, dokazuje výskum detailne popísaný v [23], [24]. Obr. 36 reflektuje sociálny pohyb študentov, ich vzájomné väzby a prislusnosť do istých sociálnych skupín. Farebné zhluky uzlov reprezentujú jednotlivé sociálne skupiny a hrúbka čiar medzi jednotlivými uzlami vyjadruje silu ich sociálnych väzieb. Pohyb mobilných terminálov v CR-MANET sieti je úzko spätý s vytváraním nových mobilných spojení, so zánikom existujúcich pri strate vysielacieho dosahu, ale aj autonómnym pridelovaním komunikačných kanálov medzi MT. Pre použitý sociálny model pohybu sa tak dialo v dvoch režimoch. Prvý využíval neinteligentnú metódu

pridelovania komunikačných kanálov autonómne na každom uzle, ako bolo opísané. Druhý mechanizmus pridelovania komunikačných kanálov využíval informácie z vnímania spektra a autonómneho rozhodovania sa každého MT na optimálne obsadzovanie komunikačných kanálov s dôrazom na aktivitu PN. Obr. 37 znázorňuje priebeh celej simulácie, 350 časových okamihov a počet kontaktov medzi uzlami. Zároveň je na grafe vyobrazený priemerný vývoj kvality liniek celej siete s použitím neinteligentnej metódy a inteligentnej metódy pridelovania komunikačných kanálov. Dané vyhodnotenie je vytvorené pre prípad, kedy PN bola po dobu celého svojho pôsobenia neaktívna, ale aj aktívna. Je možné pozorovať pre oba prípady aktivity a pasivity PN, že inteligentná metóda pridelovania komunikačných kanálov dosiahla zvýšenie kvality daných kanálov oproti metóde neinteligentnej. Z pozorovania početnosti kanálov v sieti je taktiež možné vidieť, že pre prípady, kedy sa MT zoskupili, vzniklo podstatne viac komunikačných kanálov medzi nimi. To malo za následok pokles kvality kanálov z dôvodu zvýšenia vzájomného rušenia.



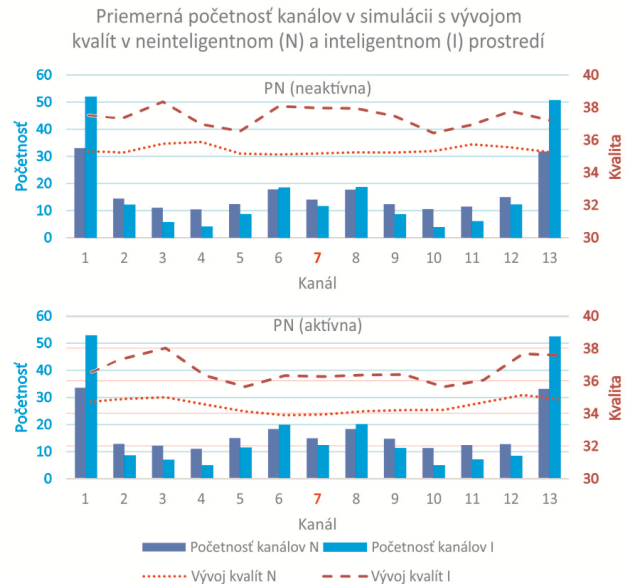
Obr. 36 Zobrazenie SSBMM z pohľadu vytvorených sociálnych skupín a sily sociálnych väzieb medzi uzlami



Obr. 37 Vývoj početnosti kontaktov a kvalít liniek v sieti s neinteligentným a inteligentným pridelovaním kanálov

Pri detailnej analýze celého pohybu a spôsobu obsadzovania komunikačných kanálov neinteligentnou a inteligentnou metódou je na Obr. 38 možné vidieť priemernú početnosť obsadenia jednotlivých komunikačných kanálov pre prípad pasivity a aktivity PN, rovnako aj ich vývoje kvalít. Pre prípad pasivity PN je možné pozorovať zvýšenie priemerného

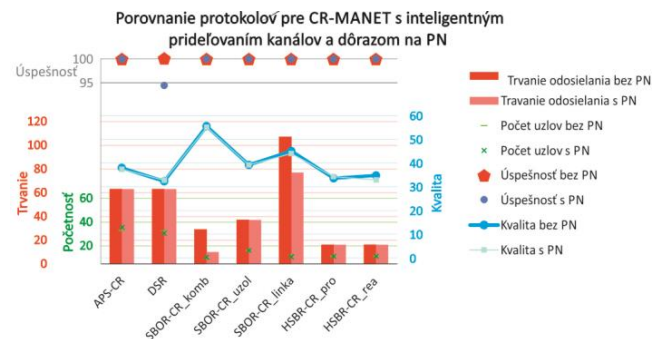
počtu kanálov pridelovaných inteligentnou metódou, ktoré medzi sebou najmenej kolidujú a pokles priemernej obsadenosti kanálov 2-5, 9-12 oproti neinteligentnej metóde. Niečo obdobné je možné pozorovať aj pre prípad, kedy je PN v aktívnom stave. S tým rozdielom, že vývoj priemerných kvalít v celej simulácii poklesol oproti prípadu, kedy PN bola pasívna. No aj tak je pozorovateľný značný rozdiel priemerných kvalít pridelovaných komunikačných kanálov medzi neinteligentnou a inteligentnou metódou autonómneho pridelovania komunikačných kanálov.



Obr. 38 Priemerná početnosť kanálov s vývojom ich kvalít pre simuláciu inteligentného a neinteligentného prostredia

F. Porovnanie APS, SBOR-CR a HSBR-CR smerovacích techník v inteligentnom sociálnom prostredí

V porovnaní jednotlivých smerovacích protokoloch pre CR-MANET prostredie s inteligentným autonómnym rozdelením komunikačných kanálov boli použité APS-CR, DSR, SBOR-CR so svojimi modifikáciami, HSBR-CR so svojimi modifikáciami.



Obr. 39 Porovnanie navrhovaných smerovacích protokolov pre CR-MANET v zmysle úspešnosti doručenia, počtu použitých uzlov na prenos, trvania prenosu ale aj kvality uskutočnených prenosov

Počas porovnávanía odosielania správy v CR-MANET prostredí boli pozorované a porovnávané úspešnosti doručenia

správy, časy, za ktoré boli dané správy doručené, počet zainteresovaných uzlov do odosielania správy, ako aj priemerné kvality ciest liniek.

Výsledkom porovnania všetkých smerovacích protokolov by mal byť záver, ktorý protokol je najlepší pre odoslanie správy medzi uzlami 15 (Z) a 3 (C). Presnejšie by bolo zhodnotiť, ktorý protokol je optimálny a z akého pohľadu. Či chceme dosiahnuť najnižší počet použitých uzlov na komunikáciu, alebo najkratší čas doručenia. Nezanedbateľným parametrom je aj priemerná kvalita použitých spojení medzi uzlami v sieti.

Z pohľadu času doručenia najlepšie výsledky dosiahli SBOR-CR_komb a oba varianty HSBR-CR. Ak ich porovnáme z pohľadu priemernej kvality použitých spojení, HSBR-CR je na tom podstatne horšie. Lepšie výsledky z pohľadu kvality oproti HSBR-CR dosiahli varianty SBOR-CR_linka aj SBOR-CR_uzol, APS-CR, ale za cenu značného nárastu oneskorenia.

VI. ZHODNOTENIE A ZÁVER

Práca je zameraná na bezdrôtové viacpreskokové siete a najmä na smerovacie protokoly, ktoré v nich dokážu zabezpečovať prenos informácií. V práci sú predstavené návrhy smerovacích protokolov s a bez využitia kognitívneho rádia. Taktiež sú tieto návrhy odsimulované v prostredí Matlab. Pre účely simulácie a ukázanie funkcionality smerovacích protokolov, ktoré fungujú na základe sociálnych vzťahov, bol predstavený a používaný sociálny model pohybu. Ako inteligentná metóda pre autonómne pridelovanie komunikačných kanálov pre popisované návrhy bola použitá Fuzzy logika. Tento článok zároveň detailne popisuje jej funkcionality a prepojenie s návrhmi smerovania. Z výsledkov je možné skonštatovať, že použitie sociálneho modelu pohybu má zmysle pre protokoly, ktoré pracujú so sociálnymi informáciami. Taktiež je výhodné používať inteligentnú metódu na pridelovanie frekvenčného spektra na základe vnímania svojho okolia každým uzlom v CR-MANET sieti. Navrhované protokoly preukázali svoju schopnosť doručovať správy medzi Z a C pre rôzne modely pohybov ale aj rýchlosti pohybu mobilných terminálov. Rozšírením práce o ďalšie sociálne modely pohybu a nové návrhy inteligentoch mechanizmov na pridelovanie frekvenčného spektra napríklad na základe teórie hier, či genetických algoritmov by mohlo vzniknúť zaujímavé porovnanie a vyhodnotenie návrhov.

ACKNOWLEDGMENT

This work was performed in the framework of research project KEGA 046TUKE-4/2018 and VEGA 1/0492/18, funded by the Ministry of Education of Slovak Republic and COST Action CA15127 ("Resilient communication services protecting end-user applications from disaster-based failures – RECODIS") supported by COST (European Cooperation in Science and Technology).

REFERENCES

- [1] V.C. Patil, Overview of mobile ad hoc networks [online]. 2012. Dostupné na internete: http://ietd.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/4106/11/11_chapter%203.pdf

- [2] M. Dipobagio, An Overview on Ad Hoc Networks. Institute of Computer Science (ICS), Freie Universität, Berlin. 2009
- [3] D. Johnson: The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad-hoc Networks for IPv4, Rice University, 2007
- [4] A. Boukerche, Begumhan Turgut, Nevin Aydin, Mohammad Z. Ahmad, Ladislau Boloni a Damla Turgut: Routing protocols in ad hoc networks, 2013
- [5] N. Beijar. Zone Routing Protocol. University of Technology. Networking Laboratory. Helsinki. Finland. 2001.
- [6] V. Athanasios, I. Woungang, S. K. Dhurandher, and A. Anpalagan.: Routing in opportunistic networks. New York: Springer, 2013.
- [7] K. Fall. "A delay-tolerant network architecture for challenged internets." Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. ACM, 2003.
- [8] L. Pajevic: "Opportunistic Networking: Mobility Modeling and Content Distribution." (2013).
- [9] Ch. Raffelsberger and H. Hellwagner. "Overview of Hybrid MANET-DTN Networking and its Potential for Emergency Response Operations." Electronic Communications of the EASST 56 (2013).
- [10] G. Song, et al., eds. Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks: 13th International Conference, ADHOC-NOW 2014, Benidorm, Spain, June 22-27, 2014 Proceedings. Vol. 8487. Springer, 2014.
- [11] Ch. Raffelsberger, Christian and H. Hellwagner. "Combined mobile Ad-Hoc and delay/disruption-tolerant routing." Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks. Springer International Publishing, 2014. 1-14.
- [12] H. Nishiyama, M. Ito, and N. Kato. "Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications." Communications Magazine, IEEE 52.4 (2014): 56-65.
- [13] Ch. Kretschmer, S. Rührup, and Ch. Schindelbauer. "Dt-dymo: delay-tolerant dynamic manet on-demand routing." Distributed Computing Systems Workshops, 2009. ICDCS Workshops' 09. 29th IEEE International Conference on. IEEE, 2009.
- [14] J Whitbeck and V. Conan. "HYMAD: Hybrid DTN-MANET routing for dense and highly dynamic wireless networks." Computer Communications 33.13 (2010): 1483-1492.
- [15] L. Delosieres and S. Nadjim-Tehrani. "Batman store-and-forward: the best of the two worlds." Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012.
- [16] Ch. Ling-Jyh, et al. "A hybrid routing approach for opportunistic networks." Proceedings of the 2006 SIGCOMM workshop on Challenged networks. ACM, 2006.
- [17] J. Boice, J. J. Garcia-Luna-Aceves, and K. Obraczka. "On-demand routing in disrupted environments." NETWORKING 2007. Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet. Springer Berlin Heidelberg, 2007. 155-166. ISBN 978-3-540-72606-7.
- [18] S. Nejatian, S. Kamilah, L. Nurul Muazzah Abdul and M. Wajahat: Modelling of routing and spectrum handoff in CR-MANETs. In EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2014, p.144, doi 10.1186/1687-1499-2014-144 – issn 1687-1499.
- [19] K. Singh and S. Moh. (2016). Routing protocols in cognitive radio ad hoc networks: A comprehensive review. Journal of Network and Computer Applications, 72, 28-37.
- [20] Y. F. Richard and H. Tang. Cognitive radio mobile ad hoc networks. New York: Springer, 2011.
- [21] M. Matis ... [et al.]: An Enhanced Hybrid Social Based Routing Algorithm for MANET-DTN - 2016. In: Mobile Information Systems. Vol. 2016, article ID 4803242 (2016), p. 1-12. - ISSN 1574-017X
- [22] M. Matis, Hybrid MANET-DTN routing protocols [M.S. thesis], TU-FEI, Košice, Slovakia, 2014 (Slovak).
- [23] D. Hrabčák, M. Matis ... [et al.]: Students Social Based Mobility Model for MANET-DTN Networks - 2017. In: Mobile Information Systems. Vol. 2017, doi.org/10.1155/2017/2714595 (2017), p. 1-13. - ISSN 1574-017X
- [24] D. Hrabčák, M. Matis, Doboš L, J. Papaj: Tools for evaluation of social relations in mobility models. In Telecommunication Systems, doi.org/10.1007/s11235-017-0403-3 - ISSN 1572-9451

Systematický vývoj Edge-enabled rámca pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti

Martin Miškuf

Department of Cybernetics and Artificial Intelligence
Technical university of Kosice
Kosice, Slovakia
martin.miskuf@tuke.sk

Iveta Zolotová

Department of Cybernetics and Artificial Intelligence
Technical university of Kosice
Kosice, Slovakia
iveta.zolotova@tuke.sk

Abstract—Súčasný vývoj populácie predpovedá, že v najbližších rokoch vznikne práve v oblasti zdravotníctva mnoho pracovných miest. Nová generácia trébovaných špecialistov, spolu s modernými technológiami, sa bude musieť o týchto starých a chronicky chorých ľuďoch postarať, a zaručiť im požadovanú kvalitu zdravotnej starostlivosti. Tento článok popisuje systematický návrh Home-centered framework (rámca) pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti založeným na najnovších princípoch Edge a Cognitive computing. Údaje o zdravotnej starostlivosti sú v takýchto IoT systémoch prostredníctvom inteligentných adaptívnych zariadení zbierané, predspracované pomocou IoT brány (Health IoT Gateway), a následne odosielané do našej Cognitive HealthCare Platformy CHECKuP. Tento rámec bol otestovaný a vyhodnotený v podmienkach trvalej zdravotnej starostlivosti v domácom prostredí.

Abstract— The current population trend implies that many new jobs will be created in health care in the coming years. An upcoming generation of trained specialists, along with modern technologies, will take care of these old and chronically ill people. New caregivers will provide the highest quality of healthcare. This paper defines the systematic development of the Edge-enabled Framework for Monitoring Quality of HealthCare. This framework applies the latest principles of Edge and Cognitive computing. In Edge-enabled systems, data is acquired through intelligent adaptive IoT devices then pre-processed using the Edge-enabled IoT Gateway, and send to our Cognitive HealthCare Platform CHECKuP. This framework has been tested and evaluated in real conditions of nurse-led home-centered care.

Health IIoT; Edge-enabled; Cognitive computing; Monitoring; Quality of Healthcare

I. ÚVOD

Žijeme v dobe pripájania „inteligentných“ zariadení na internet. IoT (Internet of Things) zariadenia by mali svoje dáta odosielať do vzdialených dátových centier v ktorých by dáta mali byť analyzované [1]. IoT technológie však je možné implementovať takmer vo všetkých oblastiach našich životov. Priemysel nie je výnimkou. Takto vznikol nový rozširujúci koncept Industrial Internet of Things (IIoT) [2]. Vďaka tomu sme svedkami veľkých zmien spojených so 4. priemyselnou

revolúciou. Priemyselná výroba vstupuje do prelomovej etapy – po ére pary, elektriny a počítačov prichádza ďalší technologický skok v podobe Industry 4.0 [2][3]. Výsledkom bude „Smart Factory“, v ktorej inteligentné fyzické zariadenia Cyber-Physical Systemes (CPS) [4][5], so zabudovanými IoT komponentami budú vzájomne prepojené. CPS v budúcnosti prevezmú manuálne a obslužné činnosti a budú sami organizovať efektívny chod výroby [6][7].

II. INTELIGENCIA NA HRANE SIETE

Výpočtová kapacita koncových zariadení rastie a vďaka trendom Fog / Edge computing sa posunula inteligencia bližšie ku systémom až na hranu siete. Termín Edge computing [8] je definovaný ako výpočty na koncových zariadeniach siete, zatiaľ čo pojem Fog computing [9] ako dátové centra bližšie k systémom. Moderné IoT riešenia môžu byť realizované tromi hlavnými spôsobmi [10][11], podľa distribúcie inteligencie v systéme - Cloud, Fog-enabled a Edge-enabled.

- Cloud-enabled IoT riešenia – Zariadenia sa pripájajú na cloud zvyčajne prostredníctvom gateway, keďže používajú viacero IoT sietí, alebo priamo. Tam sa realizujú všetky výpočty
- Fog-enabled IoT riešenia - Zariadenia sa pripájajú na lokálny server umiestnený bližšie k systému, aby sa v čo najväčšej miere znížila doba odozvy medzi IoT systémom a IoT platformou. Takýto typ architektúry je sa aplikuje pre väčšie IoT riešenia (nemocnice, výrobný podnik, ...).
- Edge-enabled IoT riešenia - inteligencia distribuuje až na samotné koncové zariadenia siete („Edge of the network“). O výpočty a komunikáciu medzi zariadeniami a cloudom sa stará IoT Gateway, Takýto typ architektúry je vhodný pre menšie IoT riešenia (smart home, domáca zdravotná starostlivosť, ...)

Článok sa zaoberá návrhom Edge-enabled architektúry pre nasadenie v IoT ekosystéme [31]. Počas štúdia sa nám s týmito myšlienkami podarilo získať viacero projektov a vyhrať niekoľko StartUpových súťaží. Koncept Edge computingu by mal priniesť časť inteligencie z Cloudu na hranu siete. To by malo priniesť hneď niekoľko výhod. Medzi tie najhlavnejšie môžeme zaradiť: podpora a štandardizácia komunikácie

viacerých typov zariadení, manažovanie pripojených zariadení, predspracovanie dát pri ich zdroji, prenos časti riadenia bližšie k systémom, menšie vyťaženie sietí, nižšie náklady za cloudové služby. Článok sme rozdelili nasledovne:

- Úvod a prehľad problematiky
- Koncept Edge-enabled rámca
- Prípadová štúdia CHECKuP
- Vyhodnotenie Edge-enabled rámca
- Zhrnutie

III. PREHEAD PROBLEMATIKY

Tieto myšlienky sa však nevzťahujú len na výrobný priemysel. Zdravotníctvo je jednou z najperspektívnejších oblastí priemyslu pre aplikáciu nových technológií. V nasledujúcich rokoch práve zdravotnícka oblasť Healthcare IIoT (Health IIoT) bude jedným z kľúčových hráčov IIoT [12][13]. Health IIoT je definovaná ako kombinácia komunikačných technológií, vecí (zariadení senzorov a aktuátorov), prepojených aplikácií a ľudí, ktorí by spolu fungovali ako jeden inteligentný systém na sledovanie a uchovávanie informácií o prebiehajúcej zdravotnej starostlivosti [12]. Tento článok sa zaoberá návrhom rámca pre použitie v HealthIIoT systéme so zariadeniami poskytujúcimi analýzy na hrane siete.

Navrhaný rámec by sa dal aplikovať takmer vo všetkých odvetviach. Po analýze sme sa rozhodli pre oblasť monitorovania kvality zdravotnej starostlivosti v domácich podmienkach. Už v súčasnosti má HealthIIoT veľký vplyv na mnohé procesy v zdravotníctve. Ako výsledok si môžeme všimnúť narastajúce množstvá rôznych aplikácií ako napríklad: monitorovanie krvného cukru, krvného tlaku, charakteristík srdca a podobne. Tieto aplikácie by mali umožniť lepšie pochopenie zdravotného stavu pacienta. V súčasnosti však oblasť HealthIIoT je ešte stále v začiatkových fázach vzhľadom na dizajn, vývoj a nasadzovanie IoT aplikácií.

A. Spoločenské problémy v oblasti Health IIoT

Populácie vyspelých krajín starnú. V nasledujúcich rokoch vznikne mnoho povolání, ktoré sa budú práve o týchto ľudí musieť starať. Okrem toho, sa súčasný systém zdravotnej starostlivosti postupne mení. Podľa predpovedí sa súčasný Hospital-centered systém zdravotnej starostlivosti postupne zmení najskôr do Hospital-Home-balanced po roku 2020 a potom na Home-centered (alebo Patient-centered) po roku 2030 [13]. Autori [8] navrhli, ako by v budúcnosti mohla vyzeráť moderná zdravotná starostlivosť (Cybercare), za použitia moderných technológií ako tele medicína, robotika, IoT.

Na základe zhrnutých faktov môžeme definovať technologické a spoločenské problémy, na ktoré sme sa v rámci tohto článku zamerali.

- V budúcnosti sa posunie vekové zloženie populácie - zvýši sa množstvo starých a chronicky chorých ľudí; zdravotný systém sa zmení na Home-centered.

- Vznikne mnoho s tým spojených pracovných miest. Pri svojej práci budú používať nové technológie, aby sa dodržala vysoká kvalita zdravotnej starostlivosti.

B. Vedecké problémy v oblasti Health IIoT

Oblasť zdravotníctva bola vždy veľmi zaujímavou pre aplikovaný výskum. Záujem o oblasť Health IIoT na Scholar Google v posledných rokoch rastie. Medziročne vykazuje vyšší nárast ako IoT kategória. My sme podrobnou analýzou literatúry nakoniec vybrali 11 vedeckých prác zameriavajúcich sa na oblasť Health IIoT. Porovnali sme ich na základe spôsobu realizácie riešení.

TABLE I. POROVNANIE ZAMERANIA PODOBNÝCH VEDECKÝCH PRÁC

Paper	Year	Cloud-enabled	Fog-enabled	Edge-enabled	Cognitive Services	Quality of Healthcare
[12]	2012	☑				
[15]	2013		☑			
[16]	2014	☑				
[17]	2015		☑			
[6]	2016	☑				
[18]	2016		☑			
[19]	2017	☑				
[20]	2017	☑				
[21]	2017		☑			
[22]	2018		☑			
[23]	2018		☑			
Our solution	Started 2014			☑	☑	☑

Vybrané sme riešenia kategorizovali do 3 kategórií: Cloud, Fog-enabled a Edge-enabled riešení. Množstvo vedeckých prác sa používa prototypové IoT vývojové dosky ako RaspberryPI a Arduino, nepoužívajú vlastné koncové zariadenia napájané len pomocou batérii, alebo používajú lokálny server, ktorý v rámci riešenia pokladajú za Cloud. Pri prototypoch sa používa architektúra, pri ktorej sa IoT zariadenia ako napr. wearables, pripájajú na smartfóny, alebo lokálny gateway. Ten často krát dáta len preposiela. Nakoniec vedci prezentujú IoT Platformy najčastejšie riešené vo forme webovej aplikácie.

Práca [31], na základoch ktorej je založený tento vedecký článok, rieši aplikačný výskum. Prezentujeme systematicky vývoj Edge-enabled IoT rámca pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti. Ciele sme rozdelili na výskumné týkajúce sa hlavne návrhu rámca pre aplikáciu ML metód pre analýzu dát v Cloud - Edge prostredí. Technologické ciele sa týkali výberu platformy a realizácie navrhnutého riešenia.

Hlavné ciele tohto vedeckého článku:

- Popísať systematický návrh rámca pre aplikáciu Edge a Cognitive computing princípov v oblasti Health IIoT.
- Popísať aplikovanie Edge-enabled rámca v oblasti monitorovania kvality zdravotnej starostlivosti.

IV. KONCEPT EDGE-ENABLED RÁMCA

Hlavná výhoda Edge-enabled architektúry spočíva v predspracovaní dát na hranici siete. Tým sa zmenší počet odosielaných dát, čím sa uľaví prenosový kanál a šetrí sa náklady za cloudové služby. Na nasledujúcom obrázku je náš Home-centered koncept Health IIoT [12] rozšírený práve o spomínané princípy [7].

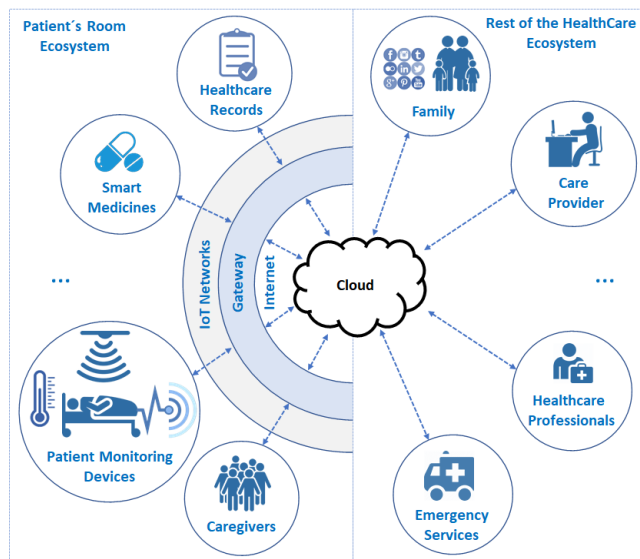


Fig. 1. Nami navrhnutý koncept Home-centered Edge-enabled Health IIoT

Náš koncept spája Home-centered healthcare spolu s Edge computingom. Jednotlivé časti systému sú prepájané buď na priamo, alebo prostredníctvom Gateway – predpríprava pre Edge-enabled Health IIoT.

Patient's Room - Hlavnou časťou je pacientova izba. IoT zariadenia a ľudia v tejto izbe sa pripájajú prostredníctvom Gateway na Cloud, kde sa nachádza Health IIoT platforma. Použitie gateway v pacientovej izbe je potrebné kvôli viacerým typom sietí používaných IoT zariadeniami. Napríklad wearables nosené ošetrovateľmi (kategória Caregivers) sa môžu pripájať cez rozhranie Bluetooth na gateway, odkiaľ sú agregácie dát odosielané do IoT platformy na cloude. Ošetrovatelia sú zdravotnícky personál, ktorý prešiel základným tréningom. Ich úlohou je postarať sa o pacienta počas dňa. S monitorovaním pacienta im pomáhajú zariadenia z kategórie Patient Monitoring Devices. V tej sa nachádzajú zariadenia prostredníctvom ktorých sú snímané životné funkcie a podmienky v pacientovej izbe. Kategória Smart Medicines obsahuje IoT zariadenia na stopovanie podaných liekov. Kategória Healthcare Records obsahuje informačný systém prostredníctvom ktorého ošetrovatelia zadávajú všetky záznamy o zdravotnej starostlivosti daného pacienta.

Rest of the HealthCare Ecosystem - Zvyšok systému (mimo pacientovej izby), ktorý kontroluje stav v tejto izbe, sa pripája priamo na cloudovú platformu. Tá poskytuje rôzne typy vizualizácii zozbieraných dát rôznym užívateľom. Môže sa jednať napríklad členov rodiny (Family), alebo o poskytovateľov zdravotnej starostlivosti (Care Provider), ktorí si môžu skontrolovať, či zdravotná starostlivosť u daného

pacienta prebieha v poriadku. Ak sa vyskytne problém tak systém kontaktuje ošetrovateľa, rodinu alebo poskytovateľa zdravotnej starostlivosti. Podľa vážnosti problému môžu byť kontaktovaní aj profesionáli (doktori a zdravotne sestry) Tí sú zahrnutí v kategóriách (Healthcare professionals, Emergency Services) V prípade potreby im systém umožní pristupovať k historickým údajom daného pacienta.

Tento koncept by mal zabezpečiť, aby zdravotná starostlivosť prebiehala podľa plánu vzájomnou súčinnosťou všetkých spomínaných zložiek. Ponechali sme aj možnosť rozšírenia týchto ekosystémov.

A. Systemová architektúra rámca

Na nasledujúcom obrázku je zjednodušená všeobecná architektúra konkrétne časti Home-centered Edge-enabled Health IIoT rámca pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti spolu s rôznymi pohľadmi na toto riešenie [11].

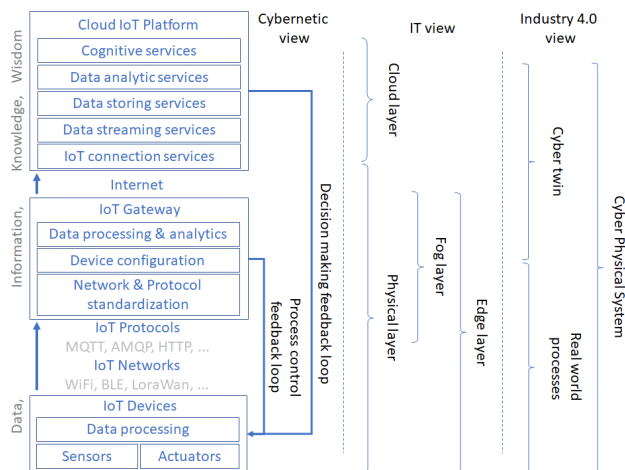


Fig. 2. Zjednodušená všeobecná systémová architektúra rámca

Predchádzajúci obrázok zahŕňa DIKW model (Data, Information, Knowledge, Wisdom) - postupným prechodom sa z dát vrstvami, sa z nich stavajú informácie, znalosti a múdrosť. Tie môžu byť z kybernetického pohľadu použité na riadenie systému dvomi hlavnými spätnoväzobnými slučkami (operátorská a manažérska úroveň riadenia). Z IT pohľadu sa tento koncept skladá z Cloud vrstvy a fyzikálnych zariadení, ktoré sú rozšírené o umelú inteligenciu. To umožňuje prevádzať niektoré výpočty počas predspracovania dát na hranici siete, preto Edge-enabled architektúra. Z pohľadu Industry 4.0, zhromažďovaním dát z fyzikálneho sveta sa v IoT Gateway začína vytvárať virtuálny model/kybernetické dvojča. Pridaním ľudí a spojením týchto dvoch svetov vznikne Kyberfyzikálny systém celého procesu.

Edge-enabled rámec sa skladá z troch hlavných častí. Každá z častí obsahuje ďalšie bloky, aby táto architektúra splnila požiadavky Edge-enabled riešení.

IoT Devices – pripájané IoT zariadenia, ktoré obsahujú snímače a akčné členy, zaznamenávajú, odosielajú a prijímajú dáta.

- **Sensors & Actuators** – v tomto bloku sa nachádzajú časti zariadení, ktoré priamo interagujú so systémom. Pomocou nich sa merajú hodnoty zo systémov a takisto môžu poskytovať akčné členy, ktoré dokážu na systém pôsobiť.
- **Data processing** – hodnoty namerané z týchto senzorov a prijaté príkazy pre akčné členy musia byť v riadiacej jednotke spracované. Dostatočná výpočtová kapacita umožňuje realizovať inteligentné algoritmy.

IoT Gateway– brána na hranici siete, medzi lokálnou sieťou a internetom, v ktorej prebiehajú dôležité operácie s dátami.

- **Network & Protocol standardization** – dáta, ktoré boli prijaté zo zariadení musia byť štandardizované pre ďalšie spracovanie na Edge vrstve.
- **Device configuration** – blok, ktorý ponúka nástroje na konfiguráciu pripojených zariadení.
- **Data processing & analytics** – najdôležitejší blok ktorý umožňuje prvotnú analýzu dát, vyťaženie informácií a tým redukuje množstvá prenášaných dát.

Cloud IoT Platform– vysoko virtualizovaná platforma, ktorá poskytuje ľahko škálovateľne zdroje a služby pre budovanie IoT riešení.

- **IoT connection services** – služby pomocou ktorých si používatelia môže manažovať pripojené zariadenia a prepojiť ich s ďalšími službami na cloudu.
- **Data streaming services** – služby na spracovanie dát tečúcich zo zariadení.
- **Data storing services** – služby na ukladanie dát.
- **Data analytic services** – služby ponúkajúce nástroje na analýzu dát.
- **Cognitive services** – služby kognitívne computingu umožňujúce vytvoriť pokročilé rozhranie.

V. EDGE-ENABLED IOT GATEWAY

Hlavnou úlohou gateway je podporovať rôzne bezdrôtové siete a starať sa o M2M komunikáciu. V Edge-enabled architektúre, k tomu pridávajú aj ďalšie úlohy pokročilejšieho spracovania dát na hrane siete [7][11].

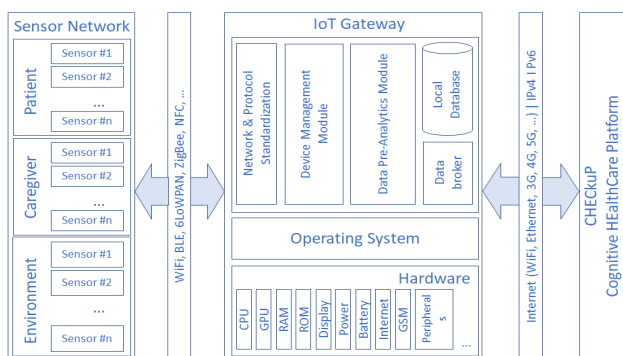


Fig. 3. Všeobecná architektúra Edge-enabled IoT Gateway

A. Inteligentné IoT zariadenia

Sensor network predstavuje skupinu všetkých koncových zariadení z home-centered healthcare system [6][7][26]. Zariadenia obsahujú hardvérové komponenty pre beh programov (CPU, RAM, ROM, ...). Okrem toho však obsahujú jednotky vstupov a výstupov pre digitálne, alebo analógové snímače a akčné členy. Koncové zariadenia sa snažia predspracovať dáta, zvýšiť ich informačnú hodnotu a tým minimalizovať množstvá, ktoré budú ďalej odosielané na IoT Gateway a Cloud. My sme pripojené zariadenia rozdelili do 3 skupín: Patient, Caregiver, Enviroment.

B. Edge-enabled IoT Gateway

Edge-enabled IoT Gateway sa skladá z 3 hlavných častí [24][25][26] – Hardware, Operating System a Application Modules. Hardware sa skladá z komponentov pre pripojenie IoT zariadení, komponenty pre výpočty, komponenty pre pripojenie na cloud (IoT network modules, CPU, GPU, RAM, ROM, Internet connectivity a ďalšie). Voľba operačného systému závisí od typu procesora, veľkosti operačnej pamäte RAM a pamäte ROM. Operating System poskytuje prostredie v ktorom sú spúšťané Application Modules. Tie sme rozdelili do 5 hlavných kategórií, ktoré sa skladajú z blokov z ktorých každý plní inú funkcionality.

Network & Protocol Standardization – príprava dát na ďalšie spracovanie. Môže obsahovať funkcie ako Data Cleansing & Preprocessing, Data Formatting – ktoré dáta prečistia a upravenia do jednotného formátu.

Device Management Module sa stará o konfiguráciu pripojených zariadení. Môže obsahovať funkcie ako Interoperability & Reconfigurability, Device Discovery and Mobility Support.

Data Pre-Analytics Module poskytuje funkcie pre filtráciu a analýzu prechádzajúcich dát. V tých prebiehajú napríklad jednoduché (výpočtovo rýchle) algoritmy, ktoré pomôžu zvýšiť informačnú hodnotu dát. Najčastejšie sa môže jednať zhlukovanie (napr. spájanie dát do skupín podľa podobnosti), klasifikáciu (napr. detekcia anomálií), regresiu (napr. predikcia vývoja teploty). Okrem toho po analýzach by sa v Edge-enabled architektúre mali poskytovať nasledovné funkcie [24][25][26].

- **Local Notification & Control** – po analýze dát sa môžu situácie odoslať do varovných systémov aby sa znížila reakčná doba.
- **Energy Efficiency for Sensor Nodes** – blok v ktorom môže dôjsť k prepočtom, efektívnosti algoritmov. Tie povedú k aktualizáciám programov, ktoré bežia na daných zariadeniach.
- **Data Compression** – vykonáva stratovú, alebo bezstratovú kompresiu v závislosti od prenášaných dát a výpočtového výkonu.

Local Database poskytuje lokálne ukladanie dát tečúcich v prúdoch. V takom to prípade, táto databáza môže slúžiť na viacero úloh. Zásobník na dáta v prípade straty spojenia, alebo dátový zdroj pre tréning ML algoritmov.

Data Broker tento blok sa stará o pripojenie a odosielanie dát do Cloud IoT Platform. Definuje akou sieťou a protokolom budú dáta odosielané.

C. Cloud IoT Platform

Pri Edge-enabled architektúre dáta sú predspracované a nakoniec zhromažďované v IoT Platforme na Cloude. Tá poskytuje rôzne typy ľahko škálovateľných služieb [27], ktoré dáta spracovávajú, ukladajú a analyzujú podľa potreby. Tieto dáta sa pripájajú prostredníctvom IoT Connection Services. Tie poskytujú nástroje na manažovanie pripojených zariadení. Prúdy dát je potrebné ešte spracovať v Stream Analytics Services. Takto predspracované dáta je možné uložiť v databázach poskytovaných Data Storing Services, alebo si ich zobrazit' v Data Visualisation Services. Tie ponúkajú BI nástroje. Aplikácie sú často krát špecifické a tieto nástroje neposkytujú dostatočnú voľnosť, preto väčšina funkcionality môže byť naprogramovaná napríklad prostredníctvom Web Application Services. Pre analyzovanie dát je odporúčané použiť Data Analytic Services [28][29]. Tie poskytujú nástroje na zostavovanie, trénovanie a publikovanie ML modelov. Poslednou kategóriou sú Cognitive services pomocou ktorých je možné vytvoriť pokročilé rozhrania prostredníctvom ktorých používatelia môžu komunikovať s platformou napríklad v prirodzenom jazyku [10][11].

Túto predstavenú architektúru sme sa rozhodli implementovať v reálnom prostredí domácej zdravotnej starostlivosti o trvale chorých pacientov.

VI. PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA CHECKUP

V tejto kapitole prezentujeme naše riešenie s názvom **CHECKuP – Cognitive HEalthCare Platform** [10][11]. (Akronym, inšpirácia z angl. *checkup* : a medical examination to test your general state of health). Tento koncept riešenia sa zaoberá monitorovaním kvality zdravotnej starostlivosti s použitím IoT technológií a pokročilej analýzy dát. Pomocou historických dát, harmonogramov a predikčných algoritmov by sa snažil predchádzať kritickým situáciám a rôznym iným stavom spôsobených ľudským faktorom. Koncept rieši zaujímavú oblasť a preto počas štúdia sa nám podarilo získať niekoľko projektov, pomocou ktorých sme mohli nakupovať zariadenia a používať cloudové služby rôznych poskytovateľov. Okrem toho, o perspektívnosti nášho riešenia svedčí aj fakt, že s týmto konceptom sa nám podarilo vyhrať niekoľko StartUpových súťaží.

A. Analýza problematiky domácej zdravotnej starostlivosti

V rokoch 2016 a 2017, som vykonal cestu do Londýna, Veľká Británia, kde som bol úspešne certifikovaný v agentúre poskytujúcej starostlivosť o starých a chronicky chorých ľudí ako ošetrovateľ (carer) so špecializáciou pre SCI (Spinal Cord Injury) pacientov. Mal som možnosť aj pracovať a lepšie pochopiť problémy, ktoré nastávajú pri Home-centered zdravotnej starostlivosti. Takto získané skúsenosti boli použité pri riešení projektu CHECKuP.

Zdravotná starostlivosť o trvale chorého pacienta v domácich podmienkach sa veľmi neodlišuje od starostlivosti o starých ľudí. Ak sa jedná o starého človeka, ktorý je

častočne sebestačný, v takom prípade môže mať nárok na ošetrovateľa, ktorý mu počas dňa na pár hodín pomôže so základnými činnosťami. Komplexnosť domácej zdravotnej starostlivosti rastie podľa závažnosti zdravotného stavu pacienta. V zvyčajnom prípade sa na jednej zmene nachádzajú 2 ošetrovatelia (Main a Livin carer / hlavný a bývajúcí ošetrovateľ). Ich úlohy sú rozdielne. Bývajúcí ošetrovateľ sa stará rôzne aktivity pacienta (jedlo, zábava, čistenie, pomáhať hlavnému ošetrovateľovi, ...) 24 hodín denne niekoľko dní (napr.: týždňová zmena), zatiaľ čo úlohou hlavného ošetrovateľa (2 x 12 hodinová zmena denne) je zabezpečiť, aby naplánovaná zdravotná starostlivosť prebehla podľa plánu (plánovane aktivity, lieky, návštevy doktorov, záznamy, ...).

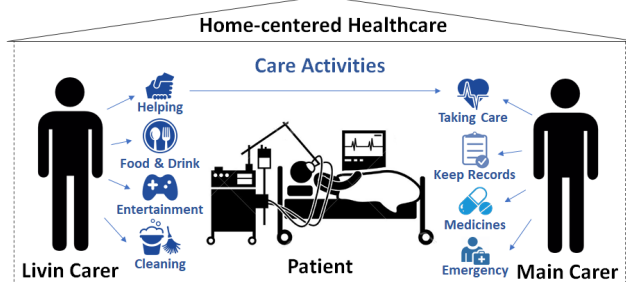


Fig. 4. Starostlivosť o trvale chorých pacientov v domácich podmienkach

Hlavným cieľom nášho riešenia je monitorovať a snažiť sa udržať čo najvyššiu kvalitu zdravotnej starostlivosti.

Problémy týkajúce sa ošetrovateľov:

- Ošetrovatelia často krát potrebujú dozor a pomoc.
- Aj po tréningu celkom nevedia čo majú robiť, (takýto tréning zvyčajne trvá 2 dni školenia s testami, 5 dní zdvojená zmena pri ktorej sa učia všetky procesy, potom prichádza - zloženie praktických skúšok, certifikácia).
- Počas náročnejšieho dňa nestíhajú, alebo nevenujú dostatočnú pozornosť ošetrovateľského plánu, nerobia čo by mali.
- Zopár krát sa stalo, že počas kladných hodín počas nočnej zmeny zaspali.

Problémy týkajúce sa pacientov:

- Nespolupracujú, zlé správanie – psychicky náročná práca, stáva sa že v prípade ak pacient nespokojne alebo odmietne lieky nevedia ošetrovatelia reagovať.

Analýzou týchto problémov, sme dostali základnú sadu požiadaviek, ktoré by takéto riešenie malo spĺňať.

- Použitie jednoduchých neinvazívnych senzorov, ktoré budú monitorovať aktivitu v okolí pacienta.
- V reálnom čase poskytovať prehľad zdravotnej starostlivosti.

Z týchto požiadaviek sme definovali služby, ktoré by malo riešenie poskytovať (IoT platforma na pripojenie zariadení, Notifikácie, Vizualizácia dát, BI portál).

B. Návrh architektúry riešenia CHECKuP

Pre fázu testovania bola navrhnutá kompletná IoT architektúra. V IoT gateway boli dáta agregované a analyzované. Dôležité dáta sa následne preposielali na cloud.

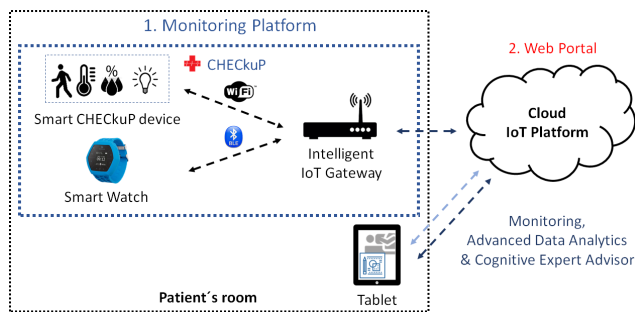


Fig. 5. Konceptná architektúra prípadovej štúdie CHECKuP

Zariadenia obsahovali senzory pre zaznamenávanie aktivity a životných podmienok v miestnosti. Aktivita sa zaznamenávala prostredníctvom PIR (Passive Infrared Sensor) senzoru, ktorý funguje na princípe zachytávania infračerveného žiarenia vyžarovaného osobami v jeho okolí. Zariadenie bolo rozšírené aj o senzory ako teplomer, vlhkomer a senzor svetelnosti. V Cloud IoT platforme boli tieto dáta ukladané a vizualizované. K tomuto zariadeniu sme pridali aj inteligentné hodinky. Tie vďaka pokročilejšej verzii IoT Gateway poskytovali agregované údaje počtu krokov, tep srdca, a podobne. Okrem senzorov bol implementovaný aj expertný systém fungujúci na báze Cognitive services (Cognitive Expert Advisor).

C. Testovanie riešenia CHECKuP

Testovanie prebiehalo v reálnych podmienkach domácej zdravotnej starostlivosti v ktorej sa mohol nachádzať pacient, ošetrovatelia a rodina. Po preštudovaní dispozičného riešenia miestnosti sme navrhli nasledovný scenár testovania.

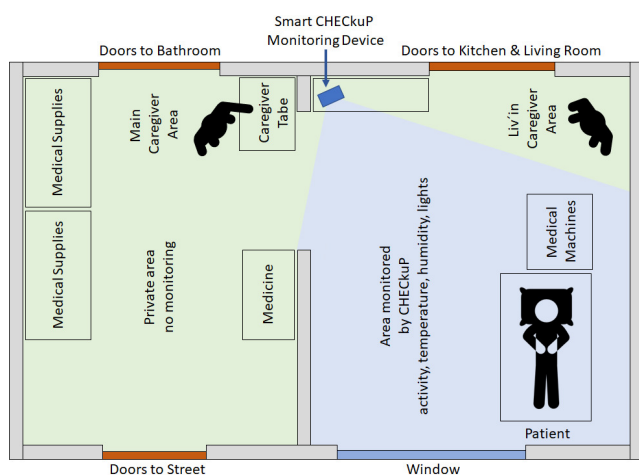


Fig. 6. Scénár testovania prípadovej štúdie CHECKuP

Po uskutočnení úprav v miestnosti (posunutí nábytku) bolo všetko pripravené na fázu testovania. V miestnosti sa

nachádzali skrine, v ktorých je skladovaný zdravotnícky materiál a lieky. Tie sú nevyhnutné pre splnenie všetkých úkonov týkajúcich sa každodenných činností, alebo špeciálnych zdravotníckych procedúr. Pacient sa však stále nachádza na tej istej pozícii v miestnosti. Počas dňa sa s nim môže hýbať, no po vykonaní aktivity sa stále vráti na svoje miesto. Ošetrovatelia pravidelne okolo neho uskutočňujú rôzne úkony, ktoré sú dané plánom starostlivosti, alebo danou situáciou. Významnosť tejto aktivity sa líši. Ošetrovateľ môže byť pri pacientovi ak ho napríklad otáča, alebo ak si pacient napríklad žiada zmeniť pozerané video. Úlohou ošetrovateľov je naplánovať si svoje činnosti a uskutočniť predprípravy tak, aby tento časový plán počas svojej zmeny splnili. Pri pacientovi sa nachádzajú prístroje, ktoré ho udržujú pri živote. Tie musia v tesnej blízkosti pacienta, musia mať prístup k elektrickej energii a všetky záložné batérie musia byť nabité.

Inštalácia senzorov podľa schémy zobrazenej na predchádzajúcom obrázku umožňovala realizovať monitorovanie zdravotnej starostlivosti. Tento scenár spĺňal všetky podmienky a obmedzenia ktoré pri konzultáciách boli definované rodinou pacienta. K tomu poskytoval istotu, že v snímanom priestore sa musí nachádzať človek, ktorý vykonáva činnosti s pacientom. Výhodou tejto technológie (napríklad oproti kamerám) bolo, že poskytovala dostatočne anonymné dáta. Pri vykonávaní rôznych činností pacienta nebolo potrebné vykonávať žiadne činnosti navyše, aby sa zaručila dôstojnosť a súkromie pacienta. Jedinou informáciou, ktorou sa z takého typu senzora dalo disponovať bolo to, či nastal v danej sekunde pohyb / aktivita.

Počas zmeny ošetrovateľ zvyčajne sedí za svojim stolom (caregiver table), kde sa nachádza kniha záznamov. Od toho miesta ma dobrý vyhľad na pacienta. Ak si to situácia vyžaduje, tak sa postaví a vykonáva rôzne činnosti v monitorovanom okolí pacienta. Výsledky všetkých činností sa zapisujú do knihy záznamov (oranžové čiary). Nové technológie nám umožňovali monitorovať aktivitu a validovať hodnovernosť týchto záznamov. Aktivita v okolí pacienta bola nasnímaná a odoslaná na Cloud IoT Platformu (modré čiary).

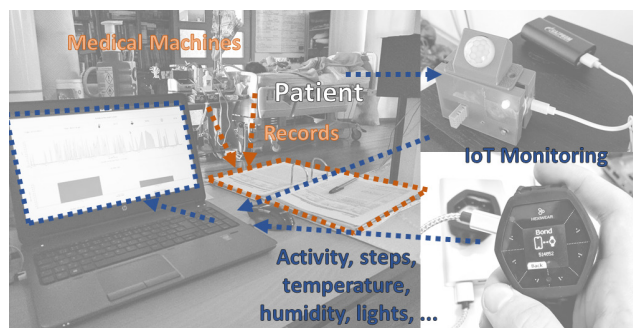


Fig. 7. Konceptná architektúra prípadovej štúdie CHECKuP

Testovanie prebiehalo počas leta a jesene v roku 2017. V prvej fáze pilotnej prevádzky bola pacientova izba monitorovaná po dobu mesiaca. V tejto fáze sa zisťovala spoľahlivosť zariadení postavených na báze vývojovej dosky NodeMCU a ich schopnosť napájania batériou. V druhej fáze prebiehalo testovanie približne po dobu dvoch týždňov. V tejto

fáze sme si všimli vzájomný vplyv používateľov a monitorovacej platformy CHECKuP. Na nasledujúcich obrázkoch sú zobrazené jednotlivé komponenty a ich použitie v systéme domácej zdravotnej starostlivosti.

Aktivita sa zachytávala na zariadenie Smart CHECKuP device, zobrazené v hornej pravej časti predchádzajúcich obrázkov. Toto zariadenie bolo napájané z batérie, alebo rovno zo siete prostredníctvom klasickej micro USB nabíjačky (5V/1A). Ak sa so zariadením niečo stalo po zapojení sa samo nakonfigurovalo a pripojilo na gateway. Dá sa povedať, že toto prototypové zariadenie bolo dostatočne robustné na použitie v takýchto podmienkach. Preto bolo použité ako základne IoT zariadenie pre monitorovanie kvality starostlivosti pri oboch fázach testovania. Zariadenie sa pripájalo na IoT Gateway prostredníctvom WiFi prepojenia a odosielať všetky svoje dáta v JSON formáte MQTT protokolom. Odoslané dáta vyzerali nasledovne.

```
{ "DeviceId": "EnvSensor02", "ActivCount": 45, "Activity": 1, "Light": 82, "Temp": 23, "Humid": 67 }
```



Fig. 8. Ukážky vizualizovania získaných dát v platforme CHECKuP

V spodnej ľavej časti obrázku sú smart hodinky Hexiwear, ktoré sa pripájali pomocou Bluetooth na IoT Gateway odkiaľ sa agregácie údajov odosielať na cloud. Tieto testovacie hodinky slúžia na prototypovanie aplikácií a ich funkcionality je značne obmedzená oproti komerčným produktom. Za jeden z najväčších problémov považujeme ich veľkosť a pomerne malú vydrž batérie. Takto testovaných bolo len zopár zmien. V skutočnosti z celej fázy testovania (približne 50 dní) tieto hodinky boli nosené približne len počas 3 zmien.

Ako bolo spomenuté, obe fázy testovania trvali dokopy približne 50 dní. Zariadenie na meranie aktivity odosielať približne 100 B správy prostredníctvom MQTT vo formáte JSON po dobu 50 dní. Tieto správy boli odosielať každých 5 sekúnd. Z toho nám vyplýva, že počas tohto obdobia, bolo odoslaných zo Smart CHECKuP Device približne 100 MB dát.

D. Zhrnutie fázy testovania riešenia CHECKuP

Prvá fáza testovania používala zariadenie, ktoré obsahovalo senzor PIR na meranie aktivity. Okrem toho v tomto zariadení boli aj teplomer s vlhkomerom a senzor svetelnosti. Smart CHECKuP Device sa pripájalo na IoT Gateway prostredníctvom WiFi prepojenia. Odosielať všetky svoje dáta, ktoré zaznamenávalo v 5 sekundových intervaloch, na cloud do IoT platformy. Tam boli tieto dáta ukladané a vizualizované na web portáli. Použitie skúšobnej verzie umožňovalo 30 dňové ukladanie dát. To nám však postačovalo keďže táto prvá fáza prebiehala približne mesiac v lete roku 2017.

Druhá fáza testovania používala rozšírenú architektúru. K tomuto zariadeniu pribudli aj smart hodinky Hexiwear. Tie poskytovali agregované údaje ohľadom počtu krokov počas zmeny, tep srdca, a podobne. Tieto hodinky však kvôli prevádzkovým dôvodom (vybíjanie batérie) a dôvodom ochrany súkromia nakoniec boli nosené len mnou pri našom testovaní. Iní ošetrovatelia ich nenosili. Dáta z týchto hodínok poskytovali informácie na základe, ktorých sa dala oddeliť aktivita v okolí pacienta od aktivity vyvinutej ošetrovateľom. Bežne sa stávalo, že v okolí pacienta sa pohybovala rodina a táto aktivita bola zaznamenaná aj v konečných výsledkoch. Tie sme však nepovažovali za skreslené, keďže úlohou ošetrovateľa je stihnúť všetky úkony podľa plánovaného rozvrhu tak, aby sa zabezpečila kvalita požadovanej starostlivosti a spoločensky život pacienta. V tomto prípade sme túto aktivitu považovali za dobré znamenie keďže určovala, že sa všetky činnosti stihli a pacient môže prežívať spoločenské aktivity s ostatnými. Okrem týchto senzorov druhá fáza testovania bola rozšírená expertný systém fungujúci na báze Cognitive services. Na základe našich pozorovaní sme dospeli k niekoľkým záverom. Ošetrovatelia tento systém nepoužívali. Báza znalostí natrénovaná nami bola veľmi obmedzená. Okrem toho tieto svoje emócie argumentovali aj tým, že v súčasnej situácii je potrebný skôr monitorovací portál, ktorý by umožňoval spracovanie a analyzovanie dát aj samotnými používateľmi. Druhá fáza testovania platformy CHECKuP prebiehala približne dva týždne začiatkom zimy v roku 2017

Keďže sa jednalo o prípadovú štúdiu, mnoho faktorov sme pri tomto testovaní nevedeli ovplyvniť a to zaťažuje možnosti objektívneho vyhodnotenia platformy. Veľká časť kvality zdravotnej starostlivosti závisí od skúseností ošetrovateľov. Tí sa však počas obdobia testovania veľmi výrazne menili a s tým súviseli aj rôzne zmeny v monitorovanej aktivite a iné kritické situácie spôsobené nízkou kvalitou zdravotnej starostlivosti.

E. Analýza nameraných dát

V nasledujúcej časti sa budeme zaoberať práve aktivitou, keďže tá predstavuje najdôležitejšiu zložku kvalite zdravotnej starostlivosti. Pre tieto účely sme si vybrali referenčnú vzorku

z dvoch týždňov z testovania platformy CHECKuP. Zo získaných dát sme si vypočítali počty aktívnych minút. Spočítali sme každú minútu, v ktorej nastal aspoň jeden krát pohyb (Active Minutes). To znamená, že ak sa počas minúty pred snímačom niekto pohol, s najväčšou pravdepodobnosťou ošetrovateľ, tak sa táto minúta počítala ako aktívna. Maximálnym dosiahnuteľným číslom pri výpočte pomocou tejto metodiky môže byť 60 minút aktivity za hodinu, alebo 1440 minút v rámci jedného dňa.

Každý pacient má počas dňa naplánovaný rozvrh aktivít, ktoré ošetrovateľ musí stihnúť. Tento rozvrh zmeny sa mení len s veľmi zriedkavo. Tieto aktivity sú vykonávané manuálne pri pacientovi, takže z toho logicky vyplýva, že v tomto prípade bude aktivita v okolí pacienta väčšia.

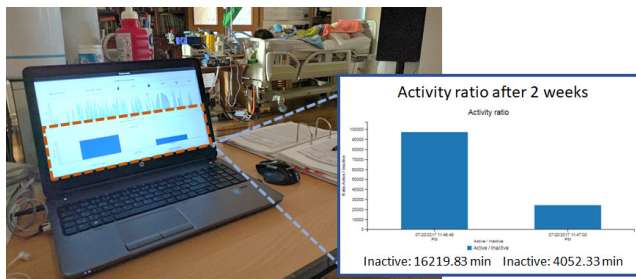


Fig. 9. Aktivita po vybraných 2 týždňoch z testovania CHECKuP

Pacient trpiaci SCI C1 sa vôbec nehýbe preto ho v našom prípade senzor nezachytil a s istotou môžeme tvrdiť, že aktivita zachytená našim zariadením patrila ošetrovateľom, alebo iným ľuďom v danej miestnosti. Nasledujúci graf už zobrazuje dáta z dvoch týždňov testovania spracované podľa našej metodiky.

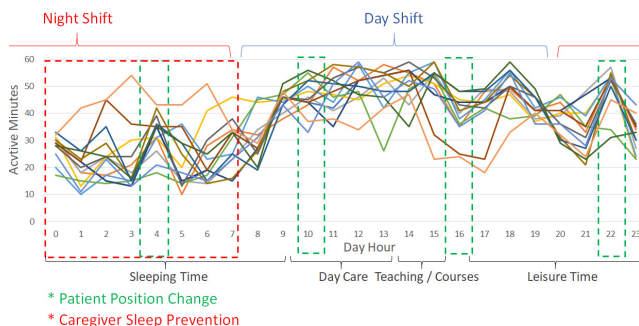


Fig. 10. Vybrané merania aktivity ošetrovateľov z testovania CHECKuP

Na tomto grafe je možné si všimnúť, že všetky zmeny kopírujú približne rovnaký tvar. Počas denných zmien je aktivita v okolí pacienta vyššia. Po prebudení okolo 9:00 je naplánovaný sled aktivít, ktoré je potrebné stihnúť pred časom vyhradeným na učenie a kurzy. Po týchto lekciách prichádza čas vyhradený na voľné aktivity ako napríklad pozeranie videí, hranie hier. Počas dňa sa vyskytujú špičky, ktoré sme napríklad zobrazili zelenou farbou – Patient Position Change. Ide o zmenu pozície pacienta. Tá sa v tomto prípade menila každých šesť hodín. Najťažšie zmeny polohy sa vykonávajú o desiatej ráno a večer. Preto v týchto časoch je fyzická aktivita najväčšia, práve kvôli zložitým manipuláciám pri ktorých sa v tom čase okolo pacienta bežne hýbu traja ľudia.

Počas nočných zmien je aktivita nižšia. Vtedy sa môže stať, že ošetrovateľ zaspí. Preto je na obrázku znázornená zóna Caregiver Sleep Prevention. V našom prípade bola riešenia jednoducho, ak sa ošetrovateľ po dobu 15 minút neobjavil pri pacientovi / pri pacientovi nebola zachytená aktivita, tak sa odoslalo upozornenie. Takto jednoduchou riešený systém spĺňal daný účel dá sa povedať veľmi presne. V budúcnosti by sa táto detekcia dala rozšíriť o dáta z wearables.

Zo získaných dát sme vypočítavali kvalitu zdravotnej starostlivosti. Podrobný popis metodiky pre výpočet kvality zdravotnej starostlivosti QoC (Quality of HealthCare), však plánujeme publikovať v osobitnom článku. Táto metodika modifikuje EWS (Early Warning System) [30] používaný pre vyhodnocovanie zdravotníckych meraní. Na nasledujúcom obrázku sa nachádza princíp výpočtu aktivity počas zmeny.

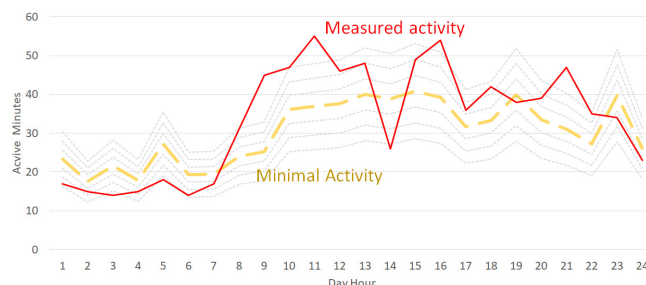


Fig. 11. Aktivita po vybraných 2 týždňoch z testovania CHECKuP

Táto metodika brala do úvahy predchádzajúce dni. Prispôbovala referenčnú krivku, na základe ktorej boli určované hranice, podľa ktorých sa klasifikovalo. Aplikovaním tejto metodiky sme vedeli ohodnotiť kvalitu zmien. Nasledujúci obrázok zobrazuje 3 vybrané zmeny z našej dvoj týždňovej vzorky, ktoré sme ohodnotili touto metodikou.

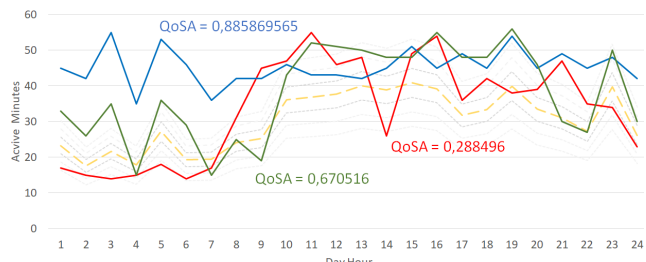


Fig. 12. Aplikovanie metodiky na výpočet kvality zdravotnej starostlivosti

Na obrázku je žltou čiarkovanou čiarou zobrazená minimálna referenčná aktivita. Slabými sivými čiarkovanými čiarami sú zobrazené jej limitné hodnoty, podľa ktorých sa kategorizujú aktivity v danej hodine a pridelujú body.

- Modrá čiara – počas toho dňa sa aktivita držala pomerne vysoko. Pacient v noci nespál a cez deň trpel bolesťami. Aktivita ošetrovateľa bola vysoká preto hodnotenie bolo najlepšie s pomedzi vybraných dní.
- Zelená čiara – predstavuje priemerný deň kedy ošetrovateľ splnil všetky svoje úkony ktoré boli definované plánom starostlivosti. Mimo toho však

nebola vyvinutá aktivita naviac preto sa hodnotenie kvality starostlivosti hornej tretine stupnice.

- Červená čiara – tento deň sa začal slabými aktivitami počas spánku pacienta. Tento efekt bol multiplikovaný tým, že tieto aktivity niekoľko krát klesli pod minimálnu referenčnú aktivitu o 30 a viac %. To spôsobilo, že tento deň bol v konečnom dôsledku hodnotený najhoršie.

Aktivita získaná zo zariadenia by sa na základe stanovenej minimálnej referenčnej aktivity ohodnotila a skóre by sa odosiela cez IoT Gateway do Cloud portálu, kde by sa zobrazovalo. Toto číslo by udávalo kvalitu aktivity v rozsahu od 0 do 1. Výsledná kvalita zdravotnej starostlivosti by vznikla súčtom týchto čiastkových kvalít. Ostané parametre kvalít by tiež mohli byť vypočítavane pomocou nášho adaptívneho algoritmu fungujúceho na báze EWS.

F. Vyhodnotenie prípadovej štúdie CHECKuP

V prípadovej štúdií CHECKuP sme rozpracovali myšlienku použitia moderných IoT princípov na monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti. V nasledujúcej tabuľke podávame zhrnutie výhod a nevýhod implementovaných technológií s možnými vysvetleniami, ktoré sme si všimli počas testovania.

TABLE II. ZHRNUTIE VÝHOD A NEVÝHOD IMPLEMENTOVANÝCH TECHNOLOGIÍ POČAS TESTOVANIA CHECKuP

IoT Monitoring	
Smart CHECKuP Device	+ Simple cheap device that collects lot of activity and living conditions data.
	+ PIR sensor provides anonymized data of activity in the field of view.
	+ No special actions needed to maintain patient’s dignity and privacy.
Smart watch (Hexiwear)	- Anybody besides caregivers was detected.
	- Device was easy to hide, unplug, etc.
	+ Exact information about physical activity of caregiver.
Cognitive Expert Advisor	+ In combination with Smart CHECKuP Device we had more exact information about activity of caregiver in the room and how often he was providing some activities close to patient.
	+ Additional functions can be easily implemented like sleep detection and detection of stress and tiredness.
	- Battery life, device had to be charged after every shift.
	- It was dangerous during manipulations with patient (scratches).
	- Loss of caregiver’s privacy all data about physical activity.
Advanced Machine Learning	
Cognitive Expert Advisor	+ Helping system for caregivers.
	+ It can change the view of caregivers from system that is only monitoring and punishing us to the system that help us to provide the best care.
	- Knowledge database must be created and periodically maintained.
	- Those services have one of the highest pricing from all services that were used to create CHECKuP.

Platforma CHECKuP poskytovala funkcie hlavne na monitorovanie aktivity a životných podmienok. Na základe týchto dát vypočítavala kvalitu starostlivosti. To mohlo v očiach niektorých používateľov vzbudzovať negatívne reakcie. Po inštalácii zariadenia sme si všimli negatívny efekt. Niektorí z ošetrovateľov sa čoraz častejšie zdržovali v svojej nemonitorovanej časti (zelená plocha z obrázku na začiatku tejto kapitoly). Takéto pasívnejšie správanie sa však po pár zmenách vytratilo. Okrem toho sa nám zopár krát stalo to, že toto zariadenie bolo „omylom“ prekryté iným predmetom, alebo vytiahnuté z elektrickej energie. Tieto negatívne efekty by sa však dali vyriešiť informovaním zamestnancov o potrebe monitorovania a zapracovaním dodatku do ich zmluvy. V dodatku by bolo uvedené, že okrem pacienta sa musia starať aj o plynulý chod monitorovacieho zariadenia. Takéto negatívne reakcie sme zažili len približne 4 krát počas celej fázy testovania roku 2017.

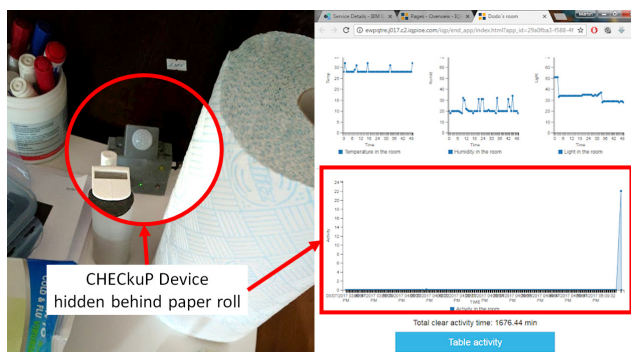


Fig. 13. Skryté CHECKuP zariadenie pri testovaní

Aplikácia tejto technológie však umožňovala zaznamenávať históriu aktivity, ktorá mohla byť použitá pri skúmaní zdravotného stavu pacienta a zlepšovaní kvality starostlivosti. V tomto systéme sa vyskytovalo viacero chýb vedúcich k zanedbávaniu starostlivosti ošetrovateľmi. Tie boli spôsobené najmä chýbajúcim systémom na monitorovanie aktivity týchto ošetrovateľov. Činnosti ktoré boli vynechané, alebo urobené neskôr sa jednoducho mohli dopísať do papierovej knihy záznamov. Vo všeobecnosti sa pri pacientovi nachádzali ošetrovatelia, alebo iní ľudia, len v približne 20 % celkového času. Kvalita starostlivosti sa v niektoré hodiny dostávala veľmi nízko. Po predstavení týchto výsledkov a kvôli pretrvávajúcim problémom sa nakoniec sa v tejto izbe nainštaloval kamerový systém, ktorý môže poslúžiť na objasnenie skutočností zanedbania starostlivosti, ktoré môžu byť detekované prostredníctvom predstaveného systému.

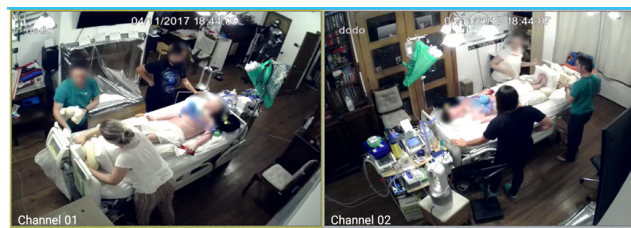


Fig. 14. Rozšírenie funkcionality CHECKuP o kamerový systém

Medzi splnené ciele podľa aplikačných kritérií patrí vývoj platformy poskytujúcej neustále monitorovanie aktivity, činnosti a zdravotného stavu pacienta pomocou nových technológií. Okrem toho k týmto cieľom môžeme pridať aj aplikovanie pokročilých rozhraní pomocou, ktorých poskytovatelia zdravotnej starostlivosti a ich ošetrovatelia mohli zaznamenávať a analyzovať poskytovanú kvalitu zdravotnej starostlivosti. V ďalšej práci by bolo potrebné sa zamerať na technológie, ktoré pomôžu ošetrovateľom poskytovať vyššiu kvalitu zdravotnej starostlivosti.

VII. VYHODNOTENIE EDGE-ENABLED RÁMCA

V tomto článku sme predstavili Edge-enabled rámec implementujúci princípy Edge a Cognitive computing. Tie by mali oproti klasickej Cloud architektúre šetriť prenesenými dátami a finančnými prostriedkami. Podľa princíпов toho rámca sme realizovali aj prípadovú štúdiu CHECKuP – Cognitive HealthCare Platform na základe ktorej môžeme vyhodnotiť výsledky získané po aplikácii tohto rámca pre riešenie monitorovania kvality zdravotnej starostlivosti. Prezentačné video tohto projektu sa nachádza aj na YouTube¹.

Dáta použitím myšlienok predstaveného rámca boli v prípadovej štúdií boli čiastočne spracované a odosielané na cloud. Pre podrobnejšie porovnanie sme zaznamenávali jednotlivé počty správ a merali časy spracovania správ. Výsledky sa prejavili na vyťažení prenosového kanálu, a poplatkoch za ukladanie a spracovanie dát. Úspora prenesených dát však vo veľkej miere závisí od konkrétneho prípadu a od použitej funkcionality, preto porovnávať prípadové štúdie medzi sebou by bolo neobjektívne. V tomto článku uvádzame zhrnutie výsledkov, podrobné výsledky a spracovanie plánujeme publikovať v osobitnom článku.

TABLE III. ZHRNUTIE EDGE-ENABLED RÁMCA PRE MONITOROVANIE KVALITY ZDRAVOTNEJ STAROSTLIVOSTI

Factors	Cloud-enabled monitoring	Edge-enabled monitoring
Number of devices, networks & protocols	Lower	Higher
Control time	Slower Approx. 5 s	Faster Approx. 2 s
Network traffic	High 5000+ msg/day	Lower 1000+ msg/day
Cloud services	High costs	Lower costs

Na základe našich meraní, by táto funkcionality v IoT Gateway mohla ušetriť približne 80% prenesených správ a približne 95% objemu prenesených dát. To by sa finančne prejavilo hlavne v poplatkoch za cloudové služby lebo v tomto prípade by bolo potrebné spracovať a uložiť len približne 20% dát. Okrem toho, ak si porovnáme oba prípady Cloud a Edge-enabled architektúry a ich riadiaci čas v podobe zaznamenania udalosti, odoslania, spracovania, vyhodnotenia a zobrazenia na HMI zariadeniach, môžeme povedať, že použitie Edge-enabled architektúry vykazovalo približne 2 krát rýchlejší čas odozvy ako použitie čisto Cloud-enabled architektúry.

¹ https://youtu.be/eB7CB_toQOo

VIII. ZHRNUTIE

Každým rokom počty pripojených zariadení a odoslaných dát exponenciálne rastú. Dnešná doba je dobrým štartovacím bodom pre implementáciu technológií, ktoré dokážu inteligentne spracovávať dáta čo najbližšie miesta ich vzniku. Oblasť zdravotníctva je práve jednou z najperspektívnejších oblastí priemyslu pre implementáciu nových technológií. Vzniká aktuálna potreba na výskum a vývoj nových technológií, ktoré by pomohli budúcej generácii zdravotníckych profesionálov poskytovať tú najvyššiu možnú kvalitu zdravotnej starostlivosti.

V tejto publikácii bola prezentovaná časť výsledkov dizertačnej práce [31]. Článok sa zaoberal aplikačným výskumom v perspektívnej aplikačnej oblasti Healthcare Industrial Internet of Things (Health IIoT). Prezentovali sme systematický vývoj Edge-enabled IoT rámca pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti v domácich podmienkach. Snažili sme sa popísať všetky dôležité činnosti, ktoré sme vykonali, aby sme tento rámec navrhli a implementovali. Jednotlivé časti plánujeme podrobnejšie rozpisovať v osobitných publikáciách. Hlavné prínosy môžeme zhrnúť nasledovne:

- Analýza technickej, vedeckej a spoločenskej problematiky v oblasti Health IIoT
- Návrh Edge-enabled rámca so zameraním na oblasť Health IIoT
- Prípadová štúdia CHECKuP – Cognitive HealthCare Platform, uskutočnená v podmienkach trvalej domácej zdravotnej starostlivosti

Počas minulých rokov sa nám s týmito myšlienkami podarilo vyhrať niekoľko StartUp súťaží (5 súťaží, z toho sme 4 vyhrali). Vyhrali sme prvé miesto v nedávnom IBM Hackathone 2017, Bratislava; Zúčastnili sme sa AT&T Hackathon2017, Brno, Česká Republika; Postúpili sme do inkubačnej fázy Startup Centrum TUKE, Košice; Získali sme druhé miesto v medzinárodnom kurze BEST a IBM - Smart future 2017, Košice; Výhra sme Slovenského kola, v Európe druhé miesto v medzinárodnej súťaži CISCO Creathon 2016, Bratislava; Vyhrali sme prvé miesto v FPT Summer School, Košice. Okrem toho čiastočné výsledky tohto projektu poslúžili na získanie nasledovných projektov. Medzi týmito projektami boli granty od Nadácie Tatrabanky: E-talent, IoT Net Take your knowledge to the edge, 2017 (4000 eur); Business Idea, Enterprise IoT Net, 2017 (konzultácie); Študenti do sveta, Výskumný pobyt University of Auckland, 2017 (2500 eur). Ostatné získané projekty: FEI grant, TUKE, CHECKuP – Cognitive HealthCare Platform, 2016 (2000 eur); Microsoft Azure Research Award (Cloud services 2x 10 000 eur); IBM Country Project (Cloud services, Pilot IoT Laboratory).

V nasledujúcich rokoch sa práve táto oblasť začne čoraz rýchlejšie digitalizovať a postupne sa v nej začnú používať tie najmodernejšie technológie, ktoré budú budúcim zdravotným profesionálom poskytovať rozšírené rozhrania medzi kybernetickým a fyzikálnym svetom. Tieto rozhrania spolu s Cyber-Physical Systems rozšíria schopnosti novej generácie ošetrovateľov. Navrhovaný rámec by mal pomôcť pripraviť lepšiu cestu pre implementáciu tejto novej generácie IoT riešení v perspektívnej oblasti zdravotnej starostlivosti.

POĎAKOVANIE

V tejto publikácii bola prezentovaná časť výsledkov dizertačnej práce [31]. Publikácia bola podporená projektom VEGA - 1/0663/17 (100%).

REFERENCIE

- [1] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376.
- [2] Trotta, D., & Garengo, P. (2018, March). Industry 4.0 key research topics: A bibliometric review. In *Industrial Technology and Management (ICITM), 2018 7th International Conference on* (pp. 113-117). IEEE.
- [3] Zheng, P., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K., ... & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 1-14.
- [4] Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., & Zühlke, D. (2014, July). Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. In *Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on* (pp. 289-294). IEEE.
- [5] Zhang, Y., Qiu, M., Tsai, C. W., Hassan, M. M., & Alamri, A. (2017). Health-CPS: Healthcare cyber-physical system assisted by cloud and big data. *IEEE Systems Journal*, 11(1), 88-95.
- [6] Miškuf, M., Bundzel, M. & Zolotová, I. (2016, August). Smart Industry Priemysel 4.0 – dátová analytika v cloude (1), *ATP Journal, ISSN 1335-2237*.
- [7] Miškuf, M., Bundzel, M. & Zolotová, I. (2016, September). Smart Industry Priemysel 4.0 – dátová analytika v cloude (2), *ATP Journal, ISSN 1335-2237*.
- [8] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637-646.
- [9] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., & Addepalli, S. (2012, August). Fog computing and its role in the internet of things. In *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing* (pp. 13-16). ACM.
- [10] Miškuf, M. (2017, May). Monitoring infrastructure for better healthcare. *Scientific Conference of Young Researchers (SCYR)*.
- [11] Miškuf, M. (2018, May). Edge-enabled Platform for Monitoring Quality of Healthcare in Home Environment. *Scientific Conference of Young Researchers (SCYR)*.
- [12] Hossain, M. S., & Muhammad, G. (2016). Cloud-assisted industrial internet of things (iiot)-enabled framework for health monitoring. *Computer Networks*, 101, 192-202.
- [13] Koop, C. E., Mosher, R., Kun, L., Geiling, J., Grigg, E., Long, S., ... & Rosen, J. M. (2008). Future delivery of health care: Cybercare. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 27(6).
- [14] Doukas, C., & Maglogiannis, I. (2012, July). Bringing IoT and cloud computing towards pervasive healthcare. In *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2012 Sixth International Conference on* (pp. 922-926). IEEE.
- [15] Jung, E. Y., Kim, J. H., Chung, K. Y., & Park, D. K. (2013). Home health gateway based healthcare services through U-health platform. *Wireless Personal Communications*, 73(2), 207-218.
- [16] Arai, K. (2014). Rescue System for Elderly and Disabled Person Using Wearable Physical and Psychological Monitoring System. In *Intelligent Systems for Science and Information* (pp. 45-63). Springer, Cham.
- [17] Dubey, H., Yang, J., Constant, N., Amiri, A. M., Yang, Q., & Makodiya, K. (2015, October). Fog data: Enhancing telehealth big data through fog computing. In *Proceedings of the ASE BigData & SocialInformatics 2015* (p. 14). ACM.
- [18] Ahmad, M., Amin, M. B., Hussain, S., Kang, B. H., Cheong, T., & Lee, S. (2016). Health Fog: a novel framework for health and wellness applications. *The Journal of Supercomputing*, 72(10), 3677-3695.
- [19] Muhammad, G., Rahman, S. M. M., Alelaiwi, A., & Alamri, A. (2017). Smart health solution integrating IoT and cloud: a case study of voice pathology monitoring. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 69-73.
- [20] Bhatia, M., & Sood, S. K. (2017). A comprehensive health assessment framework to facilitate IoT-assisted smart workouts: A predictive healthcare perspective. *Computers in Industry*, 92, 50-66.
- [21] Gia, T. N., Jiang, M., Sarker, V. K., Rahmani, A. M., Westerlund, T., Liljeberg, P., & Tenhunen, H. (2017, June). Low-cost fog-assisted health-care IoT system with energy-efficient sensor nodes. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017 13th International* (pp. 1765-1770). IEEE.
- [22] Negash, B., Gia, T. N., Anzanpour, A., Azimi, I., Jiang, M., Westerlund, T., ... & Tenhunen, H. (2018). Leveraging fog computing for healthcare iot. In *Fog Computing in the Internet of Things* (pp. 145-169). Springer, Cham.
- [23] Rahmani, A. M., Gia, T. N., Negash, B., Anzanpour, A., Azimi, I., Jiang, M., & Liljeberg, P. (2018). Exploiting smart e-health gateways at the edge of healthcare internet-of-things: a fog computing approach. *Future Generation Computer Systems*, 78, 641-658.
- [24] Miškuf, M., Kajáti, E., & Zolotová, I. (2017, November). Smart Metering IoT Solution Based on NodeMCU for More Accurate Energy Consumption Analysis. *International Journal of Internet of Things and Web Services*, 2.
- [25] Lojka, T., Miškuf, M., & Zolotová, I. (2016, September). Industrial IoT Gateway with Machine Learning for Smart Manufacturing. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 759-766). Springer, Cham.
- [26] Mocnej, J., Miškuf, M., Papcun, P., & Zolotová, I. (2018, May) Impact of Edge Computing Paradigm on Energy Consumption in IoT, *Conference on Programmable Devices and Embedded Systems (PDeS)*
- [27] Lojka, T., Miskuf, M., & Zolotova, I. (2014, January). Service oriented architecture for remote machine control in ICS. In *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), 2014 IEEE 12th International Symposium on* (pp. 327-330). IEEE.
- [28] Miškuf, M., & Zolotová, I. (2016, February). Comparison between multi-class classifiers and deep learning with focus on industry 4.0. In *Cybernetics & Informatics (K&I), 2016* (pp. 1-5). IEEE.
- [29] Miškuf, M., Mocnej, J., & Zolotová, I. (2018, February). Healthcare Data Classification – Cloud-based Architecture Concept. *Cybernetics & Informatics (K&I), 2018*. IEEE, 2018.
- [30] Georgaka, D., Mparmparousi, M., & Vitos, M. (2012). Early warning systems. *Hospital Chronicles*, 7(1 Sup), 37.
- [31] Miškuf, M. (2018, April). Edge-enabled framework pre monitorovanie kvality zdravotnej starostlivosti, dizertačná práca, KKUI, FEI, TUKE

Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia

Ing. Matej Oravec
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita, Košice
matej.oravec@tuke.sk

doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita, Košice
anna.jadlovska@tuke.sk

Abstrakt—Tento článok prezentuje časť výsledkov dosiahnutých počas PhD. štúdia, ktoré sú spracované v dizertačnej práci *Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia*. Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky na zostavenie diagnostického systému pre modely fyzikálnych systémov, ktorý pozostáva z vhodných algoritmov riadenia a diagnostiky chýb s ich následnou implementáciou do distribuovaného systému riadenia. Vzhľadom na rozdelenie metód diagnostiky chýb sa dizertačná práca zaoberá vybranými metódami diagnostiky chýb, ktoré sú založené na matematickom modeli alebo na dátach získaných meraním sledovanej fyzikálnej veličiny dynamického systému. Metodika návrhu diagnostického systému je v dizertačnej práci overená s využitím simulačných a reálnych laboratórnych modelov tvoriacich experimentálne pracovisko, ktoré je súčasťou Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky na KKUI, FEI, TU v Košiciach. Metodika a overenie jej návrhu je spracované v dizertačnej práci v štyroch modelových scenároch, pričom softvérový výstup dizertačnej práce je implementovaný v prostredí *MATLAB/Simulink* s využitím aplikačných toolboxov.

Keľové slová—modelovanie, experimentálna identifikácia, optimálne stavové LQ riadenie, prediktívne riadenie, diagnostika chýb snímačov a akčných členov, riadenie s prispôbením sa chybám, diagnostika vibrácií, supervízne riadenie, distribuovaný systém riadenia, simulácia, *MATLAB/Simulink*

I. ÚVOD

Súčasným trendom vo všetkých priemyselných oblastiach je tvorba stále zložitejších komplexných systémov, od ktorých sa požaduje vysoká výkonnosť, efektivita, kvalita produkcie a zároveň veľká miera spoľahlivosti. Zložitá štruktúra komplexných systémov so sebou nesie veľkú pravdepodobnosť výskytu chýb jeho častí. Dôraz sa preto kladie na sledovanie stavu systému a včasné odhalenie prípadných chýb, aby bola zabezpečená ochrana zdravia ľudí, ktorý systém obsluhujú a rovnako aby sa predišlo veľkému znehodnoteniu strojov i zariadení systému, čo môže výrazne obmedziť výkonnosť celého systému a priniesť finančné straty. Sledovanie stavu systému a včasné odhalenie chýb je úlohou diagnostiky chýb v dynamických systémoch, ktorej je v súčasnej dobe venovaná veľká pozornosť, pretože je užitočným nástrojom pre zabezpečenie vysokej spoľahlivosti celého systému [1].

Dizertačná práca *Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia* sa venuje problematike diagnostiky chýb fyzikálnych systémov a jej implementácii v distribuovanom systéme riadenia, ktorý je realizovaný na Katedre kybernetiky a umelej inteligencie (KKUI), FEI, TU. Dizertačná práca pozostáva z dvoch hlavných častí. Prvá časť sa skladá zo štyroch kapitol. V prvej kapitole dizertačnej práce sú uvedené základné poznatky a rozdelenie metód v oblasti diagnostiky chýb fyzikálnych systémov. V druhej a tretej kapitole dizertačnej práce sú popísané predpoklady pre vytvorenie diagnostického systému, ktoré zahŕňajú zostavenie nominálneho modelu fyzikálneho systému, návrh riadenia nominálneho systému a návrh algoritmov diagnostiky chýb fyzikálnych systémov s využitím chybového matematického modelu alebo nameraných dát [2], [3]. V týchto kapitolách je venovaná pozornosť výberu metód diagnostiky chýb vhodných na riešenie cieľov dizertačnej práce v podmienkach laboratórií Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky (CMMRaPI) na KKUI. V poslednej kapitole prvej časti dizertačnej práce bude predstavený model distribuovaného systému riadenia, ktorý je implementovaný na KKUI. Pozornosť je zameraná na možnosti diagnostiky chýb na jednotlivých úrovniach DSR. V tejto kapitole je stručne opísaný aj Detector Control System experimentu ALICE v CERN-e, ktorý má podobnú štruktúru ako DSR na KKUI a v implementácii navrhnutého diagnostického systému do DSR využijeme kroky riešenia úloh súvisiacich s monitorovaním stavu detektora experimentu ALICE prostredníctvom DCS [4].

Druhá časť dizertačnej práce pozostáva z dvoch kapitol, ktoré nadväzujú na kapitoly uvedené v prvej časti. Piata kapitola je venovaná návrhu metodiky pre diagnostiku chýb snímačov a akčných členov fyzikálnych systémov založenej na matematických modeloch. Pozostáva z definovania a overenia jednotlivých krokov metodiky s využitím simulačných a reálnych fyzikálnych systémov. V tejto kapitole sú uvedené tri modelové scenáre, ktoré zahŕňajú postup zostavenia matematického modelu fyzikálneho systému, návrh algoritmov jeho riadenia a diagnostického systému na základe metód

popísaných v prvej časti dizertačnej práce. Všetky kroky navrhutej metodiky návrhu diagnostického systému sú simulačne a experimentálne overené a zhodnotené v modelových scenároch. Šiesta kapitola obsahuje návrh metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na meraných dátach. Navrhnutá metodika je experimentálne overená na vybranom reálnom laboratórnom modeli a výsledky sú taktiež spracované v modelovom scenári. V siedmej kapitole sú stručne zhrnuté dosiahnuté výsledky prezentované v dizertačnej práci.

II. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V dizertačnej práci je venovaná pozornosť vybraným metódam riadenia a diagnostiky chýb dynamických systémov. Na základe vybraných metód sú navrhnuté algoritmy riadenia a diagnostiky chýb s cieľom ich využitia v podmienkach laboratórií CMMRaPI na KKUI, FEI, TU. Navrhnuté algoritmy riadenia a diagnostiky chýb sú implementované v 5 - úrovňovom modeli distribuovaného systému riadenia s využitím dostupných výpočtových, programových a technických prostriedkov. Predložená dizertačná práca sa zaoberá riešením definovaných cieľov:

- Spracovať teoretické východiská, analyzovať klasické/inteligentné metódy, prístupy a prostriedky pre meranie a vyhodnocovanie parametrov nedeštruktívnej diagnostiky fyzikálnych systémov.
- Vypracovať metodiku pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov s využitím metód založených na modeloch a metód založených na dátach a aplikovať ju do návrhu algoritmov riadenia odolného voči chybám.
- Overiť metodiku návrhu diagnostického a riadiaceho systému na modelových aplikáciách s využitím vhodných riadiacich štruktúr a simulačných nástrojov.
- Vytvoriť experimentálne pracovisko pre realizáciu úloh nedeštruktívnej diagnostiky s aplikačným využitím v riadení kybernetických systémov v rámci štruktúry DSR na školiacom pracovisku.

Pre riešenie definovaných cieľov dizertačnej práce je navrhnutá nasledujúca štruktúra dizertačnej práce, ktorá je znázornená na OBRAZOK.

III. NÁVRH METODIKY PRE DIAGNOSTIKU FYZIKÁLNYCH SYSTÉMOV

V dizertačnej práci je hlavná pozornosť venovaná návrhu metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na matematických modeloch alebo meraných dátach a jej implementácii do distribuovaného systému riadenia na KKUI, FEI, TU.

Jednotlivé kroky návrhu diagnostického systému sú obsiahnuté v troch moduloch:

Modul A: Návrh riadenia pre nominálny systém

Modul B: Návrh diagnostického systému a jeho simulačné overenie

Modul C: Implementácia diagnostického systému do distribuovaného systému riadenia

Modul A pozostáva z dvoch hlavných krokov:

A.1 Zostavenie matematického modelu nominálneho systému na základe analytickej/experimentálnej identifikácie. V tomto kroku musí byť splnený dôležitý predpoklad, že matematický model je zostavený pre systém, ktorý nie je ovplyvnený chybou snímačov alebo akčných členov.

A.2 Výber vhodného typu riadenia, návrh algoritmu riadenia s využitím nominálneho modelu fyzikálneho systému a implementácia v zvolenej riadiacej štruktúre s využitím dostupných technologických a výpočtových prostriedkov. Dôležitým krokom je overenie navrhnutého algoritmu riadenia pre rôzne ciele (riadenie do pracovného bodu, riadenie na nový ustálený stav alebo sledovanie zmien žiadaných hodnôt výstupov fyzikálneho systému).

Realizácia uvedených krokov v module A bezprostredne ovplyvňuje činnosť diagnostického systému, pretože výstup riadenia (riadiaci zásah $\mathbf{u}(k)$) sú spolu s meranými výstupmi $\mathbf{y}(k)$ (získanými zo snímačov) fyzikálneho systému vstupnými veličinami diagnostického systému.

Modul B zahŕňa kroky potrebné pre návrh a vytvorenie diagnostického systému, pričom pozostáva z nasledovných krokov:

B.1 Zostavenie chybového matematického modelu fyzikálneho systému s využitím modelu nominálneho systému. Tento krok je podmienený voľbou metódy diagnostiky chýb akčných členov alebo snímačov.

B.2 Výber metódy diagnostiky chýb akčných členov a snímačov, na základe ktorej bude navrhnutý diagnostický systém. Zvolená metóda je využitá pre návrh skupiny estimátorov, ktoré súčasne estimujú stavové veličiny fyzikálneho systému a chyby jednotlivých snímačov, resp. akčných členov. Estimované stavy sú použité pre generovanie rezíduí, ktoré sú dôležité pre detekciu a lokalizáciu chýb fyzikálneho systému.

B.3 Voľba a implementácia vhodnej metódy pre detekciu chýb. Z mnohých metód sme aplikovali GLR test, ktorý vo svojom návrhu vyžaduje znalosť strednej hodnoty a rozptylu jednotlivých rezíduí $\mathbf{r}(k)$, ktoré sú ovplyvnené šumom. Na základe rezíduá $\mathbf{r}(k)$ je určená hodnota funkcie detekcie $J(k)$. Rovnako je potrebné stanoviť prahovú hodnotu funkcie detekcie $J_{th}(k)$, po prekročení ktorej bude diagnostický systém generovať symptómy chyby. Symptómy chyby sú využité pre lokalizáciu chyby. V prípade online realizácie detekcie a lokalizácie je dôležitým predpokladom voľba správnej veľkosti pohyblivého okna M_d .

B.4 Funkčnosť diagnostického systému musí byť overená experimentami, ktoré simulujú chybu vybraného akčného člena alebo snímača. Overenie je vhodné vykonať s využitím simulačného modelu fyzikálneho systému.

B.5 Modifikácia zvoleného typu riadenia na riadenie s prispôbením sa vzniknutej chybe snímačov alebo akčných členov v zvolenej riadiacej štruktúre. V prípade

ak chyba nie je fatálna, takáto modifikácia zabezpečí splnenie cieľa riadenia aj napriek výskytu chyby vo fyzikálnom systéme. Takto modifikované riadenie zohľadní výskyt chyby vo fyzikálnom systéme a predíde sa náhlym zmenám riadiaceho zásahu $u(k)$ alebo dosiahnutiu hraničných hodnôt riadených fyzikálnych veličín (v závislosti od veľkosti a charakteru chyby).

Modul C pozostáva z krokov pre návrh supervízneho riadenia a jeho implementácie spolu s diagnostickým systémom v distribuovanom systéme riadenia. Tento modul tvoria nasledovné kroky:

C.1 Supervízne riadenie, ktorého úlohou je posúdenie stavu fyzikálneho systému na základe informácií získaných z diagnostického systému. Supervízne riadenie je založené na stavovom automate, ktorý je potrebné navrhnuť vzhľadom na charakter diagnostikovaného fyzikálneho systému. Supervízne riadenie rozširuje funkcionalitu diagnostického systému.

C.2 Implementácia diagnostického systému a supervízneho riadenia na technologickej a SCADA/HMI úrovni distribuovaného systému riadenia na KKUI s využitím vybudovanej sieťovej infraštruktúry (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/infdsr.php>).

V module C je implementovaná aj metodika riešenia úloh na projekte ALICE-CERN (doktorand bol počas doktorandského štúdia riešiteľom projektu: "Experiment ALICE na LHC v CERN-e: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach," 2016 - 2020).

Návrh diagnostického systému, ktorý je založený na meraní vibrácií diagnostického systému sme spracovali vo forme metodiky pozostávajúcej z viacerých krokov. Rovnako ako v prípade metodiky diagnostiky chýb založenej na matematickom modeli fyzikálneho systému sú kroky na zostavenie diagnostického systému pre meranie vibrácií zjednotené do troch modulov, pričom odlišnosť je iba v module B.

Modul B pozostáva z dvoch krokov potrebných pre návrh diagnostického systému:

B.1 Predspracovanie a filtrácia šumu signálu získaného z merania vibrácií. Pre odstránenie šumu je možné využiť dolnopásmový filter a pre potlačenie "leakage efektu" váhové okná [5].

B.2 Frekvenčná analýza upraveného vibrodiagnostického signálu s cieľom odhalenia chýb diagnostikovaného fyzikálneho systému. Pre posúdenie stavu fyzikálneho systému je dôležitým predpokladom vykonať experimenty s nominálnym systémom. Ďalšie frekvenčné analýzy sú porovnané a vyhodnotené na základe výsledkov získaných z experimentu s nominálnym systémom.

V dizertačnej práci sú jednotlivé kroky metodiky založenej na matematickom modeli alebo nameraných vibrácií fyzikálneho systému spracované vo forme modelových scenárov, pričom v tomto článku je uvedený Scenár 1 a Scenár 4.

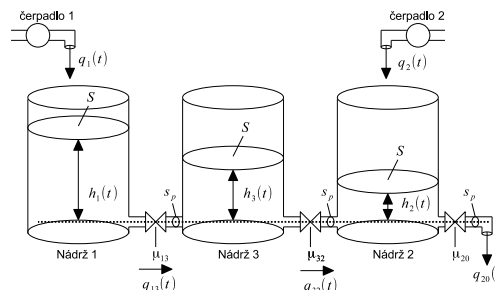
IV. SCENÁR 1: DIAGNOSTIKA CHÝB SNÍMAČOV A AKČNÝCH ČLENOV PRE SIMULAČNÝ MODEL HYDRAULICKÝ SYSTÉM

Model hydraulického systému je využívaný v mnohých publikáciách autormi pre overenie metód riadenia a diagnostiky chýb fyzikálnych systémov [1], [6] [7]. Uvedený fyzikálny systém bol využitý v dizertačnej práci na overenie krokov, ktoré sú obsiahnuté v moduloch A, B navrhutej metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na jeho matematickom modeli.

A. Návrh riadenia nominálneho systému

Pre návrh riadenia nominálneho systému je potrebné poznať systémový opis fyzikálneho systému a na jeho základe zostaviť matematický model s využitím analytickej identifikácie.

Uvažovaný hydraulický systém pozostáva z troch identických valcových nádrží (Obr. 1), ktoré sú navzájom v interakcii. Do prvej a druhej nádrže sú privedené vstupné prietoky $q_1(t)$ a $q_2(t)$. Kvapalina vyteká z druhej nádrže s prietokom $q_{20}(t)$. Sledovanými výstupmi systému sú výšky hladín $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$. Označenie použitých parametrov je uvedené v Tab. I.



Obr. 1. Schematické znázornenie hydraulického systému tri nádrže v interakcii [7]

Tab. I
PARAMETRE A FYZIKÁLNE VELIČINY HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU TRI NÁDRŽE V INTERAKCII

prierez nádrží	S	$0.0154[\text{m}^2]$
prierez prietokových otvorov	s_p	$5 \times 10^{-5}[\text{m}^2]$
koefficient prietoku - 1. nádrž	μ_{13}	0.5
koefficient prietoku - 3. nádrž	μ_{32}	0.5
koefficient prietoku - 2. nádrž	μ_{20}	0.675
vstupný prietok - 1. nádrž	$q_1(t)$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
vstupný prietok - 2. nádrž	$q_2(t)$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
výstupný prietok - 2. nádrž	$q_{20}(t)$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
výška hladiny - 1. nádrž	$h_1(t)$	[m]
výška hladiny - 2. nádrž	$h_2(t)$	[m]
výška hladiny - 3. nádrž	$h_3(t)$	[m]

A.1 Zostavenie matematického modelu nominálneho systému

Na základe systémového opisu (Obr. 1) a bilančných rovníc je zostavený matematický model hydraulického systému v tvare nelineárnych diferenciálnych rovníc:

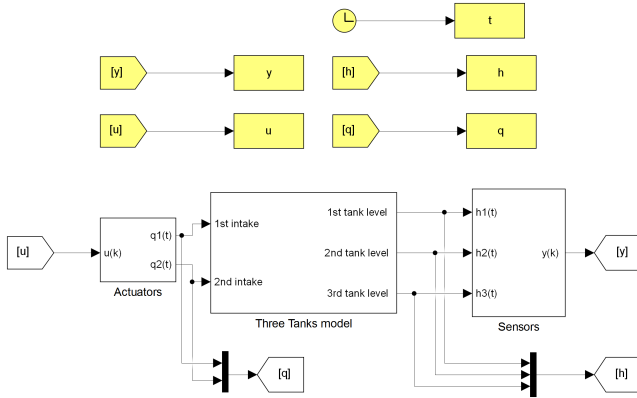
$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{S} (q_1(t) - q_{13}(t)) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{S} (q_2(t) + q_{32}(t) - q_{20}(t)) \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{1}{S} (q_{13}(t) - q_{32}(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

za predpokladu, že $h_1(t) > h_3(t) > h_2(t)$.

Prietok kvapaliny medzi nádržami $q_{13}(t), q_{32}(t), q_{20}(t)$ je možné s využitím Torriceliiho zákona vyjadriť:

$$\begin{aligned} q_{13}(t) &= \mu_{13} s_p \sqrt{2g |h_1(t) - h_3(t)|} \\ q_{32}(t) &= \mu_{32} s_p \sqrt{2g |h_3(t) - h_2(t)|} \\ q_{20}(t) &= \mu_{20} s_p \sqrt{2gh_2(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

Nelineárny matematický model (1) je implementovaný v simulačnom prostredí Simulink a jeho programová schéma pre simulačný model je znázornená na Obr. 2.



Obr. 2. Simulačný model hydraulického systému tri nádrže v interakcii [2]

Matematický model hydraulického systému (1) je možné zapísať v stavovom priestore ako sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc s algebraickou rovnicou pre vyjadrenie výstupu hydraulického systému:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), t), \end{aligned} \quad (3)$$

kde stavový vektor $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$:

$$\mathbf{x}(t) = [h_1(t), h_2(t), h_3(t)]^T = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T \quad (4)$$

vektor vstupov $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^q$:

$$\mathbf{u}(t) = [q_1(t), q_2(t)]^T = [u_1(t), u_2(t)]^T \quad (5)$$

a vektor výstupu $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^m$:

$$\mathbf{y}(t) = [h_1(t), h_2(t), h_3(t)]^T \quad (6)$$

Za účelom návrhu stavového riadenia hydraulického systému je jeho nelineárny model zapísaný v stavovom priestore (3) linearizovaný rozvojom do Taylorovho rádu v okolí zvoleného pracovného bodu $\mathbf{PB} = [\mathbf{x}_{PB}, \mathbf{u}_{PB}]$, kde:

$$\mathbf{x}_{PB} = [0.4, 0.2, 0.3]^T \text{ m,}$$

$$\mathbf{u}_{PB} = [3.5018, 3.1838]^T 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

a následne diskretizovaný pri perióde vzorkovania $T_{vz} = 1\text{s}$. Výsledkom je lineárny odchýlkový model hydraulického systému v tvare diskrétného stavového opisu:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \Delta \mathbf{u}(k), \\ \Delta \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (7)$$

kde \mathbf{A}_d je matica dynamiky a \mathbf{B}_d je matica vstupu. Maticu výstupu odchýlkového modelu uvažujeme $\mathbf{C} = \mathbf{I}_3$, kde \mathbf{I}_3 je jednotková matica rozmeru 3×3 .

Diskrétny stavový opis (7) dochýlkového modelu hydraulického systému využijeme pre návrh algoritmov riadenia nominálneho systému [2].

A.2 Návrh optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky

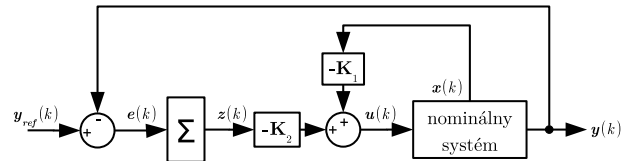
Optimálne stavové LQ riadenie nominálneho systému s integrátorom regulačnej odchýlky je navrhnuté na základe diskrétného lineárneho odchýlkového stavového opisu (7) hydraulického systému.

Návrh algoritmu riadenia rešpektuje definovaný cieľ riadenia, ktorým je zmena požadovaných výšok hladín \mathbf{y}_{ref} v okolí zvoleného pracovného bodu.

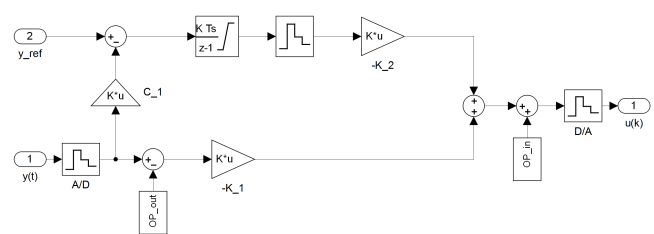
Algoritmus optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky $\mathbf{z}(k)$ je vyjadrený zákonom riadenia:

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}(k), \quad (8)$$

Toto riadenie je implementované v zvolenej riadiacej štruktúre (Obr. 3) do prostredia *MATLAB/Simulink* (Obr.4).



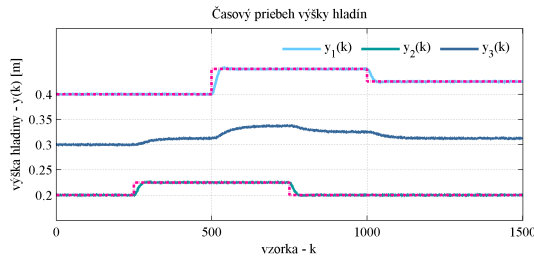
Obr. 3. Riadiaca štruktúra optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom



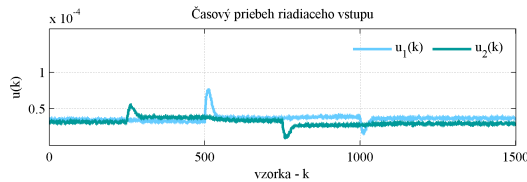
Obr. 4. Simulačná schéma LQ riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky v prostredí *Simulink*

Výsledky riadenia s cieľom sledovania zmien požadovaných výšok hladín v prvej a druhej nádrži \mathbf{y}_{ref} sú znázornené na Obr.5 a Obr.6.

Uvedené typy riadenia nominálneho systému sú d'alej využité pre nastavenie prahových hodnôt v detekcii chýb akčných členov alebo snímačov nelineárneho simulačného



Obr. 5. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - stavové LQ riadenie s integrátorom



Obr. 6. Časový priebeh riadiaceho vstupu - stavové LQ riadenie s integrátorom

modelu hydraulického systému. Rovnako pre správnu činnosť diagnostického systému je nevyhnutným predpokladom správny návrh riadenia fyzikálneho systému.

B. Návrh a simulčné overenie diagnostického systému

Návrh diagnostického systému pre odhalenie a estimáciu chýb akčných členov a snímačov simulčného nelineárneho modelu hydraulického systému je založený na skupine filtrov pre estimovanie stavov a chýb snímačov fyzikálneho systému. S cieľom využitia diagnostického systému simulčného modelu aj pre detekciu a estimáciu chýb akčných členov je v II. časti dizertačnej práce (Scenár 1) uvedená modifikácia algoritmu filtra pre estimovanie stavov a chýb fyzikálneho systému.

Pre návrh diagnostického systému je potrebné najprv uviesť chybové modely hydraulického systému tri nádrže v interakcii.

B.1 Chybový matematický model hydraulického systému

Vo všeobecnosti pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb snímačov fyzikálneho systému je využitý stochastický chybový model hydraulického systému v tvare:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}^T \mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_s \mathbf{f}_s(k) + \mathbf{o}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

kde vektor $\mathbf{f}_s(k) \in \mathbb{R}^p$ pozostáva z hodnôt chýb snímačov fyzikálneho systému.

Pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb akčných členov hydraulického systému bude využitý, podľa [8], stochastický chybový model fyzikálneho systému v tvare:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_a \mathbf{f}_a(k) + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}^T \mathbf{x}(k) + \mathbf{o}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

kde $\mathbf{F}_a \in \mathbb{R}^{n \times q}$ je matica chýb akčných členov fyzikálneho systému. Vektor $\mathbf{f}_a(k) \in \mathbb{R}^q$ pozostáva z hodnôt chýb akčných členov fyzikálneho systému.

Uvedené chybové matematické modely (9), (10) sú použité pre modifikáciu a návrh filtrov na estimovanie stavov a chýb snímačov alebo akčných členov simulčného modelu hydraulického systému.

B.2 Návrh skupiny filtrov pre estimovanie stavov a chýb simulčného modelu hydraulického systému

Navrhovaný diagnostický systém simulčného modelu hydraulického systému pozostáva z päťice filtrov, ktoré možno vo všeobecnosti vyjadriť:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_l(k+1|k) &= \mathbf{T}_l \bar{\mathbf{A}}_l \hat{\mathbf{x}}_l(k|k-1) + \mathbf{T}_l \bar{\mathbf{B}}_l \mathbf{u}(k) + \\ &+ \mathbf{L}_l(k) (\mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{C}}_l \hat{\mathbf{x}}_l(k|k-1)) + \\ &+ \mathbf{N}_l \mathbf{y}(k+1), \end{aligned} \quad (11)$$

kde pre tri snímače výšky hladín simulčného modelu $l = 1, 2, 3$ a pre dva akčné členy $l = 4, 5$. V prípade filtrov, ktoré sú navrhnuté za účelom detekcie a estimácie chýb snímačov, sú jednotlivé matice filtra a spätnoväzobné zosilnenie \mathbf{L}_l , $l = 1, \dots, 3$ vypočítané s využitím stochastického chybového modelu (9) na základe algoritmu znázorneného na Obr. 7.

Návrh filtra pre estimovanie stavov a chýb akčných členov fyzikálneho systému je spracovaný v tvare vývojového diagramu (Obr. 8).

Filter pre estimovanie stavov fyzikálneho systému a chýb snímačov alebo akčných členov je implementovaný do simulčného prostredia *MATLAB/Simulink* (Obr. 9), pričom použité kovariančné matice šumov $\mathbf{Q}_v = 0.0005 \mathbf{I}_3$, $\mathbf{R}_o = 0.001 \mathbf{I}_3$ sú zvolené pre všetky filtre rovnako.

Estimované stavy získané skupinou filtrov sú využité pre detekciu a lokalizáciu chýb simulčného modelu hydraulického systému.

B.3 Detekcia a lokalizácia chýb simulčného modelu hydraulického systému

Detekcia chýb je založená na estimovaných stavoch z navrhutej skupiny filtrov. Detekcia chyby je založená na generovaných rezíduách v tvare:

$$\mathbf{r}_l(k) = \mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}_l(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{C}}_l \hat{\mathbf{x}}_l(k|k-1), \quad (12)$$

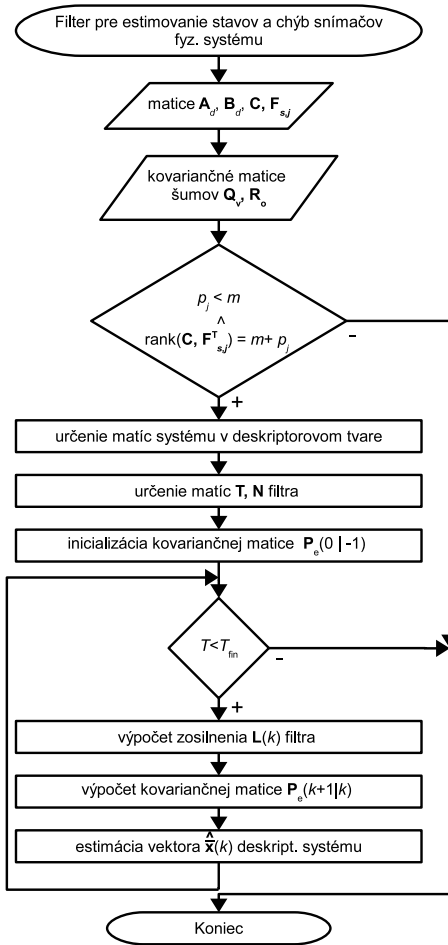
pre $l = 1, \dots, 5$.

Generované rezíduá sú použité vo funkciách detekcie J_1, \dots, J_5 , ktoré využívajú kľzavé okno M_d s nastavenou veľkosťou $M_d = 15$. Prahové hodnoty $J_{1,th}, \dots, J_{5,th}$ sú nastavené na základe časových priebehov funkcií detekcie J_1, \dots, J_5 získaných zo simulácie riadenia nominálneho systému (Obr. 10).

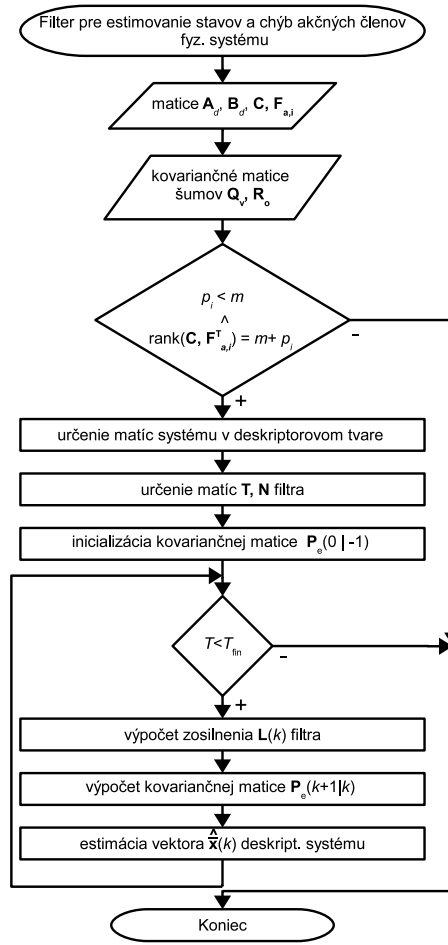
Funkcie detekcie sú využité pre generovanie symptómov s_l , $l = 1, \dots, 5$. Chyba je lokalizovaná na základe generovaných symptómov podľa tabuľky Tab. II.

Návrh diagnostického systému je implementovaný do prostredia *Simulink* v štruktúre ilustrovanej na Obr. 11.

Navrhutý diagnostický systém je simulčne overený v prostredí *Simulink* s využitím algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom [2].



Obr. 7. Vývojový diagram pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb snímačov simulačného modelu hydraulického systému



Obr. 8. Vývojový diagram pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb akčných členov simulačného modelu hydraulického systému

Tab. II

LOKALIZÁCIA CHÝB SNÍMAČOV A AKČNÝCH ČLENOV SIMULAČNÉHO MODELU HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU TRI NÁDRŽE NA ZÁKLADE GENEROVANÝCH SYMPTÓMOV DIAGNOSTICKÝM SYSTÉMOM

	bez chyby	chyba 1. sn	chyba 2. sn	chyba 3. sn	chyba 1. ač	chyba 2. ač	viac chýb
s ₁	0	0	1	1	1	1	1
s ₂	0	1	0	1	1	1	1
s ₃	0	1	1	0	1	1	1
s ₄	0	1	1	1	0	1	1
s ₅	0	1	1	1	1	0	1

B.4 Simulačné overenie diagnostického systému

Simulačné overenie navrhnutého diagnostického systému je realizované s uvažovaním dvoch typových chýb, ktoré sa počas riadenia fyzikálneho systému môžu vyskytnúť.

Prvou je multiplikatívna chyba 1. akčného člena (strata zosilnenia na 50% výkonu), ktorá sa vyskytne v čase $T = 600s$. Druhou chybou je výskyt náhlej aditívnej chyby snímača v druhej nádrži (sníma hodnotu s konštantou chybou $-0.05m$), ktorá nastala v $T_f = 600s$.

V simulačnom modeli uvažujeme, že výšky hladín v nádržach $h_1(t), h_2(t), h_3(t)$ a vstupné prietoky $q_1(t), q_2(t)$ sú spo-

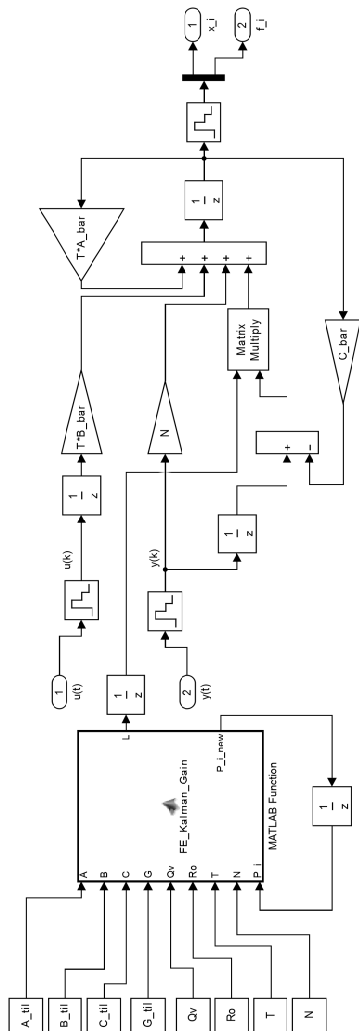
jité fyzikálne veličiny. Riadiaci vstup $u_1(k), u_2(k)$ vypočítaný zvoleným algoritmom riadenia a merané výstupy systému $y_1(k), y_2(k), y_3(k)$, ktoré sú výsledkom A/D prevodu spojitých fyzikálnych veličín $h_1(t), h_2(t), h_3(t)$, sú diskrétné veličiny.

Simulačné overenie diagnostického systému pre cieľ sledovania zmien výšky hladín y_{ref} v 1. a 2. nádrži hydraulického systému je realizované s využitím stavového optimálneho LQ riadenia s integrátorom .

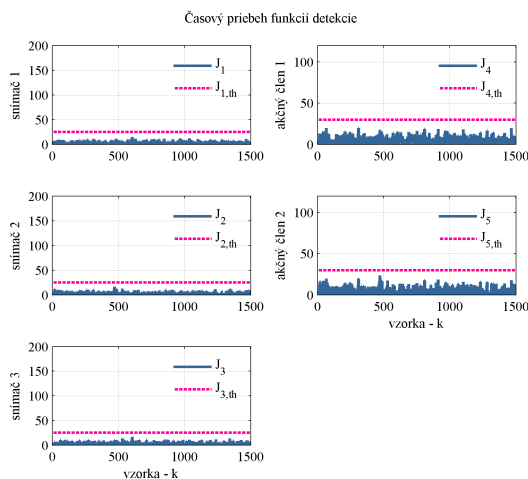
V hydraulickom systéme troch nádrží sme simulovali chybu 1. akčného člena. Časové priebehy výstupu, riadiaceho vstupu, funkcií detekcie a estimácie chyby simulačného modelu sú znázornené na Obr. 12 - Obr. 15.

Taktiež bola funkčnosť navrhnutého diagnostického systému simulačne overená pre prípad výskytu chyby 2. snímača hydraulického systému a dosiahnuté výsledky v tvare časových priebehov sú znázornené na Obr. 16 - Obr. 18

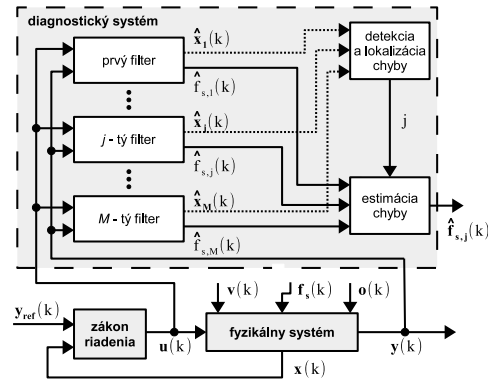
Dosiahnuté výsledky simulácií v porovnaní s [1], [7], [9] preukazujú, že navrhnutý diagnostický systém simulačného modelu hydraulického systému je možné využiť pre diagnostiku chýb snímačov a akčných členov fyzikálneho systému.



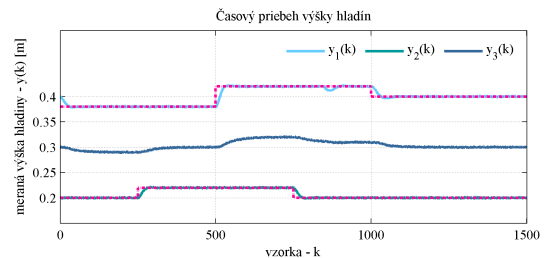
Obr. 9. Filter pre estimovanie stavov a chýb snímačov alebo akčných členov implementovaný v prostredí Simulink



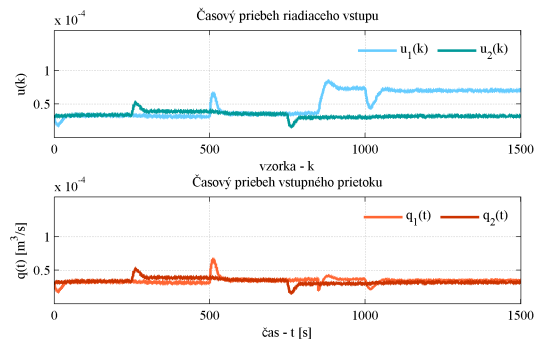
Obr. 10. Časový priebeh funkcií detekcie - nominálny systém



Obr. 11. Schematické znázornenie štruktúry navrhovaného diagnostického systému



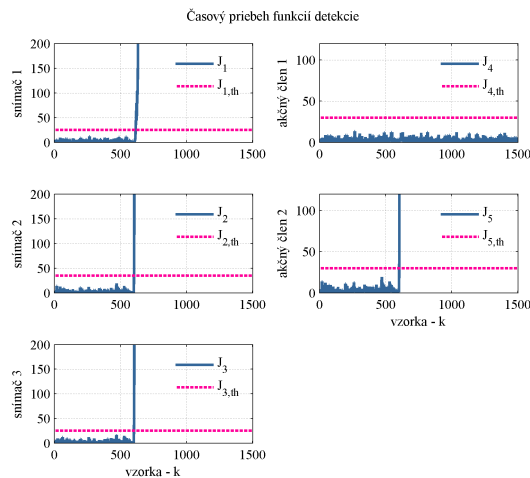
Obr. 12. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - chyba 1. akčného člena



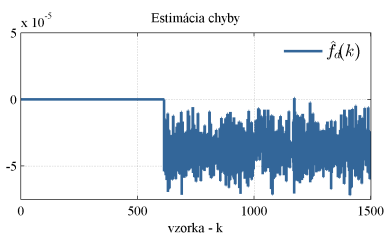
Obr. 13. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - chyba 1. akčného člena

B.5 Návrh prispôsobenia sa riadenia chybám akčných členov a snímačov simuláčného modelu hydraulický systém

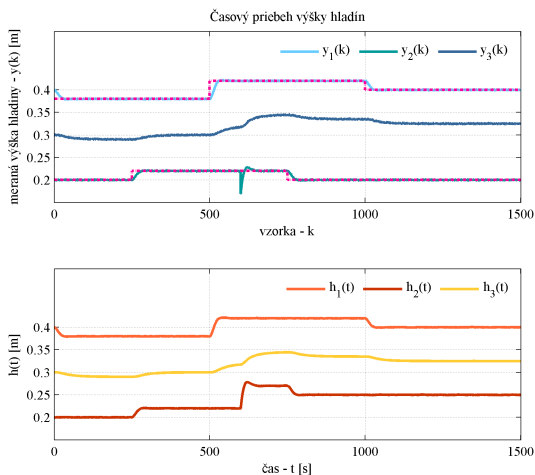
Cieľom prispôsobenia sa riadenia fyzikálneho systému vzniknutým chybám snímačov $f_s(k)$ a akčných členov $f_a(k)$ je eliminovať ich vplyv na riadený model fyzikálneho systému tak, aby aj po ich výskyte bol dosiahnutý cieľ riadenia [1], [10]. V dizertačnej práci v Scenári 1 pre tento cieľ uvádzame úpravu vybraných algoritmov riadenia za účelom ich prispôsobenia sa vzniknutým chybám akčných členov alebo snímačov, ktorých miesto vzniku a veľkosť získame na základe ich lokalizácie a estimácie z diagnostického systému. V tomto článku uvidíme úpravu algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom pre prispôsobenie sa vzniknutým chybám snímačov a akčných členov fyzikálneho systému.



Obr. 14. Časový priebeh funkcií detekcie - chyba 1. akčného člena



Obr. 15. Časový priebeh skutočnej a estimovanej hodnoty chyby - chyba 1. akčného člena

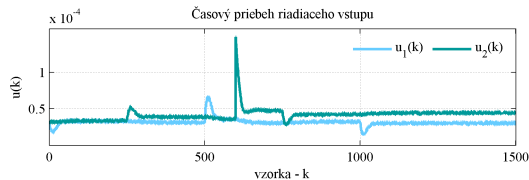


Obr. 16. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - chyba 2. snímača

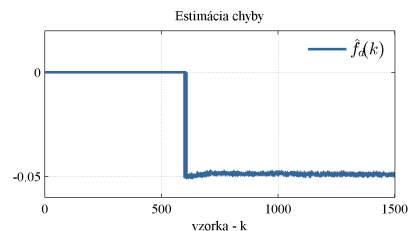
Zákon stavového LQ riadenia ovplyvnený vzniknutými chybami akčných členov možno vyjadriť:

$$\mathbf{u}_f(k) = -\mathbf{K}_{fb}\mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_a(k), \quad (13)$$

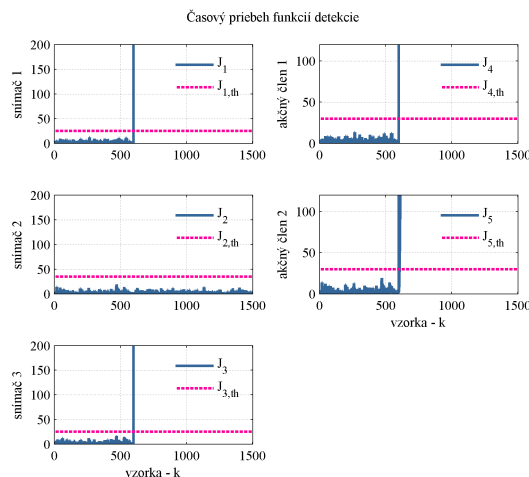
čo sa prejaví bezprostredne po vzniku chýb na stavových



Obr. 17. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - chyba 2. snímača



Obr. 18. Časový priebeh estimovanej hodnoty chyby - chyba 2. snímača



Obr. 19. Časový priebeh funkcií detekcie - chyba 2. snímača

veličinách nasledovne:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_f(k+1) &= \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d\mathbf{u}_f(k) = \\ &= \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d(-\mathbf{K}_{fb}\mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_a(k)), \end{aligned} \quad (14)$$

Za predpokladu, že fyzikálny systém ovplyvňuje chyba i -tého akčného člena a za predpokladu, že $\mathbf{F}_a = \mathbf{B}_d$, stavovú rovnicu (14) možno po úprave vyjadriť:

$$\mathbf{x}_f(k+1) = \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) - \mathbf{B}_d\mathbf{K}_{fb}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_{a,i}\mathbf{f}_{a,i}(k) \quad (15)$$

Zákon riadenia rozšírime o aditívnu zložku:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_f(k) + \mathbf{u}_{ad}(k), \quad (16)$$

ktorá má eliminovať vplyv chyby i -tého akčného člena a výpočet $\mathbf{u}_{ad}(k)$ možno odvodiť dosadením (16) do stavovej

rovnice:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) = \\ & \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_f(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{ad}(k) = \\ & = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) - \mathbf{B}_d \mathbf{K}_{fb} \mathbf{x}(k) + \\ & + \mathbf{F}_{a,i} f_{a,i}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{ad}(k), \end{aligned} \quad (17)$$

Aditívnu zložku v zákone riadenia určíme na základe podmienky:

$$\mathbf{F}_{a,i} f_{a,i}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{ad}(k) \stackrel{!}{=} \mathbf{0} \quad (18)$$

Podľa [7], v prípade ak počet vstupov systému q sa rovná počtu jeho stavov ($q = n$), je možné vypočítať aditívnu zložku riadenia nasledovne:

$$\mathbf{u}_{ad}(k) = -\mathbf{B}_d^{-1} \mathbf{F}_{a,i} \hat{f}_{a,i}(k) \quad (19)$$

V prípade ak počet vstupov q fyzikálneho systému je menší ako počet jeho stavov ($q < n$), tak využijeme SVD dekompozíciu matice \mathbf{B}_d :

$$\mathbf{B}_d = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (20)$$

a na základe jej výsledku vyjadríme výpočet aditívnej zložky riadenia:

$$\mathbf{u}_{ad}(k) = -\mathbf{V} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{F}_{a,i} \hat{f}_{a,i}(k), \quad (21)$$

kde $\hat{f}_{a,i}(k)$ je estimovaná hodnota chyby i -tého akčného člena.

Úprava algoritmu riadenia spočíva v uvažovaní aditívnej zložky \mathbf{u}_{ad} pre elimináciu chyby i -tého akčného člena fyzikálneho systému v zákone riadenia optimálneho stavového LQ riadenia [1].

Odvođený zákon optimálneho stavového LQ riadenia s prispôbením sa vzniknutým chybám akčných členov sme implementovali do prostredia *Simulink* a simulačne overili s využitím simulačného modelu hydraulického systému. Výsledky riadenia s prispôbením sa vzniknutej chybe 1. akčného člena hydraulického systému (rovnaká chyba ako v prípade overenia diagnostického systému) sú znázornené na Obr. 20, Obr. 21.

Pre porovnanie uvádzame aj kvantitatívne porovnanie optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom bez a s prispôbením sa vzniknutej chybe akčný členov, pričom je realizované s využitím normy regulačnej odchýlky:

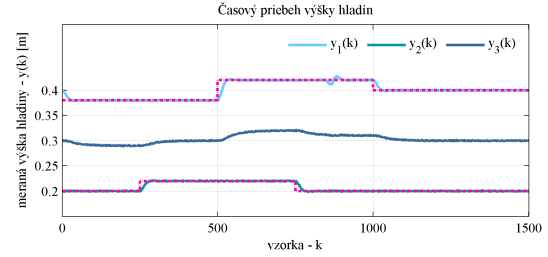
$$\|\mathbf{e}\| = \sqrt{\sum_{k=0}^T \mathbf{e}^2(k)} = \sqrt{\sum_{k=0}^T (\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{y}(k))^2} \quad (22)$$

Kvantitatívne vyhodnotenie optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom a prispôbením sa chybe 1. akčného člena pre cieľ sledovania zmien požadovanej výšky hladín v 1. a 2. nádrži je uvedené v Tab. III.

Dosiahnuté výsledky zo simulačného overenia navrhnutého diagnostického systému a riadenia s prispôbením sa chybám akčných členov sú porovnateľné s časovými priebehmi riadenia a výšky hladín s uvažovaním chyby 1. akčného člena hydraulického systému uvedené v publikácii [7].

Tab. III
NORMA CHYBY OPTIMÁLNEHO STAVOVÉHO LQ RIADENIA S INTEGRÁTOROM - CHYBA 1. AKČNÉHO ČLENA

	bez prispôsobenia	s prispôbením
$\ \mathbf{e}\ $	0.168409042322904	0.165095281594631



Obr. 20. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - optimálne stavové LQ riadenie s integrátorom - chyba 1. akčného člena

Vybrané algoritmy riadenia sú upravené s využitím aditívnej zložky $\mathbf{u}_{ad}(k)$ v zákonoch riadenia aj pre prispôbenie sa v prípade výskytu chýb snímačov fyzikálneho systému.

Úprava algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s prispôbením sa chybe j -tého snímača $f_{s,j}$, podľa [1], spočíva v odvodení a využití aditívnej zložky \mathbf{u}_{ad} v zákone riadenia ovplyvneným chybou snímača:

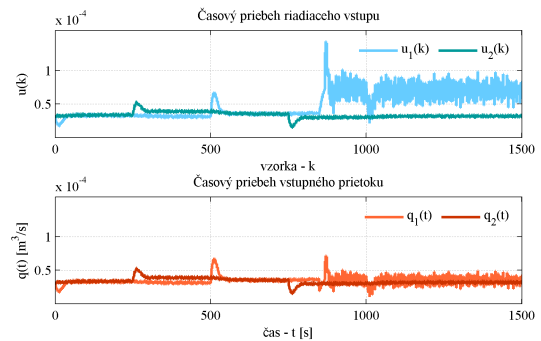
$$\begin{aligned} \mathbf{u}_f(k) &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}_f(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_f(k) = \\ & -\mathbf{K}_1 (\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k)) - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_f(k), \end{aligned} \quad (23)$$

príčom integrátor \mathbf{z}_f ovplyvnený chybou snímača $f_{s,j}$, ktorá sa vyskytla v systéme v kroku k , môže byť vyjadrený:

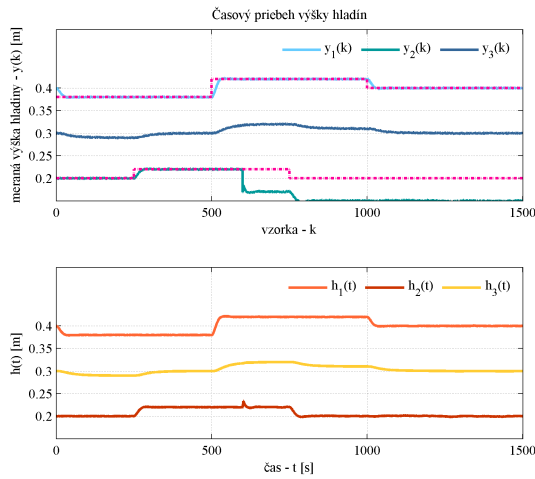
$$\begin{aligned} \mathbf{z}_f(k+1) &= \mathbf{z}(k) + T_s [\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_f(k)] = \\ & = \mathbf{z}(k) + T_s [\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{C}_1 (\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k))] = \\ & = \underbrace{\mathbf{z}(k) + T_s [\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(k)]}_{\mathbf{z}(k+1)} - T_s \mathbf{C}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k) \end{aligned} \quad (24)$$

Po M krokoch možno integrátor \mathbf{z}_f vyjadrený v (24) zapísať:

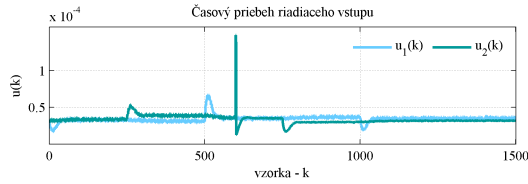
$$\mathbf{z}_f(k+M) = \mathbf{z}(k+M) + \tilde{\mathbf{f}}(k+M), \quad (25)$$



Obr. 21. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - optimálne stavové LQ riadenie s integrátorom - chyba 1. akčného člena



Obr. 22. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - chyba 2. snímača



Obr. 23. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - chyba 2. snímača

kde $\tilde{\mathbf{f}}(k)$ vyjadruje integrál chyby j -tého snímača $f_{s,j}$ a možno ho iteratívne vypočítať:

$$\tilde{\mathbf{f}}(k) = \tilde{\mathbf{f}}(k - 1) - T_s \mathbf{C}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k - 1) \quad (26)$$

Eliminácia vplyvu chyby j -tého snímača $f_{s,j}$ modelu fyzikálneho systému v zákone riadenia je rovnako realizovaná s využitím aditívnej zložky \mathbf{u}_{ad} , pričom má tvar:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= \mathbf{u}_f(k) + \mathbf{u}_{ad}(k) = \\ &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k) \\ &= -\mathbf{K}_2 \mathbf{z}(k) - \mathbf{K}_2 \tilde{\mathbf{f}}(k) + \mathbf{u}_{ad}(k), \end{aligned} \quad (27)$$

a túto aditívnu zložku určíme opäť na základe podmienky:

$$-\mathbf{K}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k) - \mathbf{K}_2 \tilde{\mathbf{f}}(k) + \mathbf{u}_{ad}(k) \stackrel{!}{=} \mathbf{0}, \quad (28)$$

ktorú možno s využitím estimovaných hodnôt chyby $\hat{f}_{s,j}$ vyjadriť:

$$\mathbf{u}_{ad}(k) = \mathbf{K}_1 \mathbf{F}_{s,j} \hat{f}_{s,j}(k) + \mathbf{K}_2 \hat{\tilde{\mathbf{f}}}(k) \quad (29)$$

V prípade využitia optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom a prispôbením sa chybe snímača je meraná výška hladiny mimo jej požadovanej hodnoty (o veľkosť chyby pôsobiacej na 2. snímač), ale skutočná výška hladiny v 2. nádrži dosahuje požadovanú hodnotu (Obr. 22).

Výsledky simulačného overenia navrhnutého diagnostického systému a riadenia s prispôbením sa chybám snímačov sú porovnateľné s výsledkami uvedenými v [7].

Predstavený Scenár 1 bol zameraný na moduly A, B metodiky uvedenej v dizertačnej práci (kapitola 5 *Návrh metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na matematických modeloch*). V tomto článku bola pozornosť venovaná zostaveniu matematického modelu a riadenia nominálneho systému, návrhu algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom, návrhu diagnostického systému na základe skupiny filtrov a prispôbeniu navrhnutého algoritmu riadenia chybám akčných členov a snímačov. Zostavené algoritmy riadenia a diagnostiky chýb boli simulačne overené v prostredí *Simulink*. Časť výsledkov je prezentovaná v publikácii doktoranda [2].

V. SCENÁR 4: DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM PRE LABORATÓRNY MODEL 3-FÁZOVÝ MOTOR

Pre overenie navrhutej metodiky diagnostiky chýb fyzikálnych systémov, ktorá je založená na meraných dátach sme využili laboratórny model 3-fázového motora (Obr. 24). Pre tento model sme navrhli riadenie implementované v PLC a diagnostický systém, ktorého algoritmy sú realizované v technologickom PC. Informácie z riadenia a diagnostického systému sú využité na vyššej úrovni DSR pre účely vizualizácie a supervízneho riadenia. V Scenári 4 sú využité rôzne programové a technologické prostriedky. Laboratórny model 3-fázový motor je prezentovaný na web stránke <http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/mfm.php> a slúži vo výuke so zameraním na návrh algoritmov riadenia, ktoré možno implementovať v PLC.



Obr. 24. Experimentálne pracovisko s laboratórnym modelom 3-fázový motor

A. Návrh riadenia nominálneho systému

Pre správny návrh diagnostického systému musíme na začiatku vykonať rovnaké kroky ako v prípade využitia metód diagnostiky chýb, ktoré sú založené na matematickom modeli. Pre zostavenie matematického modelu urobíme, rovnako ako

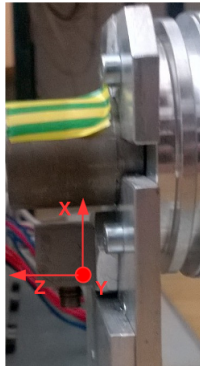
v predošlých scenároch, systémovú analýzu laboratórneho modelu 3-fázový motor.

Laboratórny model pozostáva z 3-fázového motora, ktorého vstup je riadený prostredníctvom frekvenčného meniča *Allen-Bradley Power Flex 40*, ktorý je prepojený s analógovými výstupmi PLC *Allen-Bradley Compact Logix L23E*. Riadiace PLC je rozšírené o vstupnú kartu pre *High Speed Counter*, čítač impulzov z IRC snímača, ktorý je namontovaný na hriadeľ motora. Generované impulzy z IRC snímača sú spracovávané v PLC pre určenie uhlovej rýchlosti ω_M otáčania hriadeľa 3-fázového motora na základe vzťahu:

$$\omega_M = \frac{2\pi m_{IRC}}{M_{IRC} T_{vz}}, \quad (30)$$

kde T_{vz} je perióda vzorkovania, M_{IRC} je počet impulzov IRC snímača na jednu otáčku a m_{IRC} je počet impulzov nameraných za jednu periódu vzorkovania T_{vz} . Komunikácia medzi PLC a technologickým PC je zabezpečená prostredníctvom programu *RSLinx* s využitím OPC protokolu.

Dáta získané pre účel vykonania vibrodiagnostiky laboratórneho modelu sú merané prostredníctvom akcelerometra v mieste prepojenia hriadeľa a IRC snímača (Obr. 25). Dáta z akcelerometra sú získané prostredníctvom meracej karty *National Instruments USB 4432* a *Data Acquisition toolbox-u* do prostredia *MATLAB*, kde ich spracovávame s využitím funkcií *Signal Processing toolbox-u*.

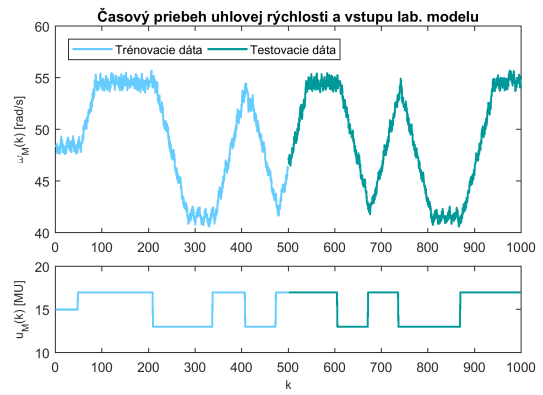


Obr. 25. Umiestnenie akcelerometra pre meranie vibrácií na laboratórnom modeli 3-fázový motor

Pre nameranie vhodných dát, potrebujeme navrhnuť riadenie nominálneho systému, ktoré zabezpečí rovnaké podmienky experimentu (rovnakú uhlovú rýchlosť ω_M). Pre návrh riadenia potrebujeme zostaviť matematický model nominálneho systému.

A.1 Zostavenie matematického modelu nominálneho systému

Vzhľadom na skutočnosť, že nepoznáme jednotlivé parametre laboratórneho modelu, ale poznáme rozsahy vstupných a výstupných hodnôt jeho fyzikálnych veličín, pre získanie modelu sme vykonali experimenty, ktoré sme využili na zostavenie matematického modelu. Pracovný bod, pre ktorý sme vykonali identifikáciu parametrov matematického modelu bol zvolený $\mathbf{PB} = [u_{PB}, \omega_{M,PB}] = [15, 48]$ pri perióde vzorkovania $T_{vz} = 0.01s$.



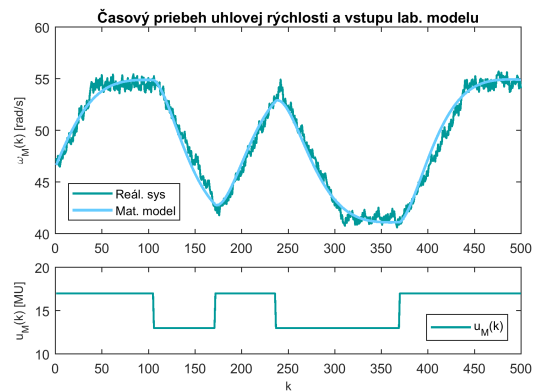
Obr. 26. Časový priebeh použitých tréningových a testovacích dát vstupného a výstupného signálu

Počas experimentálnej identifikácie parametrov matematického modelu bol motor budený pseudonáhodným binárnym signálom okolo zvoleného pracovného bodu. Odozva systému na pseudonáhodný vstupný signál je znázornená na Obr. 26.

Získané dáta pre experimentálnu identifikáciu boli rozdelené na sadu tréningových a testovacích dát. S využitím funkcií *System Identification toolbox-u* sme získali parametre matematického modelu nominálneho systému v ARMAX štruktúre, ktorý vyjadríme v tvare:

$$F_M(z) = \frac{b_{z,1}z^{-1} + b_{z,2}z^{-2}}{1 + a_{z,1}z^{-1} + a_{z,2}z^{-2}} + \frac{c_{z,1}z^{-1} + c_{z,2}z^{-2}}{1 + a_{z,1}z^{-1} + a_{z,2}z^{-2}} = \frac{B_z(z)}{A_z(z)} + \frac{C_z(z)}{A_z(z)} \quad (31)$$

Získaný matematický model bol overený s použitím testovacích dát a výsledok je znázornený na Obr. 27 a na základe dosiahnutých výsledkov bol tento matematický model využitý pre návrh riadenia nominálneho systému.



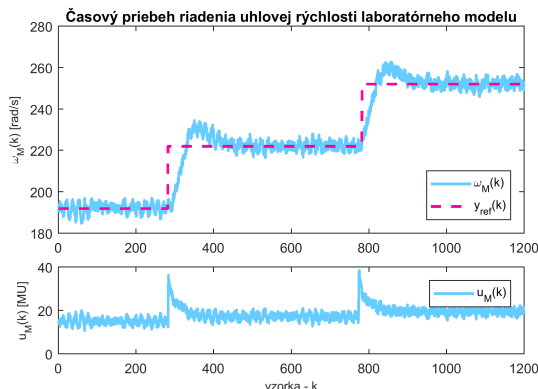
Obr. 27. Validácia matematického modelu získaného experimentálnou identifikáciou s využitím testovacích dát

Koeficienty polynómov $B_z(z^{-1})$, $A_z(z^{-1})$ ARMAX modelu (31) fyzikálneho systému, určené prostredníctvom experimentálnej identifikácie funkciou *armax*, využijeme pre účely návrhu riadenia nominálneho systému.

A.2 Návrh riadenia nominálneho systému pre účely implementácie do PLC

Vzhľadom na štruktúru laboratórneho modelu sme zvolili číslicové riadenie s využitím metódy rozloženia pólov, ktoré je možné navrhnuť z matematického modelu (31), ktorý sme získali experimentálnou identifikáciou a súčasne je vhodné pre implementáciu do PLC. Parametre číslicového riadenia sú získané z porovnania s referenčným polynómom $N_r(z)$, ktorého korene sme zvolili $z_r = [0.91, 0.92, 0.93, 0.94]$.

Časový priebeh číslicového riadenia sme overili pre cieľ riadenia v okolí pracovného bodu **PB** a výsledok je znázornený na Obr. 28.



Obr. 28. Časový priebeh riadenia uhlovej rýchlosti laboratórneho modelu 3-fázový motor

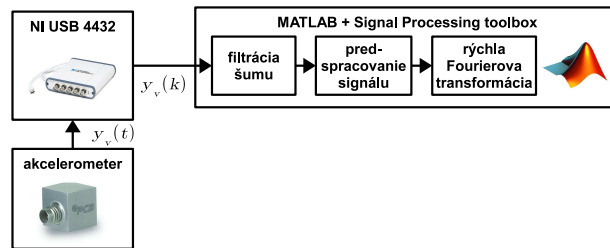
Navrhnuté číslicové riadenie využijeme pre cieľ riadenia do zvoleného **PB** za účelom zabezpečenia rovnakých podmienok pri meraní vibrácií laboratórneho modelu.

B. Návrh a simulačné overenie diagnostického systému

Diagnostický systém laboratórneho modelu je založený na číslicovom spracovaní, filtrácii a frekvenčnej analýze vibrodiagnostického signálu y_v , ktorý sme získali meraním zrýchlenia prostredníctvom trojosého akcelerometra v smere osi x (Obr. 25). Zrýchlenie je merané prostredníctvom karty NI USB 4432, ktorá je k technologickému PC pripojená USB rozhraním. Uvedená meracia karta disponuje aj vyrovnávacou pamäťou, ktorá umožňuje uchovávať zaznamenaná dáta, v prípade, ak ešte neboli odoslané do PC. Dáta sú z akcelerometra zbierané s odlišnou periódou vzorkovania, pri akej bol fyzikálny systém identifikovaný a riadený. Perióda vzorkovania pre meranie vibrácií je $T_{vz,M} = 0.001s$. Namerané dáta sú spracované a následne analyzované taktiež v prostredí *MATLAB* s využitím funkcií *Signal Processing toolbox*-u (Obr. 29).

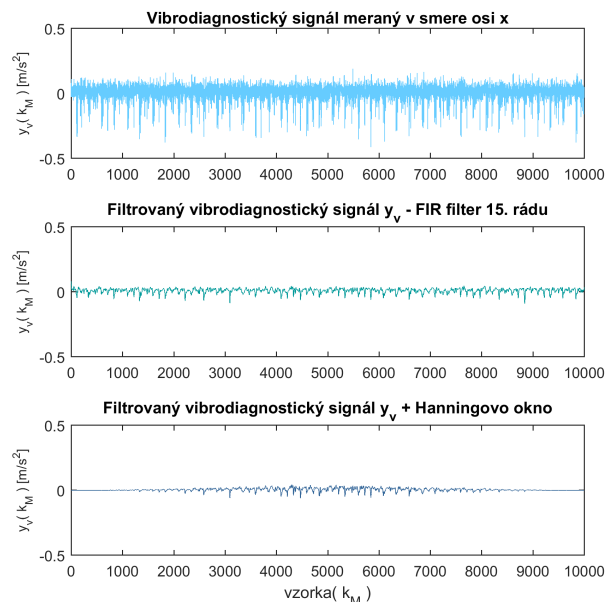
B.1 Filtrácia a predspracovanie vibrodiagnostického signálu

Pre účely frekvenčnej analýzy sme navrhnutý filtrovaný signál predspracovali s využitím Hanningovho okna s cieľom eliminovať tzv. leakage efekt. Pre tento účel bola využitá *MATLAB* funkcia *hanning*. Následne sme vibrodiagnostický signál y_v filtrovali prostredníctvom dolnopriepustného filtra s



Obr. 29. Schematické znázornenie merania a vyhodnotenia vibrácií laboratórneho modelu 3-fázový motor

cieľom odfiltrovania šumu z nameraného signálu a pre tento účel bola využitá funkcia *filtfilt*. Pre návrh dolnopriepustného FIR filtra sme na základe periódy vzorkovania určili jeho medznú frekvenciu f_m , rád filtra sme zvolili 15. Pre výpočet koeficientov FIR filtra sme využili funkciu *fir1*. Dosaiahnuté výsledky vo forme časových priebehu vibrodiagnostického signálu su znázornené na Obr. 30.



Obr. 30. Priebeh pôvodného, filtrovaného a predspracovaného vibrodiagnostického signálu

Predspracovaný a filtrovaný vibrodiagnostický signál y_v využijeme pre účely jeho frekvenčnej analýzy.

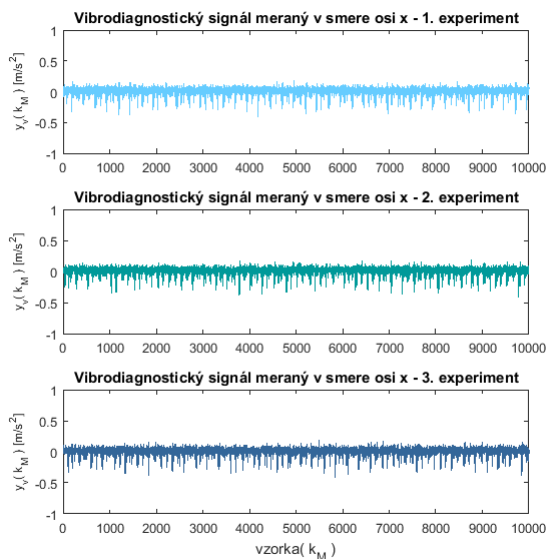
B.2 Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu

S predspracovaným a filtrovaným signálom sme vykonali frekvenčnú analýzu vibrodiagnostického signálu. Vo frekvenčnej analýze sa zameriame na nevyváženosť hriadeľa motora, ktorá by sa mala prejaviť pri frekvencii približne 8 Hz, čo reprezentuje uhlovú rýchlosť 48 rad/s.

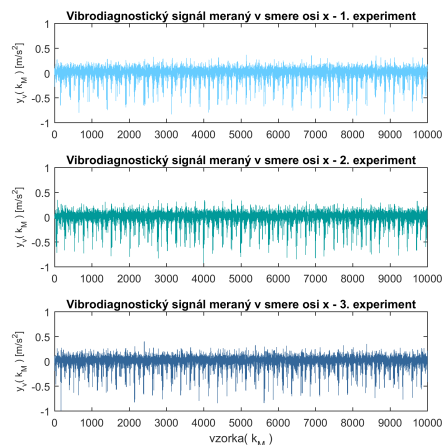
Vzhľadom na použitie trojosého akcelerometra, sme pre frekvenčnú analýzu využili signál nameraný v smere osi x. Výsledok frekvenčnej analýzy dát z experimentov získaných

meraním vibrácií (Obr. 31) riadeného laboratórneho modelu bez pridaného závažia na jeho hriadeli je znázornený na Obr. 32.

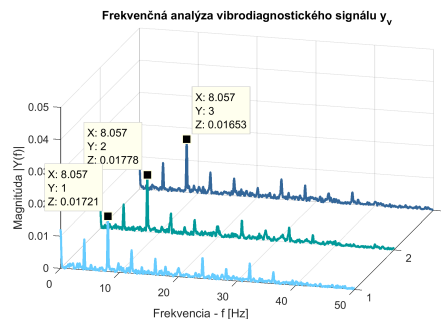
Ďalšia séria experimentov bola realizovaná s pridaným závažím o hmotnosti 230g na hriadeli motora a výsledok frekvenčnej analýzy vibrodiagnostických signálov (Obr. 33) získaných z vykonaných experimentov je znázornený na Obr. 34.



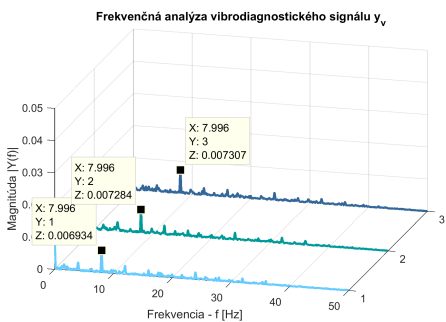
Obr. 31. Priebeh meraného vibrodiagnostického signálu počas jednotlivých experimentov - nominálny systém



Obr. 33. Priebeh meraného vibrodiagnostického signálu po jednotlivých experimentoch - nevyváženosť hriadeľa



Obr. 34. Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu jednotlivých experimentov - nevyváženosť hriadeľa



Obr. 32. Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu jednotlivých experimentov - nominálny systém

V prípade frekvenčnej analýzy je viditeľný dvojnásobný nárast amplitúdy pri frekvencii približne 8Hz, ktorá odpovedá otáčkovej frekvencii hriadeľa. Efekt nevyváženosti sa prejavil aj na časovom priebehu vibrodiagnostického signálu y_v .

Výsledky frekvenčnej analýzy sú odoslané do supervízneho riadenia, ktorého úlohou je upozorniť na výskyt chyby fyzikálneho systému a v prípade prekročenia prahovej hodnoty zastaviť jeho činnosť.

C. Implementácia diagnostického systému do distribuovaného systému riadenia

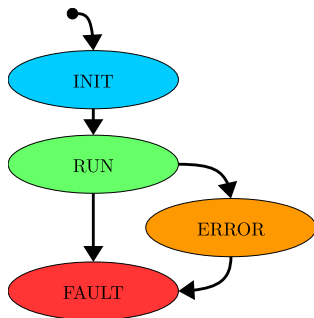
V Scenári 4 sme navrhli supervízne riadenie a spolu s diagnostickým systémom ho implementovali do distribuovaného systému riadenia. Tento modul sa však odlišuje od predošlého Scenáru 1 v návrhu supervízneho riadenia a v implementácii riadiaceho a diagnostického systému v DSR.

C.1 Návrh supervízneho riadenia

V tomto scenári pozostáva supervízne riadenie iba z dvoch chybových stavov, konkrétne zo stavu ERROR a FAULT (Obr. 35). Stav ERROR nastáva v prípade, ak sledovaná frekvencia hriadeľa $|Y_v(f)| \geq 0.01$, $f = 8Hz$. Tento stav poukazuje na výskyt chyby na hriadeli, ale činnosť systému nie je ešte pozastavená. V prípade, ak $|Y_v(f)| \geq 0.015$, $f = 8Hz$ supervízne zmení stav systému na FAULT a zastaví jeho činnosť, aby sa predišlo deštrukcii laboratórneho modelu.

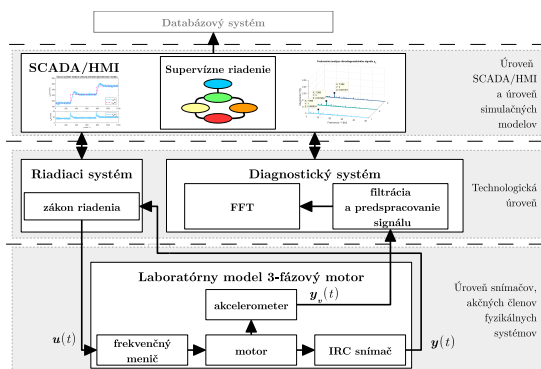
C.2 Realizácia diagnostického systému v distribuovanom systéme riadenia

V rámci DSR je vizualizácia dát a supervízne riadenie laboratórneho modelu implementované na jeho tretej



Obr. 35. Stavový diagram stavu laboratorného modelu 3-fázový motor

úrovni v prostredí *MATLAB/Simulink*. Komunikácia s PLC je zabezpečená s využitím OPC protokolu prostredníctvom programu *RSLinx*. Technologické PC, ktoré má na starosti meranie a frekvenčnú analýzu vibrodiagnostického signálu y_v , komunikuje na základe TCP/IP protokolu v klient/server architektúre. Dáta z riadenia alebo diagnostiky chýb môžu byť ďalej posielané na databázovú úroveň pre ich archiváciu. Schematické znázornenie uvedenej implementácie riadiaceho a diagnostického systému spolu so supervíznym riadením a vizualizáciou do DSR je znázornené na Obr. 36.



Obr. 36. Implementácia riadiaceho a diagnostického systému so supervíznym riadením v rámci DSR

VI. ZÁVER A DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

V dizertačnej práci sme sa venovali návrhu metodiky diagnostiky chýb fyzikálnych systémov, ktorá zahŕňa zostavenie matematického modelu a návrh riadenia nominálneho systému, návrh diagnostického systému na základe vhodne zvolenej metódy diagnostiky chýb a jeho implementácii do distribuovaného systému riadenia. S ohľadom na tento cieľ bola zostavená štruktúra práce, ktorá pozostáva zo siedmych kapitol.

Výsledky dosiahnuté počas riešenia dizertačnej práce možno rozdeliť do troch oblastí, konkrétne v oblasti modelovania, návrhu algoritmov riadenia a diagnostiky chýb fyzikálnych systémov. V rámci riešenia dizertačnej práce sme zostavili dva simulačné modely v prostredí *MATLAB/Simulink*, na základe ich nelineárnych matematických modelov, ktoré sme získali analytickou identifikáciou fyzikálnych systémov

Hydraulický systém 3 nádrže v interakcii a Gul'ôčka na ploche (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/gnk.php>). Pre laboratorné modely Hydraulický systém (dve nádrže bez interakcie, <http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>) a 3-fázový motor (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/mfm.php>) sme ich matematický opis získali experimentálnou identifikáciou na báze metódy najmenších štvorcov s využitím funkcií *ss* a *armax Signal Processing toolbox-u*. Získané matematické modely fyzikálnych systémov boli využité pre návrh algoritmov riadenia a diagnostiky chýb.

Medzi dosiahnuté výsledky v oblasti riadenia patria navrhnuté algoritmy optimálneho stavového LQ riadenia a prediktívneho riadenia [2],[3]. Tieto typy algoritmov boli overené na simulačných a reálnych fyzikálnych systémoch (Hydraulický systém 3 nádrže, Gul'ôčka na ploche [11], [12], laboratorný model Hydraulický systém pozostávajúci z dvoch nádrží bez interakcie) v zvolených riadiaciach štruktúrach pre definované ciele riadenia. Rovnako boli upravené s účelom ich prispôsobenia sa vzniknutým chybám snímačov alebo akčných členov. Taktiež bolo navrhnuté číslicové riadenie s využitím metódy rozmiestnenia pólov pre laboratorný model 3-fázový motor, ktoré bolo implementované priamo v riadiacom PLC.

V oblasti diagnostiky chýb boli navrhnuté diagnostické systémy pre dva simulačné a dva reálne fyzikálne systémy. Pre návrh diagnostického systému oboch hydraulických systémov sme využili navrhnutý algoritmus na báze filtra pre estimovanie stavov fyzikálneho systému a chýb jeho snímačov. Uvedený algoritmus sme modifikovali pre účely estimácie chýb akčných členov. Pre fyzikálny systém Gul'ôčka na ploche sme navrhli algoritmus estimátora s neznámym vstupom pre diagnostický systém na odhalenie chýb jeho akčných členov. Diagnostika chýb laboratorného modelu 3-fázový motor je realizovaná na základe frekvenčnej analýzy dát, získaných meraním jeho vibrácií, s využitím algoritmu rýchlej Fourierovej transformácie.

Pre tri fyzikálne systémy (Gul'ôčka na ploche, laboratorný model Hydraulický systém, laboratorný model 3-fázový motor) sme navrhli supervízne riadenie v tvare stavového automatu, ktorého úlohou je na základe informácií získaných z riadenia a diagnostického systému posúdiť stav monitorovaného fyzikálneho systému. V prípade reálnych laboratorných modelov sme túto komunikáciu implementovali s využitím OPC a TCP/IP komunikačného protokolu, pričom bol riadiaci, diagnostický systém a supervízne riadenie implementované na najnižších troch úrovniach DSR na KKUI.

Využitie reálne laboratorné modely tvoria experimentálne pracovisko, ktoré je možné využiť pre overenie algoritmov modelovania, riadenia a diagnostiky chýb snímačov alebo akčných členov na základe navrhnujetej metodiky pre diagnostiku chýb modelov fyzikálnych systémov. Dosiahnuté výsledky sú spracované v štyroch vytvorených modelových scenároch.

POĎAKOVANIE

Dizertačná práca bola riešená v rámci nasledujúcich projektov:

- projekt **Univerzitný vedecký park Technicom pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií**, kód ITMS:26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1), (2013 - 2015)
- projekt **Univerzitný vedecký park Technicom pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií - II.fáza**, kód ITMS:313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, (2015 - 2017), Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1, PP7), (2015 - 2017)
- projekt KEGA č.001TUKE-4/2015, **CyberLabTrainSystem - demonštrátor a trenážer informačno-riadiaceho systému - inovácia** (2015 - 2017)
- grant FEI TUKE 2015-33 s názvom **Výskumné laboratórium nelineárnych podaktuovaných systémov** (Research laboratory for nonlinear underactuated systems), (1/2017 - 12/2017)
- projekt ALICE KE FEI TUKE (0222/2016 - 2/2016-DOT) s názvom **Experiment ALICE na LHC v CERN: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach**, (2016-2020)

REFERENCES

- [1] NOURA, H., THEILLIOL, D., PONSART, J.-C., a CHAMSEDDINE, A. *Fault-tolerant control systems: Design and practical applications*. Springer Science & Business Media, 2009. ISBN 978-1-84882-653-3.
- [2] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Sensors fault diagnosis algorithm design of a hydraulic system. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 17(2):30-37, 2017. ISSN 1335-8243.
- [3] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Intelligent positioning plate predictive control and concept of diagnosis system design. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 15(1-2):1-9, 2017. ISSN 1339-2972.
- [4] JADLOVSKÝ, J., JADLOVSKÁ, A., JADLOVSKÁ, S., KOPČÍK, M., ČABALA, J., ORAVEC, M., VOŠČEK, D., TKÁČIKČÍK, M., CHOCHULA, P., a PINAZZA, O. Communication architecture of the detector control system for the inner tracking system. strany 1930-1933, 2017. ISBN 978-3-95450-193-90.
- [5] KREIDL, M. a ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN - technická literatúra, 2006, 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [6] DING, S. *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 2008. ISBN 978-3-540-76303-1.
- [7] THEILLIOL, D., NOURA, H., a PONSART, J.-C. Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy. *ISA transactions*, 41(3): 365-382, 2002. ISSN 0019-0578.
- [8] WANG, Z., RODRIGUES, M., THEILLIOL, D., a SHEN, Y. Actuator fault estimation observer design for discrete-time linear parameter-varying descriptor systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 29(2):242-258, 2015. ISSN 1099-1115.
- [9] MIKSCH, T., GAMBIER, A., a BADREDDIN, E. Real-time implementation of fault-tolerant control using model predictive control. In: *World Congress*, number 1, strany 11136-11141., International Federation of Automatic Control, 2008. ISBN 978-3-902661-00-5.
- [10] KROKAVEC, D. a FILASOVÁ, A. *Diagnostika dynamických systémov*. elfa s.r.o, 2007, 240 s. ISBN 978-80-8086-060-8.
- [11] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Model predictive control of a ball and plate laboratory model. In: *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), 2015 IEEE 13th International Symposium on*, strany 165-170., IEEE, 2015. ISBN 978-1-4799-8220-2.
- [12] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Optimal State Control of the Mechatronical Laboratory Model B&P_KYB. In: *Electrical Engineering and Informatics 5 : proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice*, strany 9-16., Faculty of Electrical Engineering and Informatics, September 2014. ISBN 978-80-553-1704-5. (AED).

Rheological properties of fluids containing nanoparticles

Katarína Paulovičová

Institute of Experimental Physics
Slovak Academy of Sciences
Košice, Slovakia
paulovic@saske.sk

Jana Tóthová

Department of Physics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
jana.tothova@tuke.sk

Abstract—Currently, quite often we encounter the term nanomaterials, a wide range of which appears on the market of various products. The main ingredients are nanoparticles of different origins, in particular, either dispersed in the liquid medium or gel, which are indicated by the term nanofluids. Due to their unique properties they found use in a number of scientific disciplines including chemistry, materials science, physics, electrical engineering or medicine. Their wide range of application development stimulated their production processes and extensive research activities. The numerous experimental and theoretical studies have focused on the viscosity and thermal conductivity of nanofluids, as their applications are associated with the flow. The goal of this work was to help to clarify the rheological properties of nanofluids, influenced by changes in physical conditions of their environment. From a wide range of nanofluids we focused on liquids containing magnetic particles. These are called the magnetic nanofluids in which nanoparticles are dispersed in electro insulating liquids. In the field of electrotechnics and power engineering, these composite nanomaterials represent a way of reducing the dielectric and thermal losses of various devices and are a perspective cooling and insulating medium.

Keywords—*rheology; viscosity; magnetic fluids; nanofluids*

I. INTRODUCTION

Conventional fluids, such as mineral oils, have excellent lubrication and insulation properties but poor thermal properties that restrict their use as coolants in industrial applications. Nowadays a number of methods are available to enhance the heat transfer rate of any conventional fluid. One such method may be the addition of small-sized solid particles (millimetre and micrometre) in a conventional fluid that can improve its thermal properties. But use of these fluids has shown serious problems such as clogging, high erosion, pressure drop in pipelines and poor stability of suspension. About a decade ago, nanometre-sized particles replaced these milli- and micro-sized particles in the suspension, leading to the development of a new class of fluids called ‘nanofluids’. These fluids have a number of advantages, such as better stability, greater thermal conductivity and lower pressure drop compared to the base fluid [1]. Nanofluids are a novel class of engineered fluids in a new interdisciplinary area of great significance, which includes nanoscience, nanotechnology, and nano-engineering [2]. Nanofluids are colloidal mixtures of nanometre-sized particles (1-100nm) in a base fluid. The

nanoparticles can be metallic, non-metallic, oxide, carbide, ceramics, carbonic, mixture of different nanoparticles (hybrid nanoparticles). The mixing of nanoparticles with the base fluid may alter the thermo-physical properties of fluids as the nanoparticles possess higher thermal conductivity than the base fluids [3, 4]. However, various experiments have shown that the increase of thermal conductivity might be offset by an increase of viscosity [5–8].

A. Rheological behaviour of nanofluids

The rheological flow behaviour of any fluid is explained in terms of the relationship between shear stress (τ) and shear rate ($\dot{\gamma}$). The shear stress is defined as the tangential force applied per unit area and the shear rate is stated as the change of shear strain per unit time. The ratio of shear stress to shear rate is known as viscosity (η), which can also be defined as a measure of resistance offered by the adjacent layers to one another during the flow of liquid suspensions [1]. The fluid behaviour can be categorized as Newtonian and non-Newtonian (pseudoplastic, Bingham plastic, Bingham and Dilatant). For Newtonian behaviour, the viscosity remains constant with shear rate and the stress exhibits linear relation with shear rate while for non-Newtonian behaviour the viscosity may vary with shear rate and the correlation between stress and shear rate follows Bingham plastic behaviour. The rheological behaviour of a nanofluid can also give an idea of viscosity variation with shear rate. This behaviour depends on various factors such as nanoparticle shape [9–11], size [12, 13], nanoparticle concentration [14–16], surfactants [17–19], and shear rate range [20–22] and also it can be influenced by external applied magnetic [23–30] or electric fields [31–37].

B. Rheological behaviour of magnetic fluids

The transformer oil-based nanofluids with improved dielectric and thermal properties have a potential to replace mineral oil base products in high voltage technologies. Magnetic fluids or ferrofluids (FF), the well-known and prominent term nowadays in the dielectric society, have been the subject of huge research work over the past decade [24]. These nanofluids consist of superparamagnetic nanoparticles (typically in the size range of 5-20 nm) sterically stabilized by oleic acid and homogeneously dispersed in nonpolar carrier liquid such as an insulating transformer oil at just a few weight percentage (wt%). Brownian motion keeps the spherical

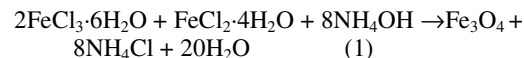
nanoscopic particles from settling under gravity, and a surfactant layer, such as oleic acid, surrounds each particle to provide short range steric hindrance between particles, preventing particle agglomeration [22, 25, 26]. These nanofluids are a kind of active materials, whose physical properties can be controlled and affected by external magnetic or electric field. The electro- and magneto-rheological fluids are specially formulated and designed for particular applications. Magnetic fluids are capable to modify their rheological properties under applied electric or magnetic fields. The nanoparticles are “organized” by the electric and magnetic fields in clusters and networks, the strength of the embedded structure within the fluid being proportional to the intensity of the applied field and their viscosity could change reversibly and rapidly by use of an external stimulus [23–37]. In the absence of external force a stable magnetic nanofluid exhibits Newtonian behaviour, their viscosity remains constant with shear rate and the stress exhibits linear relation with shear rate less than 10^3 s^{-1} [1, 25–27]. Under the influence of magnetic field, dispersed magnetic nanoparticles form magnetic aggregates in the pattern of chain-like structures due to strong interparticle interaction. The maximum interparticle interaction between two particles in contact, is given by coupling parameter, $\lambda = \mu_0 \mu^2 / 4\pi D_i^3 k_B T$ [22, 25–28], and volume fractions of magnetic grains ϕ in magnetic fluid. The formation of reversible chains or agglomerates modifies the viscosity of magnetic fluid, which is known as magneto-viscous as well as magneto-rheological effect [29–30]. In addition to magnetic field effects on the magnetic nanofluids, the influence of the electric field is also intensively studied. It is related to changes in rheology of dispersions which are due to the application of electric fields, and depending upon the nature of the fluids and the conditions of flow and field manifests itself in an increase of resistance to flow and, in some cases, to the conversion of fluid to solid behaviour [31–37]. In the application of the electrostatic field to the magnetic fluid, the transformer oil molecules as well as dispersed magnetic nanoparticles are polarized in the direction of the applied field. However, the formation of chains/columns is governed by the competition between electrical energy and the Brownian motion of the magnetic nanoparticles dispersed in dielectric fluids [32–34]. Potential changes in the structure of magnetic nanofluids induced by the pulse of the electric field, also known as Winslow, as well as an electro-rheological effect, should be investigated especially in the case of magnetic fluid used in the field of high voltage technology. In order to combine the electro- and magneto-rheological properties in a single liquid, electro-rheological magnetic fluids were developed. Any structural changes and variations in magnetic fluids flow induced by the electric field may have a significant impact on the thermomagnetic convection, cooling capacity and failure of the devices used in this area [24, 35–37].

II. EXPERIMENTAL DETAILS

A. Synthesis of magnetic nanoparticles by chemical co-precipitation and preparation of magnetic nanofluids

The preparation of magnetic nanofluids consisted of two main steps. At first the chemical co-precipitation method was used to synthesize nano-sized Fe_3O_4 particles. The process

($\sim 80^\circ\text{C}$) for the magnetite nucleation from the salt solution occurs in accordance with the reaction]:



Subsequently, the subdomain magnetite particles were sterically stabilized by surfactant (by chemisorption with oleic acid; $80\text{--}82^\circ\text{C}$). Then oleic acid (mono-layer) covered magnetite nanoparticles were homogeneously dispersed (120°C) in carrier transformer oil Mogul Trafo CZ- A (non-polar liquid). Two concentrated samples of magnetic fluids have been fabricated according to the procedure described. Basically, the essential difference between them consists in the fact that they were prepared from two different batches of the transformer oil Mogul Trafo CZ-A. For the following study, primary samples of the magnetic fluids were diluted by the carrier transformer oil and few samples with different concentration of magnetic nanoparticles were prepared.

B. Structural characterization

The appearance of the morphology of the magnetic nanoparticles in studied magnetic nanofluids were obtained by the transmission electron microscope Tesla BS 500 with the acceleration voltage 90 kV. The preparation of the experimental sample was based on dilution of the magnetic fluid in acetone. A droplet of solution containing magnetite nanoparticle was put onto a copper grid with carbon film, which was finally inserted in the vacuum chamber of used microscope.

C. Magnetic characterization

The magnetic properties of the investigated samples were obtained by performing measurements with the Cryogenic Vibrating Sample Magnetometer (VSM). The VSM enables to measure magnetic moment of solid and liquid samples in the temperature range from 1.6 K up to 700 K, and magnetic field range from 0 up to 18 T with the sensitivity of 10^{-6} emu. The measurement was carried out at 295 K and 1.8 K with the known weight of the samples.

D. Characterization of the basic thermal transport properties

The basic thermal transport properties of the transformer oil and the magnetic nanofluid were studied by a thermal constants analyzer (TPS 2500S from Hot Disk AB, Sweden) using a transient plane source method. This standardized technique allowed from a single measurement simultaneous determination of the thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat.

E. Rheological characterization

The flow curves and viscosity of the investigated samples of FFs were obtained using rotary viscometer MCR 502 (Anton Paar, Austria). This type of rotary rheometer ensures complete control of rheological measurements. It offers the possibility of using a combination of rheological tests in rotational and oscillatory mode, which can analyze both Newtonian and non-Newtonian liquid behaviours. The influence of the electric field (EF) on the investigated

magnetic nanofluids was probed using the C-PTD200/E electrorheological cell and the CC27/E/TI. The measuring cell of the device represents a system of coaxial cylinders consisting of the outer fixed cylinder with a cylindrical rotor immersed into it. The sample with volume of 19 cm³ was placed in an annular measuring gap and it was tempered with the aid of the Peltier system. The flow curves and viscosity of the samples of magnetic fluids were measured with continuous strain in the shear rate range from 10 to 1000 s⁻¹ and electric field strength from 0 to 6 kVcm⁻¹ at the temperatures of 25, 50 and 75°C. The experimental study of rheological properties of investigated nanofluids influenced by magnetic field (MF) effects was performed using a MRD170/1T magneto-rheological cell and a TG16/MRD/TI. The rheological properties of prepared magnetic fluids were measured by geometry of parallel plates with diameter 16 mm. The magnetic field was produced by applying an electrical current to a coil below the bottom plate. A two part magnetic cover serves as a magnetic bridge and ensures a uniform magnetic field oriented perpendicularly to the measuring gap. The studied sample with volume of 0.3 cm³ was placed inside of measuring gap and the plates were kept in distance 0.328 mm. The viscosity of the magnetic fluids was measured at temperature of 20°C. Magnetic flux density, controlled by a separate power supply unit, was varied from 0 mT to 1000 mT. The rheological curves were obtained in shear rate sweep tests by changing the shear rate in the interval from 1 to 1000 s⁻¹, while keeping the magnetic flux density as a constant.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Effect of magnetic field on the rheological properties of FF

The investigated FF consisted of transformer oil Mogul Trafo CZ-A and Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by a chemical co-precipitation method and sterically stabilized by a monolayer of oleic acid in order to prevent particles agglomeration. The magnetic particles diameter determined from a transmission electron microscopy was found to be 10 nm. The micrographies also show a shape of the particles very close to the spherical one (Fig. 1).

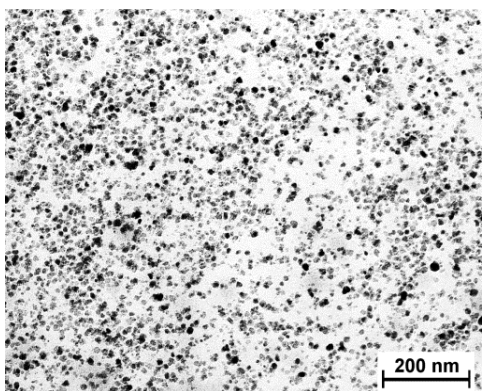


Fig. 1. Transmission electron microscope image of the synthesized magnetic nanoparticles.

The density of the FF was determined to be 0.881 gcm³. From magnetization measurements performed by a vibrating sample magnetometer (VSM) method, the magnetic mass fraction of the prepared FF was defined as 3% and the nanoparticles exhibited superparamagnetic behaviour at room temperature (Fig. 2). The basic characteristics of the prepared FF are included in TAB. I.

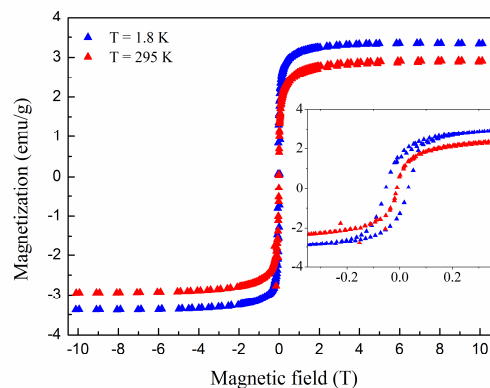


Fig. 2. Magnetization loops of the studied magnetic nanofluid.

TABLE I. BASIC CHARACTERISTICS OF THE PREPARED FERROFLUID

Sample	M_s (emu ⁻¹)	ϕ_M (%)	$\langle d \rangle_{TEM}$ (nm)	ρ (gcm ⁻³)
FF	2.92	3	10	0.881

The viscosity of the used transformer oil was investigated in the temperature range from 20 °C to 70 °C as a function of the shear rate in the interval from 1 to 1000 s⁻¹. The rheological behaviour of the carrier liquid demonstrated that this transformer oil is a typical Newtonian fluid as the shear stress increases linearly with the shear rate. Experimental data showed a classical behaviour, at which increasing temperature initiates decreasing viscosity of the Mogul Trafo CZ-A it can see in Fig. 3.

The viscosity of the FF was measured in the presence of magnetic field in the range from 0 mT to 1000 mT at 20 °C. The transformer oil containing the superparamagnetic nanoparticles shows the magnetoviscous (MV) effect, especially at low shear rates as shown in Fig. 4. At low shear rate (1 s⁻¹), under the influence of MF, the particles interact with the MF and with each other and form a chain structure aligned in the direction of the magnetic field.

Therefore, the FF exhibits a higher MV effect due to strong dipolar interactions. In the middle shear rate regime (18 - 100 s⁻¹), the FF shows the shear thinning effect, where viscosity decreases with shear rate due to the dominance of the hydrodynamic force (F_H) over magnetostatic force (F_M), which leads to a decrease in MV effect. At the shear rate regime (100 - 1000 s⁻¹), the chain-like structures become destroyed and thereby due to the presence of individual

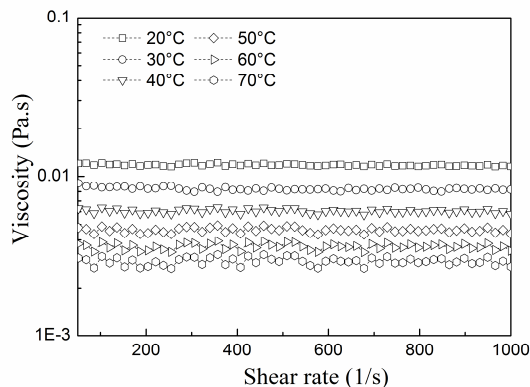


Fig. 3. Viscosity vs. shear rate measured on the transformer oil used as a carrier liquid for the nanofluid.

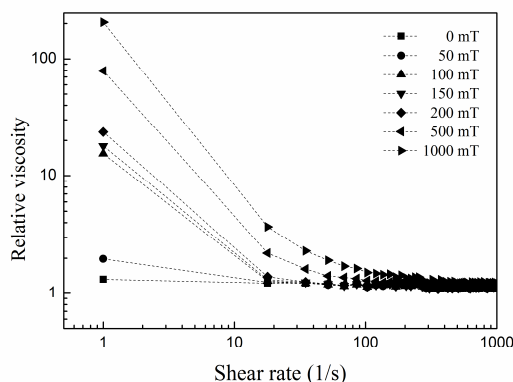


Fig. 4. The relative viscosity of FF versus increasing magnetic field at different shear rates from 1 to 1000 s⁻¹.

magnetic particles and strong F_H , the MV effect diminishes. Fig. 5 confirms the assumed behaviour of FF at which the relative viscosity, η/η_0 (where η , η_0 are the dynamic viscosities of FF in the presence and in the absence of magnetic field, respectively) increases with increasing MF.

The thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat were determined by thermal constants analyzer (TPS 2500S from Hot Disk AB, Sweden) using a transient plane source method. The basic thermal transport properties of the transformer oil and the sample FF were determined simultaneously from a single measurement. Before the measurements of the transformer oil and the investigated FF, water was tested to check the accuracy of the TPS method. At room temperature (21.5°C), the measured value was 0.5995 W/(mK), averaged over ten runs, with a standard deviation less than 1.0%. The literature value for thermal conductivity of water at 21.5°C from the National Institute of Standards and Technology (NIST) is 0.6010 W/(mK). Thus, the measurement uncertainty of the thermal conductivity is less than 1.0%. The uncertainties of specific heat and thermal diffusivity are expected to be less than 5.0%.

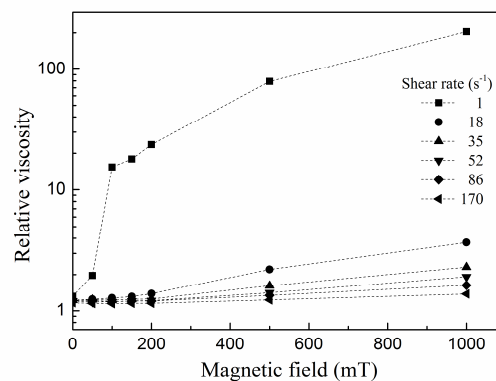


Fig. 5. The relative viscosity of FF versus increasing magnetic field at different shear rates from 1 to 170 s⁻¹.

Then, the thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity values of the transformer oil and the FF were measured. The obtained values are listed in TAB. II.

TABLE II. THE THERMAL TRANSPORT PROPERTIES OF THE TRANSFORMER OIL AND THE PREPARED FERROFLUID

Samples	Thermal conductivity (W/(mK))	Specific heat (kJ/(kgK))	Thermal diffusivity (mm ² /s)
Water	0.5995	4.332	0.1396
Transformer oil	0.1679	1.511	0.1345
Ferrofluid	0.1734	1.359	0.1553

It is clear that the thermal conductivity of the transformer oil, which is a crucial parameter for a cooling medium, has been enhanced by doping the transformer oil with magnetic nanoparticles by about 3.2%. Similarly, the thermal diffusivity of the FF has been increased by about 13.4%, while the specific heat has been decreased by about 10.1 % as compared to the values for the pure transformer oil. The enhanced thermal transport properties of the studied FF are associated with the large surface area of the nanoparticles which allows for more heat transfer. Besides the effective thermal interaction of the nanoparticles, the high mobility of the nanoparticles, attributable to the nanosize, leads to the enhanced thermal transport properties, too. The particle movement may bring about micro-convection of the FF and hence increase the heat transfer, as it is typical for nanofluids in general [37].

B. Effect of electric field on the rheological properties of FF

Effect of EF on the changed rheological properties of FF was investigated on the three samples with different volume concentration of magnetic particles. From the magnetization curve obtained by using the vibrating sample magnetometer (VSM) method, the volume concentration of magnetite particles of the prepared FF was determined as 6.6% and the particle diameter as about 10 nm. The samples with different particle volume fractions ϕ_v (1 and 3.1%) were obtained by diluting the original FF. The saturation magnetization at room

temperature of individual samples increases with increasing amount of magnetic particles in FFs as it is seen in Fig. 6 [36]. The paramagnetic nature of dispersed ferrite nanoparticles exhibited the experimental data magnetic susceptibility χ_{DC} in the range of 0.1402 to 0.765. The other characteristics of the FFs are included in TAB.III.

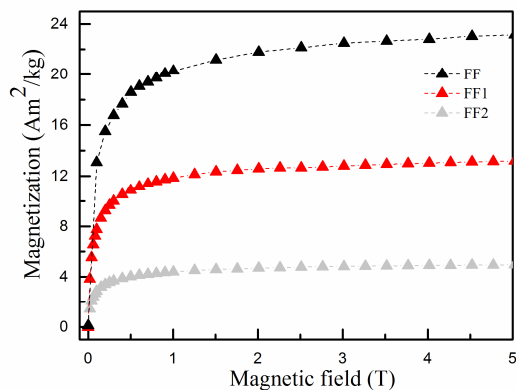


Fig. 6. The curves of magnetization of FFs with different volume concentration of magnetic particles determined at room temperature

TABLE III. BASIC PROPERTIES OF PREPARED FERROFLUIDS

Sample	M_s ($\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$)	ϕ_v (%)	χ_{DC} (-)	ρ (gcm^{-3})
FF	23.15	6.6	0.765	1.28
FF1	13.197	3.1	0.4147	1.04383
FF2	4.968	1	0.1402	0.91567

The viscosity of FFs was measured at three different temperatures; 25, 50 and 75°C. Moreover, every experiment was carried out under absence and in the present electric field in the range from 0 to 6 kVcm^{-1} . The shear rate was changed in the interval from 10 to 1000 s^{-1} . We can see (Fig. 7) the FFs value of viscosity as a function of the electric field at shear rate 400 s^{-1} where the samples behave as Newtonian fluids, since their viscosities do not depend on the shear rate. Fig. 8 shows clearly the FFs viscosity dependence on the amount of magnetic particles in the whole volume of the samples and on the EF intensity too.

As one would intuitively expect, the structural changes of the ferrofluid under the external electric field have a relevant impact on other ferrofluid rheological properties. This is clearly seen from Fig. 9, showing the electric field dependent ferrofluid viscosity measured at various shear rates. The measured ferrofluid viscosity increases with increasing electric field intensity. This change is more pronounced at low shear rates and diminishes with the increasing load. That behaviour is associated with the formation of chains or aggregates of particles under the influence of the electric field. One can therefore assume that the hindrance to the rotation of

the aggregates gives rise to the strong increase in viscosity with increasing electric field intensity. On the other hand, the

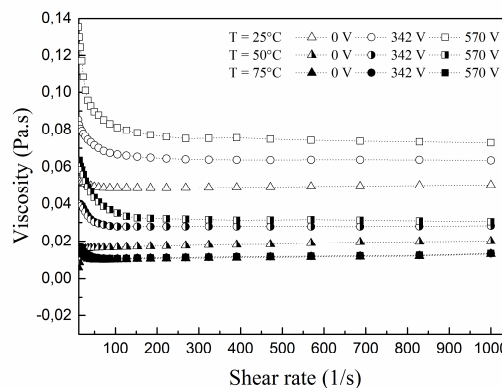


Fig. 7. Viscosity versus shear rate for FF ($\phi=6.6\%$) at temperature 25°C (blank symbols), 50°C (half-filled symbols) and 75°C (black-filled symbols). Every of these temperatures was measured in the absence of electric field (stars) and in the presence of electric fields 3 kVcm^{-1} (342 V) and 5 kVcm^{-1} (570 V). We show only two values of the EF for greater clarity.

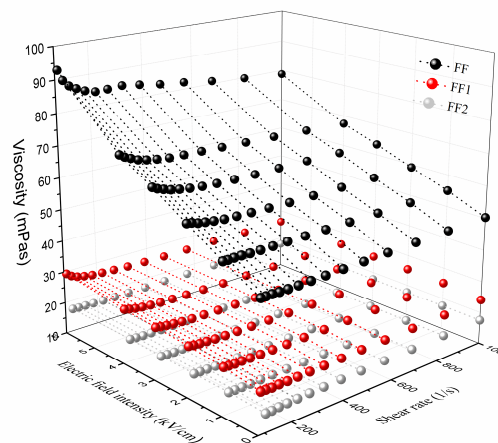


Fig. 8. The viscosity of FFs with different volume concentration of magnetic particles (FF- $\phi=6.6\%$, FF1- $\phi=3.1\%$, FF2- $\phi=1\%$) versus increasing intensity of electric field at different shear rates at 25°C.

rupture of the aggregates in the increasing shear flow can be responsible for the observed shear thinning. Within this simple model one should take into account that only relatively large particles undergo the interparticle interactions, which are strong enough to form the chains, as confirmed by the small-angle neutron scattering (SANS) analysis [36]. Consequently, only a small fraction of the magnetic particles in the ferrofluid is assumed to be of dominant importance for the observed electrorheological effect.

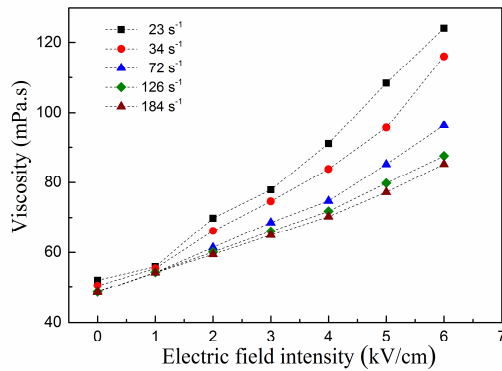


Fig. 9. The electric field and shear rate dependence of the FF ($\phi=6.6\%$) viscosity.

IV. CONCLUSION

In this paper we focused on experimental investigation effect changes of rheological properties of prepared FFs affected by external impulses of magnetic and also electric field. We supposed that any structural changes and variations in synthesized nanofluids flow affected by the applied field may have a significant impact on the thermomagnetic convection, cooling capacity and failure of the devices used in products in high voltage technologies. In the present of a magnetic field the rheological and thermal transport characteristics of a FF prepared on the based transformer oil Mogul Trafo CZ-Aweredefined. It has been proven that the transformer oil exhibits a typical Newtonian behaviour. On the other hand, the prepared FF with nanoparticle volume fractions $\phi=3.1\%$ showed the properties of a non-Newtonian fluid when exposed to the static magnetic field, as its viscosity is remarkably dependent on the shear rate. Thus, the measurements confirmed the expected MV effect, especially at low shear rates. Based on the thermal transport measurements, it was found that the presence of the magnetic nanoparticles in the transformer oil (3%) increases its thermal conductivity by about 3.2%. The rheological properties of samples FF with different volume fractions of magnetic particle (1, 3.1 and 6.6 %) were studied also in the presence of an electric field. The rheological behaviour of FFs and carrier liquid (Mogul Trafo CZ-A) has been observed under different electric field strength at the temperatures and shear rate range of 25, 50 and 75°C, and 10-1000 s⁻¹, respectively. The flow curve and the viscosity function disclose a shear thickening in the presence of static electric field. Clear dependence of ER effect on the shear rate was observed. The highest growth of the viscosity (34 and 45 %) was measured for the sample containing 6.6% of magnetite nanoparticles, at temperatures 25°C and 50°C, respectively. On the other hand, the minimum viscosity growth (3%) was measured for FF2 at 25°C. As the shear rate increases, the electrically induced increase of viscosity reduces significantly. It may be explained by forming the chains due to interparticle interactions in the presence of electric field. These chains break up under the influence of shear, reducing the size of structures determining the ER effect. Thus the chain formation leads to the enhanced

increase of viscosity while shear rate induced rupture of the chains gives rise to the observed field-dependent shear thinning. It can be therefore concluded that the prepared FFs could find a potential application as an efficient cooling liquid medium in electrical devices like transformers or circuit breakers, as the low particle concentration is expected to have no deteriorative effect on the insulating characteristics of the transformer oil.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Slovak Academy of Sciences and Ministry of Education in the framework of projects VEGA Nos. 2/0016/17, 2/0141/16, 1/0250/18 and 1/0311/15, Ministry of Education Agency for structural funds of EU Project Nos. 26220120033 and 26220120003, COST CA15119NANOUP TAKE, and Slovak Research and Development Agency under the Contract No. APVV-15-0453 (M-Vision). The authors gratefully acknowledge the financial support provided by NMI3 to perform the neutron scattering measurements at the Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ), Garching, Germany.

REFERENCES

- [1] A. K. Sharma, A. K. Tiwari b, and A. R. Dixit, "Rheological behaviour of nanofluids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp. 779-791, 2016.
- [2] M. Adil, H. M. Yaid, L. K. Chuan, N. R. A. Latiff, "Influence of electromagnetic waves on viscosity and rheology of dielectric nanofluids-scale-based approach," *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 78:6-4, pp. 49-54, 2016. eISSN 2180-3722
- [3] Ch. SUS, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *In: Proceedings of the ASME 1995. FED231, MD66*, pp. 99-105.
- [4] Wang XQ, Majumdar SA, "Heat transfer characteristics of nanofluids: A review", *Int. J. Therm. Sci.*, 46, pp. 1-19, 2007.
- [5] L. Godson, B. Raja, D. M. Lal, S. Wongwises, "Enhancement of heat transfer using nanofluids-an overview", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 629-41, 2010. DOI:10.1016/j.rser.2009.10.004
- [6] T. B. Chang, S. C. Syu, Y. K. Yang, "Effects of particle volume fraction on spray heat transfer performance of Al₂O₃-water nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, pp. 1014-21, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.009>
- [7] J. Sark, "A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 3271-3277, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.025>
- [8] W. Daungthongsuk and S. Wongwises, "A critical review of convective heat transfer of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp. 797-817, 2007. DOI:10.1016/j.rser.2005.06.005
- [9] E. Etefaghi, A. Rashidi, H. Ahmadi, S.S. Mohtasebi, M. Pourkhalil, "Thermal and rheological properties of oil-based nanofluids from different carbon nanostructures", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 48, pp. 178-82, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.00>
- [10] D. R. Heine, M. K. Petersen, G. S. Grest, "Effect of particle shape and charge on bulk rheology of nanoparticle suspensions," *Journal of Chemical Physics*, 132, (184509) pp. 1-6, 2010.
- [11] H. Chen, Y. Ding, "Heat transfer and rheological behaviour of nanofluids: A review," *Advances in Transport Phenomena* 1, pp. 135-77, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02690-4_3
- [12] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, pp. 2272-2281, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024>

- [13] K. Shah, R. V. Upadhyay, V. K. Aswal, "Influence of large size magnetic particles on the magneto-viscous properties of ferrofluid, "Smart Materials and Structures, IOP Publishing Ltd, 21, 12pp., 2012.
- [14] X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, "Journal of Heat and Mass Transfer, 13, pp.474–80, 1999. <https://doi.org/10.2514/2.6486>
- [15] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, "J. Heat Transfer, 125, pp. 567–74, 2003. DOI:10.1115/1.1571080
- [16] M. Baghbanzadeh, A. Rashidi, A. H. Soleimanisalim, D. Rashtchian, "Investigating the rheological properties of nanofluids of water/hybrid nanostructure of spherical silica/MWCNT, "Thermochimica Acta, 578, pp. 53–8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.01.004>
- [17] W. J. Tseng, S. Y. Li, "Rheology of colloidal BaTiO₃ suspension with ammonium polyacrylate as a dispersant, "Materials Science and Engineering A, 333, pp. 314–319, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01856-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01856-1)
- [18] W. J. Tseng, C. L. Lin, "Effects of dispersant on rheological behaviour of BaTiO₃ powders in ethanol-isopropanol mixtures, "Materials Chemistry and Physics, 80, pp. 232–238, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00479-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00479-0)
- [19] W. J. Tseng, C. N. Chen, "Effect of polymeric dispersant on rheological behaviour of nickel-terpineol suspensions, "Materials Science and Engineering A, 347, pp. 145–153, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00562-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00562-2)
- [20] P. Alphonse, R. Bleta, R. Soules, "Effect of PEG on rheology on stability of nanocrystalline titania hydrosols, "Journal of Colloid and Interface Science, 337, pp. 81-87, 2009. DOI:10.1016/j.jcis.2009.04.087
- [21] B. Aladag, S. Halelfadl, N. Doner, T. Maré, S. Duret, P. Estellé, "Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, " Applied Energy, 97, pp. 876-880, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.101>
- [22] S. Odenbach, H. Strok, "Shear dependence of field - induced contributions to the viscosity of magnetic fluids at low shear rates, "Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 183, pp. 188-194, 1998.
- [23] N. G. A. Basset, K. Jain, S. Pathak, R. P. Pant, "Dipolar Interaction and Magneto-Viscoelasticity in Nanomagnetic Fluid, " Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 17, pp. 1-6, 2017.
- [24] M. Rafiq, Y. Lv, Ch. Li, "A Review on Properties, Opportunities, and Challenges of Transformer Oil-Based Nanofluids, " Journal of Nanomaterials, 2016, 23 pages, 2016 DOI:10.1155/2016/8371560
- [25] I. M. Shiomis, "Effective viscosity of magnetic suspensions, "Sov. Phys. - JETP, 34, pp. 1291-1294, 1972.
- [26] L. Vékás, D. Bica, D. Gheorge, I. Potencz, M. Rasa: "Concentration and composition dependence of the rheological behaviour of some magnetic fluids, "J. Magn. Magn. Mater, 201, pp. 159-162, 1999.
- [27] D. Borin, A. Zubarev, D. Chirikov, R. Muller, S. Odenbach, "Ferrofluid with clustered iron nanoparticles: Slow relaxation of rheological properties under joint action of shear flow and magnetic field, "J. Magn. Magn. Mater, 323, pp. 1273-1277, 2011.
- [28] K. Shah, R. V. Upadhyay, V. K. Aswal, "Influence of large size magnetic particles on the magneto-viscous properties of ferrofluid. Smart Materials and Structures", IOP Publishing Ltd, 21, 12pp, 2012.
- [29] L. Vékás, M. Rasa, D. Bica, "Physical Properties of Magnetic Fluids and Nanoparticles from Magnetic and Magneto-rheological Measurements," Journal of Colloid and Interface Science, 231, pp. 247–254, 2000. DOI:10.1006/jcis.2000.7123
- [30] Z. Laherisheth, K. Parekh, R. V. Upadhyay, "The effect of magnetic field on the structure formation in an oil-based magnetic fluid with multicore iron oxide nanoparticle, " Journal of Nanofluids, 7, pp. 1-8, 2018. DOI:10.1166/jon.2018.1457
- [31] P. Sheng, W. Wen, "Electrorheological Fluids: Mechanisms, Dynamics, and Microfluidics Applications, "Annu. Rev. Fluid Mech., 44, pp.143-174, 2012.
- [32] L. Lobry, E. Lemaire, "Viscosity decrease induced by a DC electric field in a suspension, "Journal of Electrostatics, 47, pp. 61-69, 1999.
- [33] S. H. Kwon, S. H. Piao, H. J. Choi, "Electric Field-Responsive Mesoporous Suspensions: A Review, "Nanomaterials, 5, pp. 2249-2267, 2015.
- [34] C. Balan, Diana Broboana, E. Gheorghiu, L. Vékás, "Rheological characterization of complex fluids in electro-magnetic fields, " J. Non-Newtonian Fluid Mech., 154, pp. 22–30, 2008.
- [35] K. Paulovičová, J. Tóthová, M. Rajňák, M. Timko, P. Kopčanský and V. Lisý, "Electro-Rheological Properties of Transformer Oil-Based Magnetic Fluids, " Acta Physica Polonica A, 131, pp. 1141-1143, (2017)
- [36] M. Rajňák, M. Timko, P. Kopčanský, K. Paulovičová, J. Tóthová, J. Kurimský, B. Dolník, R. Cimbala, M. V. Avdeev, V. I. Petrenko, A. Feoktystov, "Structure and viscosity of a transformer oil-based ferrofluid under an external electric field, " J. Magn. Magn. Mater, 431, 99, 2017. DOI:10.1016/j.jmmm.2016.10.008
- [37] K. Paulovičová, J. Tóthová, M. Rajňák, Z. Wu, B. Sundén, L. Wadsö, T. Tobiáš, P. Kopčanský, M. Timko, V. Lisý, "Rheological and Thermal Transport Characteristics of a Transformer Oil Based Ferrofluid, " Acta Physica Polonica A, 133, pp. 564-566, (2018)

Abstraction of Grammars using Supercombinators: Summarization of Results

Michal Sičák

Department of Computers and Informatics
Technical University of Košice
04001 Košice, Slovakia
Email: michal.sicak@tuke.sk

Ján Kollár

Department of Computers and Informatics
Technical University of Košice
04001 Košice, Slovakia
Email: jan.kollar@tuke.sk

Abstract—We present algorithm that transforms CFG into supercombinator set. Grammar rules are abstracted by their structure, which results into reuse of elements, as the set is non-redundant. This set can be used to obtain structural information from input grammars. We show an experiment, where we transform multiple grammars into a single supercombinator set. This set contains valuable information, we present how we can process those information and what can we find out from them. This paper is a summarization of first author's dissertation thesis.

Abstrakt - V článku uvádzame algoritmus, ktorým dokážeme transformovať regulárne a bezkontextové gramatiky do superkombinátorovej množiny. Pravidlá gramatík su abstrahované na základe ich vnútornej štruktúry, čím dosiahneme znovupoužitie vytvorených prvkov, keďže výsledná množina superkombinátorov je neredundantná, to znamená, že neobsahuje žiaden identický superkombinátor viac ako raz. Týmto algoritmom vieme získať štrukturálne informácie vstupných gramatík. V článku uvádzame kolekciu experimentov na vstupných vzorkách gramatík, ktoré transformujeme na superkombinátorovú množinu. Táto množina obsahuje cenné informácie, ktoré vieme interpretovať a získať z nich zmysluplné údaje o vstupných údajoch. Tento článok je súhrn dizertačnej práce prvého autora.

Index Terms—Supercombinators, Grammar Abstraction, Formal Grammars, Natural language processing, Lambda calculus

I. INTRODUCTION

In this paper we present a short description of algorithm that transforms Context-Free Grammars (CFG) into a single supercombinator set, while retaining their descriptive ability without any information loss. We abstract CFGs with the use of supercombinators. This results into separation of terminal symbols from the original structure. Supercombinator is a term coined by Hughes [1], it is a lambda expression that is either a constant or it is a combinator that contains only other supercombinators in its body. Therefore it does not contain free variables on any level of its body. Hughes originally used supercombinators in functional language compilers. We use them as a mean to non-redundantly retain structural grammar information. They have an excellent applicative ability, which is used to obtain original grammars back. This reconstruction is lossless.

Grammars are usually used in parser definitions, but they can be used for other purposes, as Klint et al point out in [2]. Uses outside uses of grammars are for example grammar

based systems [3] or concise data representation [4]. Therefore multiple data inputs can be transformed to multiple grammars, which can be then processed by our algorithm. The result is a creation of a single set that contains the grammar information, which can be reconstructed back [5]. Usually grammars are the end point of abstraction, but in this case, they are the input. Bulk of this research has been presented in [6], [7], [8].

Main contributions of this paper are:

- We present compact description of algorithm that can transform context-free grammars into single non-redundant supercombinator set (see Section IV).
- We perform experiments on a large set of grammars to show the properties and limits of obtained supercombinator set (see Section V).
- We propose the potential use of this algorithm in Section VI.

II. MOTIVATION

Motivation for this work is grammar processing. We want to extract the structure of grammars in order to create a single structure of reusable parts. As the inputs of our process are grammars, they need to exist. We can acquire them from language samples with the use of grammar inference. Our work heavily relies on this process. Grammars cannot be inferred from text (a set of positive samples only) by any effective algorithm. This has been proved by Gold [9]. However, introducing negative samples, in other words samples that do not belong to certain language can simplify this process all together and thus we can indeed infer large number of grammar classes.

However, negative samples are not always present. When we communicate with someone, we do not necessarily know whether what that person says is grammatical or not, especially if we are not accustomed to this language. Little children are capable to learn a language from heard utterances, they use variation sets to help them distinguish grammar from positive samples, for more information see Onnis et al. [10]. This is a kind of heuristics that in real world helps to infer grammar from positive samples only. This also applies to formal languages. We can use various heuristics, statistical methods or machine learning optimizations to infer formal grammar from positive samples. For the use of grammar

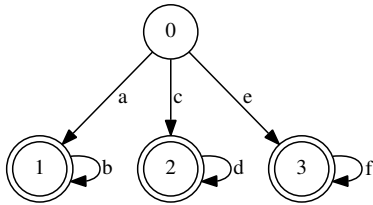


Fig. 1. Finite state automaton of a regular expression $a(b)^* | c(d)^* | e(f)^*$.

inference in the software engineering field, see Stevenson and Cordy [11]. If we infer a CFG grammar, we can process it with our algorithm when as the result we get non-redundant, parallel structure. This structure can grow as we continually process new grammars, therefore enlarging its description capabilities.

Structure is non-redundant, which means that it does not contains the same element twice. This is indeed a basic property of mathematical sets. The additional part in our process is the fact that elements in the set are interconnected. Thus a key part of our algorithm is identification of identical supercombinators even if the identifiers we use in them are different. The final set is not bound by maximum size, it can continually grow as new grammars can be processed and put into it.

The primary reason for creation of this process was to battle structural explosion [12]. This phenomena occurs in various sections of language engineering. It for example occurs when transforming regular expressions into a finite state automaton. When we have same structures in regular expression that contain different terminal symbols, the resulting automaton would have multiple similar looking strands. Use expression (1) as an example.

$$a(b)^* | c(d)^* | e(f)^* \tag{1}$$

We can immediately see that the three alternative parts of this expression have the same structure. The only thing they differ in are the terminal symbols. This structural identity does show in the resulting automaton, see Fig 1. Each alternative part created its own automaton strand. We see that those parts are also identical in structure yet differ only in terminals. Now imagine that we would process a grammar of substantial size. This could create a lot of identical structures and with our algorithm, we could abstract those structures away in order to reuse them. We can thus save memory space and even create a base of most used structural parts, which might have various implications in the field of metrics or conceptualization, see Section III. Strands from the automaton would result into supercombinators showed in (2) and (3), where L^0 represents identity combinator.

We denote supercombinators with L symbol. They are lambda expressions, where we have extended the standard notation with grammar metaoperators. In case of expressions (2)

and (3), only concatenation (denoted by symbol plus¹) and closure (denoted by standard Kleene star) metaoperators are added .

$$L^2 = \lambda x_1. \lambda x_2. L^0 x_1 + L^1 x_2 \tag{2}$$

$$L^1 = \lambda x_1. (L^0 x_1)^* \tag{3}$$

Now, what about terminal symbols? They are separated from the original structure and are stored in their own associative data structure. They are still connected to the structure, but only via references. This allows us to create non-redundant structure. Terminal symbols are arguments of lambda abstraction, therefore by their application we obtain original grammars back.

III. RELATED WORK

We have grammars on the input of our algorithm and those grammars need to exist. Therefore our work relies on the field of grammar inference. We can obtain non-redundant set of supercombinators from grammars that have been created from a linear representation, i.e. text. Text is usually what is considered to be a positive sample in grammar inference, a sample that belongs to the searched language. Gold proved in [9] that inference from positive samples cannot be achieved for superfinite class of grammars, and even some regular grammars belong to this class. This is true only for the entire classes of grammars and for pure algorithms. One can use heuristics such as evolution algorithms or statistic methods to infer a grammar from positive samples, eg. Hrnčič et al. used evolution algorithms [13] to infer a grammar of DSL language from positive samples only. One can use minimal adequate teacher (see Clark [14]) or rule based systems (see Dubey et al. [15]) to infer grammars of general purpose languages. To see more general information about grammar inference, see De Higuera [16] or Stevenson and Cordy [11] for information about grammar inference used in software engineering.

As for the contributions of our work, one of possible uses is a field of grammar metrics. With our approach, we can identify most reoccurring structures that certain grammar has and then compare it to other grammars or even to general trend that has been already amassed. Grammar metrics are rigorous quantitative measurements of grammar quality. For more general information about this field see Power and Malloy [17]. They divide metrics into two classes, size and structure metrics. Črepinšek et al. created additional metrics that are based on LR parsing, see [18]. We can measure even extensions of grammars, like attribute grammars. See Cruz et al. [19] and Cruz [20]. Supercombinator driven extension to grammar metrics might be a possibility, but it is not the purpose of this paper, it is a suggestion for future work.

The set that our algorithm can contain information from multiple grammars. We can even have a structure that is

¹We have chosen the plus symbol since standard symbols for the concatenation, either a dot (.) or an empty space are already used in the lambda calculus.

growing continuously, constantly accepting new processed grammars. We can thus process grammars in data-flow manner. This shares a relation with conceptualization field [21] as grammar structures that are converted into supercombinators might represent concepts. Data obtained by conceptualization [22] can be converted into grammar forms and then stored in our supercombinator set. Another relation is with Domain Specific Language (DSL) field, as it relies heavily on grammars [23], [24]. DSLs work with abstraction rather well and they are used for enhancing computer to human communication [25], they can even help with understanding programs [26]. Our non-redundant structure might prove to be of use to this field.

As we are creating supercombinators from grammars, our work might contribute to the field of combinatory parsing. This field uses combinators to parse texts of languages with known grammars. For more information about this please read Section VI. There is also a correlation between grammars and meta-modeling. Since our supercombinators process structural information, this might prove to be of use with the field of meta-modeling. Relation between CFGs and models has been studied by Alanen and Porres [27]. Models can be extracted from languages and a custom DLS can be made from them, see Izquierdo and Molina [28]. Transformation process can be enhanced with the use of context-free graph grammars, see Besova et al. [29].

Eventual result of our algorithm are transformed grammars. Transformation of grammars can be found in the works of Lämmel [30]. He describes grammar adaptation. A process in which three groups of operators are used to achieve the transformation. These groups include refactoring, construction and destruction operators. However, the result of this transformation are also grammars, which differs from our approach. Another similarity with our approach can be found in XML document representation. Busatt et al. [31] created a process with which they can represent XMLs efficiently in memory by using shared subtrees. They abstract identical subtrees and represent them as a tree grammar. The result of their algorithm are also grammars, in this case context-free graph grammars, but they find and replace multiple occurrences and thus achieve more compact form, which is similar to our results. As for the natural language processing, Ranta [32] developed a formalism called Grammatical Framework by which he represents multilingual grammars. Modularity is the prime result of his work, as grammars are separated into abstract and concrete. Repeating parts are represented non-redundantly. Grammars in this case are represented as a functional language and by combining abstract and concrete parts he obtains grammar for specific language, which bears similarity with our supercombinator method. Fedorchenko and Baranov in [33] transform CFGs to CFGs in regular form to save memory space. They reduce data which are created while creating a parser from input grammar. Therefore they also achieve reduction of grammar based elements which is similar to our approach.

TABLE I
SUPERCOMBINATOR SET CREATED FROM THE GRAMMAR \mathcal{G} .

Name	Supercombinator Body	Arguments
L^0	$\lambda x_1. x_1$	$\{a, b\}$
L^A	$\lambda x_1. \lambda x_2. L^0 x_1 + L^B x_2 x_1 + L^0 x_1$	$\{ab\}$
L^B	$\lambda x_1. \lambda x_2. L^0 x_1 L^A x_2 x_1$	$\{ba\}$

IV. DESCRIPTION OF ALGORITHM

The best way to briefly describe our algorithm is by an example. We will show the transformation of simple CFG $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \Sigma, \mathcal{P}, \mathcal{S})$, where $\mathcal{N} = (A, B)$, $\Sigma = (a, b)$, $\mathcal{S} = A$ and $\mathcal{P} = ((4), (5))$. This grammar represents a formal language $\{a^n b a^n; n > 0\}$.

$$A \rightarrow a B a \quad (4)$$

$$B \rightarrow b | A \quad (5)$$

The first step of the transformation is the creation of a graph created from terminal and nonterminal symbols of our grammar. This directed, possibly cyclic, graph is composed of nodes that represent all terminal and non-terminal symbols from the input grammar. Edges of this graph are taken from the grammar rules. This step is necessary for CFGs, as we need to know the arity of future supercombinators that represent grammar rules. We see that nonterminal B is a part of the right side of rule (4). Each grammar rule can be transformed to a small set of supercombinators. Generally, we usually get two supercombinators, but the exact number depends on grammar operators this rule has and whether it has terminal symbols. In case of both our rules, we see that they have only one grammar operator and they contain terminal symbols. Therefore, rule A is transformed into two supercombinators. The supercombinator, which corresponds to the call of the rule B might not be created yet, therefore we need to have the graph to know the arity and arguments of each rule. In case of rule B , from the graph we get argument string ba . We can therefore create temporary reference to the supercombinator B inside of the top supercombinator of rule A . The other supercombinator that is being created from both rules is the most simple supercombinator that represents identity combinator. We denote it as $L^0 = \lambda x. x$.

When all rules are processed, we can merge them together. At this moment, we have two small sets of supercombinators, where the first contains top supercombinator of rule A and L^0 , the second one contains top supercombinator of B and also L^0 . By merging those two sets of supercombinators we get one that contains only three, as L^0 has been merged. Another thing that is changed during this process is the replacement of temporary references to other top supercombinators by the real ones, as we have already transformed all the rules. The resulting set is shown in Table I. Note that arguments represent only references to possible argument strings for each supercombinator.

V. LARGE SCALE EXPERIMENTS

So far we have shown only small set of supercombinators created from a rather simple CFG. In fact, this CFG was not that simple, as it contained a cycle, which resulted into top supercombinators having same arity. For large scale experiments, presented in this section, we have chosen grammars that do not contain cycles. The data source that we use is Groningen Meaning Bank corpus [34]. It contains 10 000 short newspaper articles processed by Combinatory Categorical Grammar. We transform the structural information that these grammars hold to a simple CFGs. As the original corpus contains 62 008 sentences, we get the same number of CFGs. Each of those grammars is transformed into its own supercombinator set. All those sets are then merged together. Which means that no two equal supercombinators reside in the final set, in other words, every supercombinator in the final set is unique. By using a grammar metric of rule count, we have average 20.838 rules per grammar, with the median of 20 and the mode is 19. After the transformation, we can compare these numbers with the arity of top supercombinator of each grammar. This number corresponds to the count of grammar rules, as we can see that the average arity is 21.84, with the median of 21 and the mode of 20. Standard deviation is almost identical, 7.95.

Grammars that we transform have one important property. Each rule has the length of two. This creates supercombinators where each one (except for L^0) has exactly two subsupercombinators in its body. With this restriction in place, we can calculate maximum possible number of supercombinators per arity. This number corresponds to a sequence known as the sequence of Catalan Numbers, 1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, ... and it is represented by a formula (6). Therefore we cannot obtain more supercombinators for each arity in our set than the Catalan number specifies.

$$C(n) = \prod_{k=2}^n \frac{n+k}{k} \tag{6}$$

The resulting set split by arity is presented in Fig. 2. To view precise values, see Table II, where we have taken into account only the first 16 arities. We see that we never surpass Catalan number for each arity. In fact, we get all possible supercombinators for only first 6 arities. Catalan number rises exponentially, where our supercombinator count rises rather lineary. In fact, for higher arities the number starts to drop as the maximal arity is restricted by the length of the longest sentence in GMB corpus, which is 104 (see Section VI).

The final set has been created as a incremental merge of small set processed from grammars into the final set. This grow is depicted in Fig. 3. We see rather linear grow. This is due to the fact that we have a lot of supercombinators with rather high arities. They are rather unique, and as we show in Section V-A they occupy rather large portion of the final set.

But should we restrict our view to supercombinators with lower arities, we would see logarithmic grow. We can see that for first 8 arities in Fig. 4. We also see that we never reach

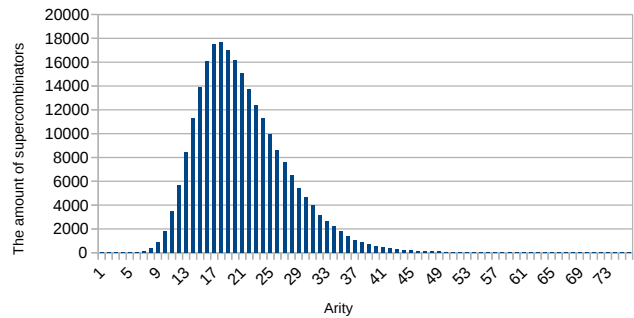


Fig. 2. The amount of supercombinators in the final form divided by their arity.

TABLE II
AMOUNT OF SUPERCOMBINATORS SEPARATED BY THEIR ARITY.

Arity	Amount	Catalan no.
1	1	1
2	1	1
3	2	2
4	5	5
5	14	14
6	42	42
7	128	132
8	360	429
9	878	1430
10	1836	4862
11	3474	16796
12	5686	58786
13	8470	208012
14	11328	742900
15	13859	2674440
16	16099	9694845

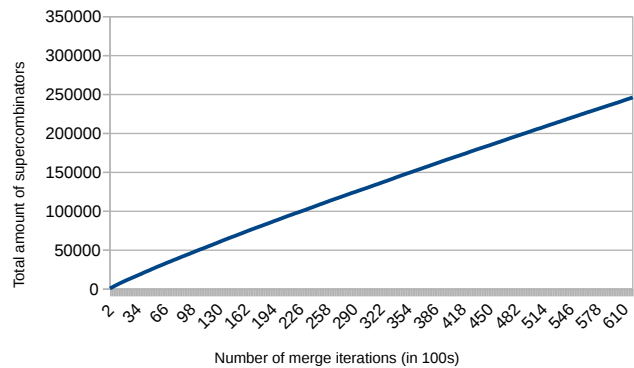


Fig. 3. Comparison of cumulative incremental merge between older and newer approach.

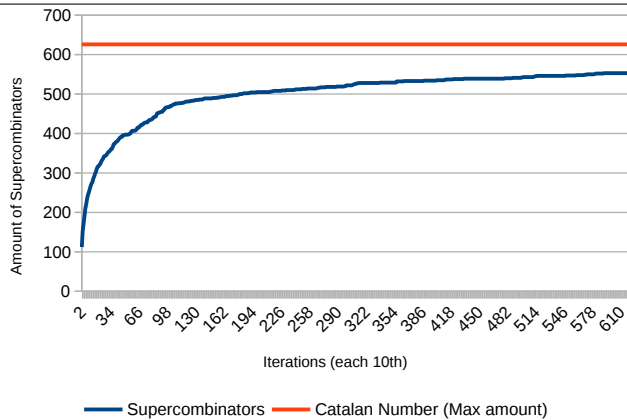


Fig. 4. Cumulative sum of supercombinators constrained with the arity of at most 8, along with the maximum limit, which is sum of the first 8 values of Catalan number.

the limit set by catalan numbers, which is logical, since we do not have all possible supercombinators in our set for arities 7 and 8. This implies that we might be able to identify used supercombinators, which would represent some basic rather universal structural information of our inputs.

A. Identification of most reoccurring structures

We can track supercombinators during merge operation. Should we want to see which supercombinators are most common, we need to capture that information during merge, as in the final set every supercombinator is present only once. In Table III we present top 10 occurring supercombinators, excluding L^0 , which occurs in each grammar. We can see from this table that the supercombinator with arity two that contains two references to L^0 is present in each before-merge supercombinator set as its number of occurrence is equal to 62 008. But out of two possible 3-ary supercombinators, one of them occurs approximately three times more than the other one. We know that around 47% of supercombinators from all initial sets gets merged into only 56 supercombinators present in the final set. This number represents 0.024% of all supercombinators present in the final set. To see the set split by interval of their frequency, see Table IV. We have split intervals to the power of two. We see that as the interval rises, amount of supercombinators in our final set drops. But percentage of those supercombinators before merge supercombinators shows different trend. If we take into consideration all intervals from 2 to 1024, we see that they occupy similar share. Considering that our interval selection is exponential, we can conclude that before merge simple supercombinators, and therefore grammar structures that they are created from, were more frequent. Only unique supercombinators do not conform to this trend, as they did occupy around a quarter of original space.

VI. DISCUSSION

In this paper, we have presented experiments on 62008 grammar samples that were taken from GMB corpus. Those

TABLE III
TEN MOST MERGED SUPERCOMBINATORS.

Rank	Arity	Occurrence
1 (0,0)	2	62008
2 (0,1)	3	60114
3 (0,2)	4	48851
4 (0,3)	5	30343
5 (1,0)	3	17028
6 (0,4)	6	16025
7 (1,1)	4	14602
8 (2,3)	5	12651
9 (0,8)	5	8433
10 (0,6)	7	7995

TABLE IV
OCCURRENCE OF SUPERCOMBINATORS IN THE INPUT SETS.

Frequency interval	Amount	% After merge	% Before merge
= 1	219894	89.274%	25.20%
= 2	12687	5.151%	2.91%
> 2, ≤ 4	6455	2.621%	2.47%
> 4, ≤ 8	3413	1.386%	2.39%
> 8, ≤ 16	1796	0.729%	2.39%
> 16, ≤ 32	968	0.393%	2.55%
> 32, ≤ 64	488	0.198%	2.53%
> 64, ≤ 128	277	0.112%	2.83%
> 128, ≤ 256	162	0.066%	3.34%
> 256, ≤ 512	75	0.030%	3.11%
> 512, ≤ 1024	43	0.017%	3.55%
> 1024	56	0.023%	46.73%

CFGs were rather simple. In contrast to our older research [7], where we have used Sequitur generated grammars we now see only binary representations of our supercombinators, which has also allowed us to use Catalan number as a limit for supercombinators per arity. In case we used n -ary trees, like in our older research [7], Catalan number would not represent the limit. In that case, the limit is known as Super Catalan number, and rises more steeply, which makes sense, as we have more options to represent supercombinators with n -ary trees. In this research, we see narrower but deeper trees, especially we do not get large top-supercombinator. The largest supercombinator we get has the arity of 104 and it represents the longest sentence from the original source. Visualization of this tree is presented in, Fig. 5. The sentence that this supercombinator represents is: "Fisheries in 2006 - 07 landed 126,976 metric tons, of which 82 % (104,586 tons) was krill (*Euphausia superba*) and 9.5 % (12,027 tons) Patagonian toothfish (*Dissostichus eleginoides* - also known as Chilean sea bass), compared to 127,910 tons in 2005 - 06 of which 83 % (106,591 tons) was krill and 9.7 % (12,396 tons) Patagonian toothfish (estimated fishing from the area covered by the Convention of the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR), which extends slightly beyond the Southern Ocean area)."

We can see that we get all possible supercombinators up to the arity of 6. This means that we create some sort of a

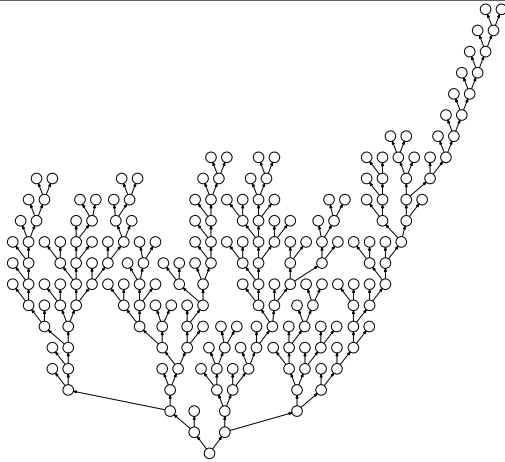


Fig. 5. Binary tree representation of supercombinator with the largest arity, 104.

base of basic structures used in the input samples. This is an interesting implication, as we can use our set for various metric or conceptualization based purposes, see Section III. We have found that 0.023% of all supercombinators originate from 46.73%. This is a rather massive reduction of use, as nearly one half of original information has been compressed to a mere fraction.

The fact that we get some supercombinators more often is due to the way that the original information was rather structured. Combinatory Categorical Grammar can be obtained from a single sentence in various ways. This phenomena is called spurious ambiguity (see Steedman and Baldrige [35]). Various parse trees can be created, but usually the most simple one is taken into account. Therefore our results conform to this spurious ambiguity as CCG tends to create similar structures rather than arbitrary ones.

The reuse and identification of various supercombinators can be tracked and measured. This could be used to develop a new set of grammar metrics. We do not propose to create a replacement to existing metrics but rather an addition to this field, which might help with the identification of used structural parts. But this is a topic for further research as this is mere suggestion.

Another practical application of our research might lie in the field of combinatory parsing. This part of language engineering deals with parsers that are composed of small reusable parts, called combinators. We might use our system to aid them in the initial construction, which might help with the automation of this process. We have used such combinatory parser to process the input grammars, we have used Prasec [36]. For further details about combinatory parsing see Swierstra et al. [37], [38]. They offer deep insight into parsing and implementation of such parsers. They also use language Haskell, as its strong type system and lazy evaluation are invaluable in the construction of rather abstract combinatory parsers.

Our process might be used to enhance this process as we

can abstract structure from input grammars. Those structures can represent some parsing blocks that are then processed further into combinators which do the parsing itself. Our supercombinators however cannot be used as the end product of combinator parser, as their are quite restricted. General parsers like `pMany` parse many of anything. But on the other hand, `pSymbol` is analogous to our L^0 supercombinator.

Therefore we believe that our work might contribute to this field, but detailed description of this process is not the purpose of this paper and this entire discussion would be unnecessarily long. We just point out the possible use of our process in the field of language engineering.

VII. CONCLUSION

We have presented background of our algorithm, its brief description and the use on a large scale data source, which contains 62008 grammar samples obtained from 10000 short newspaper articles. We have shown the properties and limits of our supercombinator form and even outlined potential uses in various fields.

Main scientific contributions of Dissertation thesis, out of which this paper is written are:

- The design and implementation of algorithm, which can transform regular and context-free grammars into a set of supercombinators.
- The construction of a supercombinator set that contains information obtained from multiple grammar inputs. This set can be viewed as a hierarchy of grammar structures, where in the middle we have most used and therefore most important structures. These structures can be viewed as basic concepts of grammars.
- The identification of properties and limits of such supercombinator set. As the set is nonredundant, it has a limit, We have found out that this limit is Catalan number for our specific supercombinators.
- The use of algorithm in the field of natural language processing.

This contributions can be further researched. Further research include:

- Find out, whether supercombinator set can be used as a new grammar metric.
- Inclusion of our algorithm in the process of combinatory parsing.
- Abstraction of metaoperations from rules, thus achieving even greater abstraction level.
- Further analysis of uses in natural language field, such as detection of sentiment, author, style etc.
- Creating a system, which can generate previously unprocessed sentences. This process would generate those sentences from identified most used supercombinators.

REFERENCES

- [1] R. J. M. Hughes, "Super-combinators a new implementation method for applicative languages," in *Proceedings of the 1982 ACM symposium on LISP and functional programming*. ACM, 1982. doi: 10.1145/800068.802129 pp. 1–10.

- [2] P. Klint, R. Lämmel, and C. Verhoef, "Toward an engineering discipline for grammarware," *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 14, no. 3, pp. 331–380, Jul. 2005. doi: 10.1145/1072997.1073000
- [3] M. Mernik, M. Črepinšek, T. Kosar, D. Rebernak, and V. Žumer, "Grammar-Based Systems: Definition and Examples," *Informatica*, vol. 28, pp. 245–254, 2004.
- [4] J. Kollár, M. Sičák, and M. Spišiak, "Towards machine mind evolution," in *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2015 Federated Conference on*. IEEE, 2015. doi: 10.15439/2015F210 pp. 985–990.
- [5] M. Sičák and J. Kollár, "Supercombinator Driven Grammar Reconstruction," in *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics*. IEEE, 2017. ISBN 978-1-5386-0888-3 pp. 353–358.
- [6] M. Sičák and J. Kollár, "Properties and limits of supercombinator set acquired from context-free grammar samples," in *Proceedings of the 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, ser. Annals of Computer Science and Information Systems, vol. 11. IEEE, 2017. doi: 10.15439/2017F249 pp. 711–720.
- [7] M. Sičák and J. Kollár, "Supercombinator set construction from a context-free representation of text," in *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2016 Federated Conference on*. IEEE, 2016. doi: 10.15439/2016F334 pp. 503–512.
- [8] M. Sičák and J. Kollár, "Supercombinator set acquired from context-free grammar samples," *Computer Languages, Systems & Structures*, vol. 54, pp. 1–19, dec 2018. doi: 10.1016/J.CL.2018.04.001
- [9] E. M. Gold, "Language identification in the limit," *Information and control*, vol. 10, no. 5, pp. 447–474, 1967. doi: 10.1016/S0019-9958(67)91165-5
- [10] L. Onnis, H. R. Waterfall, and S. Edelman, "Learn locally, act globally: Learning language from variation set cues," *Cognition*, vol. 109, no. 3, pp. 423–430, 2008. doi: 10.1016/j.cognition.2008.10.004
- [11] A. Stevenson and J. R. Cordy, "Grammatical inference in software engineering: an overview of the state of the art," in *Software Language Engineering*. Springer, 2013, pp. 204–223.
- [12] J. Kollár, M. Spišiak, and M. Sičák, "Abstract language of the machine mind," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 15, no. 3, pp. 24–31, 2015. doi: 10.15546/aei-2015-0025
- [13] D. Hrnčič, M. Mernik, B. R. Bryant, and F. Javed, "A memetic grammar inference algorithm for language learning," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 3, pp. 1006–1020, 2012. doi: 10.1016/j.asoc.2011.11.024
- [14] A. Clark, "Distributional learning of some context-free languages with a minimally adequate teacher," in *Grammatical Inference: Theoretical Results and Applications*. Springer, 2010, pp. 24–37.
- [15] A. Dubey, P. Jalote, and S. K. Aggarwal, "Learning context-free grammar rules from a set of program," *IET software*, vol. 2, no. 3, pp. 223–240, 2008. doi: 10.1049/iet-sen:20070061
- [16] C. De La Higuera, "A bibliographical study of grammatical inference," *Pattern recognition*, vol. 38, no. 9, pp. 1332–1348, 2005. doi: 10.1016/j.patcog.2005.01.003
- [17] J. F. Power and B. A. Malloy, "A metrics suite for grammar-based software," *Journal of Software Maintenance and Evolution: Research and Practice*, vol. 16, no. 6, pp. 405–426, 2004. doi: 10.1002/smr.293
- [18] M. Črepinšek, T. Kosar, M. Mernik, J. Cervele, R. Forax, and G. Rousel, "On automata and language based grammar metrics," *Computer Science and Information Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 309–329, 2010. doi: 10.2298/CSIS1002309C
- [19] J. Cruz, P. R. Henriques, and D. da Cruz, "Assessing Attribute Grammars' Quality: metrics and a tool," in *Proceedings of the 2015 Symposium on Languages, Applications and Technologies, SLATE'15*, J.-L. Sierra-Rodríguez, J. P. Leal, and A. Simões, Eds. Fundación General UCM, June 2015. ISBN 978-84-606-8762-7 pp. 219–224.
- [20] J. C. A. Cruz, "QG - An Attribute Grammar based System to assess Grammars Quality," Master's thesis, Minho University, Braga, Portugal, Dec 2015.
- [21] N. Carvalho, J. J. Almeida, M. J. Pereira, and P. Henriques, "Probabilistic synset based concept location," in *SLATE'12—Symposium on Languages, Applications and Technologies*. Alberto Simões and Ricardo Queirós and Daniela da Cruz, 2012. doi: 10.198/7062 pp. 239–253.
- [22] S. Ristić, S. Kordić, M. Čeliković, V. Dimitrieski, and I. Luković, "A model-driven approach to data structure conceptualization," in *Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, ser. Annals of Computer Science and Information Systems, M. Ganzha, L. Maciaszek, and M. Paprzycki, Eds., vol. 5. IEEE, 2015. doi: 10.15439/2015F224 pp. 977–984.
- [23] M. Mernik, J. Heering, and A. M. Sloane, "When and how to develop domain-specific languages," *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 37, no. 4, pp. 316–344, 2005. doi: 10.1145/1118890.1118892
- [24] T. Kosar, S. Bohra, and M. Mernik, "Domain-specific languages: A systematic mapping study," *Information and Software Technology*, vol. 71, pp. 77–91, 2016. doi: 10.1016/j.infsof.2015.11.001
- [25] S. Chodarev, "Development of human-friendly notation for xml-based languages," in *Proceedings of the 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, ser. Annals of Computer Science and Information Systems, vol. 8. IEEE, 2016. doi: 10.15439/2016F530 pp. 1565–1571.
- [26] M. Nosál, J. Porubán, and M. Sulír, "Customizing host ide for non-programming users of pure embedded dsls: A case study," *Computer Languages, Systems & Structures*, 2017. doi: 10.1016/j.cl.2017.04.003
- [27] M. Alanen and I. Porres, *A relation between context-free grammars and meta object facility metamodels*. Turku Centre for Computer Science, 2004. ISBN 952-12-1337-X
- [28] J. Cánovas and J. G. Molina, "Extracting models from source code in software modernization," *Software & Systems Modeling*, vol. 13, no. 2, pp. 713–734, 2014. doi: 10.1007/s10270-012-0270-z
- [29] G. Besova, D. Steenken, and H. Wehrheim, "Grammar-based model transformations: Definition, execution, and quality properties," *Computer Languages, Systems & Structures*, vol. 43, pp. 116–138, 2015. doi: 10.1016/j.cl.2015.05.003
- [30] R. Lämmel, "Grammar adaptation," *Lecture notes in computer science*, pp. 550–570, 2001. doi: 10.1111/j.1465-7287.2007.00037.x
- [31] G. Busatto, M. Lohrey, and S. Maneth, "Efficient Memory Representation of XML Documents," in *Database Programming Languages*, G. Bierman and C. Koch, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. doi: 10.1007/11601524_13. ISBN 978-3-540-31445-5 pp. 199–216.
- [32] A. Ranta, "Modular grammar engineering in GF," *Research on Language and Computation*, vol. 5, no. 2, pp. 133–158, 2007. doi: 10.1007/s11168-007-9030-6
- [33] L. Fedorchenko and S. Baranov, "Equivalent Transformations and Regularization in Context-Free Grammars," *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 14, no. 4, pp. 29–44, jan 2015. doi: 10.1515/cait-2014-0003
- [34] V. Basile, J. Bos, K. Evang, and N. Venhuizen, "Developing a large semantically annotated corpus," in *LREC 2012, Eighth International Conference on Language Resources and Evaluation*, 2012.
- [35] M. Steedman and J. Baldridge, "Combinatory categorial grammar," *Non-Transformational Syntax: Formal and Explicit Models of Grammar*. Wiley-Blackwell, 2011.
- [36] D. Leijen and E. Meijer, "Parsec: A practical parser library," *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 41, no. 1, pp. 1–20, 2001.
- [37] S. D. Swierstra, P. R. Azero Alcocer, and J. Saraiva, "Designing and Implementing Combinator Languages," in *Advanced Functional Programming*, S. D. Swierstra, J. N. Oliveira, and P. R. Henriques, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. doi: 10.1007/10704973_4. ISBN 978-3-540-48506-3 pp. 150–206.
- [38] S. D. Swierstra, *Combinator Parsing: A Short Tutorial*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 252–300. ISBN 978-3-642-03153-3

3D object recognition based on symbolization

Milan SPIŠIAK

*Dept. of Computers and Informatics
FEI TU of Košice,
Košice, Slovak Republic
milan.spisiak@tuke.com*

Ján KOLLÁR

*Dept. of Computers and Informatics
FEI TU of Košice,
Košice, Slovak Republic
jan.kollar@tuke.sk*

Abstract—Achieving better human - computer communication is a very important problem in the present. Researches try to find the way how to improve the communication. There are a lot of problems to solve. The world where people live is a very complex one. Computers have a problem to analyze this complexity. For this reason, researchers are looking for new ways to analyze world around us on computers in real time. We present a novel approach to improve human-computer communication by 3D object recognition in this paper. Our approach is based on an object symbolization. We assume if we use the approach based on some object symbolization process we will get method with interesting attributes. One of these attributes is a system overlearning. The system based on the object symbolization doesn't produce the system overlearning. The level of parallelization may get higher than in another approaches, neural networks for example. However we need to find a way how to describe complex 3D objects in a simple way otherwise it will be very difficult to operate with these objects. We plan to verify our approaches on the set of 3D objects. We hope experimental results will show the potential of our work.

Abstract—Dosiachnutie lepšej komunikácie medzi človekom a počítačom je veľmi dôležitý problém v súčasnosti. Súčasný výskum sa preto snažia nájsť spôsob, ako zlepšiť túto komunikáciu. Existuje veľa problémov, ktoré je potrebné vyriešiť. Svet, kde ľudia žijú, je veľmi zložitý. Počítače majú problém analyzovať túto zložitost. Z tohto dôvodu výskumníci hľadajú nové spôsoby, ako analyzovať svet okolo nás v počítačoch v reálnom čase. Prezentujeme nový prístup na zlepšenie komunikácie medzi človekom a počítačom pomocou rozpoznávanie 3D objektov. Naš prístup je založený na symbolizácii objektov. Predpokladáme, že ak použijeme prístup založený na symbolizácii obrazových objektov získame metódu so zaujímavými atribútmi. Jedným z týchto atribútov je napríklad preučenie. Systém založený na symbolizácii nevytvára preučenie. Taktiež úroveň paralelizácií môže byť vyššia ako v iných prístupoch, napríklad ako v prípade neurónových sietí. Musíme však nájsť spôsob, ako popísať zložitý 3D objekty jednoduchým spôsobom, inak to bude veľmi náročne pracovať s týmito objektmi. Plánujeme overiť našu metódu na množine 3D objektov.

Keywords—3D object symbolization, 3D object recognition, object processing, human-communication process, 3D models

I. INTRODUCTION

In this paper, we would like to discuss about the possibilities of 3D object recognition based on the object symbolization. The recognition of 3D object has a high impact in many sectors in present. The methods mainly use approaches based on the deep learning. However we suppose there are methods based on symbolization allow the 3D object recognition. And they have similar or better results than the deep learning

approaches. Our supposition is based on the human brain. If we review the behaviour of human brain, we will see a mechanism where the human brain stores information without redundancy. This fact we can see in real world, such as: the human language learning process. The first language is the most difficult to learn for us. Because it is needed to create the first connections between language structures and the meaning. When we learn the second language, we can compare language structures each others. However, this is just possible when the meaning and language structures are not the same entity. The second example, it may be a brain damage. If human loses ability to speak due to the brain damage he is usually still able to recognize people, things, or something else. He can learn the lost abilities again over time. This situation indicates on the separation of meaning from another structures stored in the brain.

We above wrote about the meaning separation, but now question arises: What is it the meaning from the point of computer view? It is a very simple question, but the answer is difficult. The meaning is a very abstract term. It can express different things in different contexts. How can we teach this the computer? If we look at the essence of this term, we find out the answer. A relation is the most simple explanation, what the meaning means. Relations between things from the real world and language terns. And humans can produce more abstract terms based on these relations. If we teach computer to produce these relations, it will be able to deduce more abstract terms. Our abstract thinking is still based on things from the real world. Because of this, we want to create an approach that will teach the computer to recognize things from the real world. This aim we want to reach by the object symbolization and relations between them. If we want to ensure the computer will be able to understand the same way than us. We need to create connections between words of the nature language and objects. However, if we create the connection between 3D objects each others then the meaning will not be created. If some object don't have name it doesn't have the meaning for people. After the object is named it gets the meaning. And we are able to think about it. However this is not true for the words of natural language. When we create the connection between words of natural language these words have the meaning for us. This is very interesting. The human brain is able to think abstractly. We assume if the computer is able to create connections between things of real world and natural language

then it will be able to understand to some abstract terms. These abstract terms are derived from words which have the meaning for the computer.

Input devices, such as: cameras, may affect the image object symbolization process to the point when we get a wrong result. This problem is a very difficult to solve, because input devices create this problem. These devices have different sensor limitations, such as: sensors generate different noise types. There are many approaches to reduce the noise from the images [1], but all approaches have limitations. It is obvious we cannot resolve this problem by applying software method on image. Therefore, we suggest to use a 3D object mapping method for obtaining additional information about objects. The 3D object information will be used in the process of symbolization as the fundamental information about objects.

The major disadvantage of 3D data usage is a complexity. From point of view humans, the 3D object recognitions is a trivial task. Our brain has evolved to recognize 3D objects. From point of view computers, this is a difficult task. The 3D images usually consist of the depth map. The depth map consists of 3D data, but these data needs to process to usable form such as: a 3D model. And after these step we can start with the symbolization process. The symbolization process allows us to simplify the 3D model to state when computer is able to recognize these objects more easily by a recognizing method.

The symbolization process is a very important because it removes unnecessary data from 3D models. We don't need all information about object to recognize it, we just need the minimalistic set of the object information. The symbolization allows us to reduce these unnecessary object information via the abstraction. If we apply the abstraction repeatedly, we will get more abstract object. However, the object is more simply. Object simplicity may produce a worse recognition result. Design of symbolization method is therefore very important. The symbolization method should allow to perform the abstraction process and keeps the object characteristic at the same time. In this paper, we major focused on design the symbolization method of 3D models. We will also perform the experimental recognition of 3d objects to confirm the usability of our approach.

II. LOADING OF OBJECTS

The first step stands the loading of objects. These objects are 3D models in our case. We may use either model files or 3D scanners to obtain necessary object data. To test our method it is more preferable to use model files, because 3D scanners sometimes generate lacks on models. Since, we use model files we need to choose a file format. There are many formats what we can use for our aims. Our requirement is the object format description should be either similar or the same than format description what 3D scanners generate. Although we use model files, we want to use data of 3D scanner as well as model file in future. Usage of object vertices is the easiest way. We want to avoid to used complex formats. In generally, 3D scanners generate array of 3d points. Usage simple and

complex formats are unnecessary. We chose the wavefront format. The format contains more information about the model that we need such as textures. These redundant information are omitted when object is loaded. The wavefront format describes vertex (V) as following trio:

$$\begin{aligned} X &= \langle 1.2^{-38}, 3.4^{38} \rangle \\ Y &= \langle 1.2^{-38}, 3.4^{38} \rangle \\ Z &= \langle 1.2^{-38}, 3.4^{38} \rangle \\ V &= X, Y, Z \end{aligned}$$

The range of value is large [2]. The symbolization process decreases this range of values. Therefore, the symbolization process is very important. It is able to decrease amount of non-universal object parts and is able to increase amount of universal object parts at the same time.

III. PROCESS OF LAYERING

This section is focused on to divide 3D objects to series of 2D layers. The first step performs normalization of axes values. We perform the step because it makes data more universal. We will try to explain it at an example: We assume we have two cubes. The first is bigger than the second. When we apply the normalization process it will be either very similar or the same. The computer, therefore, recognizes them easier. And it reduces the range of value as well. Method sets the maximal value to 1 and the minimal value to 0.

The process of layering performs the preprocessing of 3D objects before the symbolization process. This step isn't required, but it is good to perform it. It simplifies the symbolization process. We also can transform 3D object to 2D object by the axonometric projections [3]. However we lose a lot of object information. Process of layering divides 3D object to sequence 2D layers. This process is used by MRI/CT systems or software of 3D printers. Although, this process may remove some object information. The level of filtration depends on implementation itself. 3D printers use an approach when layers are calculated by constant value of layer thickness. Thickness is defined by user. Therefore, the method can create layers based on mathematical calculation if certain layer doesn't contain any vertices. This is no ideal for us. Results can contain redundant layers. We want to try two different approaches. The first approach creates constant amount of layers. And second approach creates dynamic amount of layers, but layers are only created at place where vertices are. We suppose these approaches will get the similar results than approach uses the constant value of layer thickness. However results don't contain redundant data.

A. Fixed Amount Of Layers

The first approach uses the fixed amount of layers. Input object is divided to sever layers with the same thickness. All object vertices are inserted to these layers. If layer doesn't contain any vertices it is removed from the result set. This step ensures the minimal set of layers. Amount of vertices is different for each layers. This non-linear vertex distribution may cause wrong object symbolization. Further,

the method performs object deformation when we apply it on partial objects. We wanted to know why it performs this deformation. We therefore reviewed method behaviour in more detail. The method deforms objects because it has to create the constant amount of layers. We expected tiny differences between the original object and the partial object. However, when we manual compared results we found out that these differences are bigger than we expected. The symbolization process may enlarge differences between them. The question is: How much will symbols be affected? Will symbols be usable for recognition after the symbolization? We will try to find answers to these questions in further parts of this work.

B. Dynamic Amount Of Layers

The second approach is very similar to approach uses the constant value of layer thickness. Our approach creates layers based on vertex position. Layers are created only at places where vertices are. This is the main difference between these approaches. The vertex dispersions get very similar results to the first approach. We therefore assume that the constant value of layer thickness causes this non-linear dispersion of vertex in layers. We apply the same object to the approach. Results are more better than in the first approach. The method creates similar layers for whole and partial object. Because of this the approach is more usable to the symbolization process than the first approach. Thought this approach is better than the first. We will apply the symbolization to both approaches. We want to know which approach will produce better results. Although it is more likely the second approach will produce better results than the first one. However we want to be sure.

IV. SYMBOLIZATION

The object abstraction is reason why we want to use the symbolization. There are many ways how to use the symbolization process to describe complex data such as 3D objects.

We found out that approaches based on the chain code are very useful in this area. The chain code uses the relative position between two point of object to calculate a director vector. The calculation performs the subtraction of particular axes values. The result is transformed to direction vector. The chain code usually uses four or eight direction vectors. Transformation rules is defined based on the number of direction vectors. Fig.1 shows schema describing rules for eight vector. The range of values that direction vectors can gain is significantly lower than the range of value that 2D point can gain. This process improves the object abstraction. Director vectors create something like shape of object in specific layer. If we just got partial object these shapes would be very similar. The recognition process should be able to adapt on differences if they existed.

Each vector is transformed to one letter. Set of letter Σ is following :

$$\Sigma = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$$

X1 > X2 Y1 > Y2	X1 = X2 Y1 > Y2	X1 < X2 Y1 > Y2
X1 > X2 Y1 = Y2	x1 y1	X1 < X2 Y1 = Y2
X1 > X2 Y1 < Y2	X1 = X2 Y1 < Y2	X1 < X2 Y1 < Y2

Fig. 1. Rules for matrix 3x3

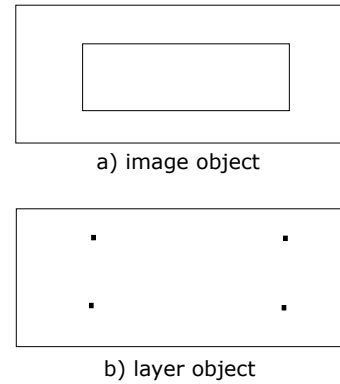


Fig. 2. Differences between objects on image and 2D layer

The approach contains specific mechanism how we can manage the amount of output vectors. We therefore can change robustness of results. The method was developed to describe objects on images. Thought, 2D layers are very similar to image, but they are not the same. We will try to explain this on an example. We assume we have object stands a cube. Fig.2 shows visualization of the first cube layer.

The Fig.2-A shows image representation of object and the Fig.2-B show layer representation of the same object. As we see object on the Fig.2-A consists of lines while the Fig.2-B object consists of points. When the method creates vectors it creates them based on the value of substance as we mentioned. We can set up distance between these points. We can manage the robustness of results by this way. When we use 2D layer we can't manage robustness by this ways. Because there are only points. We therefore can't use distance between points. It may point at the place where aren't any points. We can calculate relative position of these imagery points. However we think it is unnecessary. The reason why we do this process is gone. The absence of robustness may cause more sharpness of object description. However, if we add additional letters to definition we will gain smoother object description. So far, we use matrix 3x3. And now we want to replace this matrix by matrix with resolution 7x7. This matrix extension adds new 16 letters. The letter set Σ now consists of following letters:

$$\Sigma = \{a, b, c, d, e, f, g, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, v, x, y, z\}$$

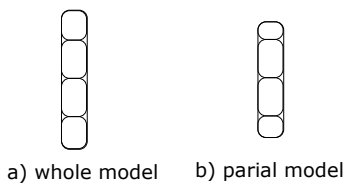


Fig. 3. Results of the method based on the fixed amount of layers

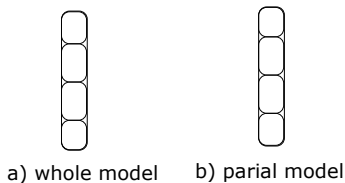


Fig. 4. Results of the method based on the dynamic amount of layers

A. 3D Layer Composition

To preserve all 3D information about object we need perform the symbolization process at all three axis. Thanks to this process the recognition process will be simpler and more precisely. The recognition process will not have to figure out the direction of object symbolization.

B. Validation Of Layering Process

We described two layering approaches in the previous section. We now apply the symbolization process at the results of these methods. We use simple model of cracker for this aim. And we used whole model and partial model of cracker. We start with the method based on fixed amount of layers. The Fig.3 shows visual representation of the first layer. As we can see these models aren't the same. We expect these results. As we mentioned the fixed amount of layers causes these differences.

Subsequently, we apply the second layering method at the same data. This method uses the dynamic amount of layers. We therefore expect different results. Fig.4 shows visual representation of the first layer. As we see, results are the same. Although, differences between objects in the first case aren't large. However these mistakes will be increase in further layers.

V. CREATING CONNECTIONS

The meaning of objects is very important to improve of communication between human and computer. The process of meaning creation is shrouded in mystery. It isn't easy to describe what meaning is. It isn't easy to teach computer this term. Neural networks are able to learn complex information. They don't need to define what the meaning is. They are able to categorize abstract information without exact rule definition for this aim. Due to this fact they are so successful in the recognizing area.

We want to use symbols and connect them with words of natural language. These connections represent the simple meaning. Construction of these connection mightn't be very difficult, because we have two or more data sets (Fig.5

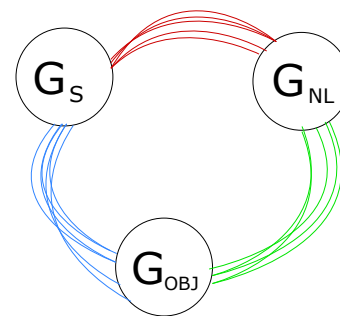


Fig. 5. Visual representation of connections between different set strings

shows visualization of these connections between different type of string sets). These sets contain all what we need to make connections between them. We try to keep these set in minimalistic forms, because the amount of data may be huge. We therefore apply the process of reducing data redundancy in the sets. We may connect sets describing objects by different ways. This attribute provides high diversity of input type. We may use sound, 3D objects and soon on. The diversity is very similar to the diversity of neural networks. Our approach uses teacher-based approach to gain the meaning of objects.

We mentioned we try to keep set of symbols in the minimalistic form. Symbols are represented by strings. When a new object contains some strings that is already in another objects, it is created link between the existing string and a new object. In such a case it is achieved the minimalist set of object strings. The appearance of these connections are very similar to the appearance of connections on Fig.5.

VI. EXPERIMENTS

To confirm attributes of our methods we need to do some experiments. We want to determinate the ability of our approach to the object recognition. Experiments are divided to two steps. The first step represents the learning process of 3d objects. The second step stands the recognition of modified objects.

A. Recognition Process

In the experimental procedures we need to use an recognition method. In this work we don't primary focused on design the recognition method. That's why we use a simple recognition method based on layer matching. The method gets object to recognize it. This object is divided to layers and then layers are symbolized. These symbolized layers are compared with stored objects in the system. This comparison consists of comparison of strings. To explain this process we assume that we have the following samples:

String of partial object	String of stored object	Similarity
msaxd	msag	3 of 4 = 75%
saxd	msag	2 of 4 = 50%

The method calculates similarity for each layer of object. If stored object contains a bigger amount of layers the similarity of last layers are set up to 0. The method doesn't do anything

in opposite scenario. When the method calculates similarity for each layer of stored object than it is able to calculate the total similarity by formula(1):

$$S_g = \frac{\sum_{i=0}^{C_l} S_l(i)}{C_l} \quad (1)$$

C_l stands the number of stored object layers. Function $S_l(i)$ returns the the value of similarity for specific layer i . S_g is the total similarity of object. Object that obtains the highest value of similarity is considered as the recognized object.

B. Learning Process

In this process we add new 3d objects to our system. We added 15 different 3d objects (they are shown on Fig.6). We can see these objects are significantly different. The method arguments contain a 3D object and name of this object. We discussed about storing of objects. However we haven't focused on the way how to store words of natural language. To store words of natural language we use the construction called dictionary. The construction consists of pair values: a key and a value. The key is unique identification and the value is specific word. We ensure that the dictionary contains non-redundant values.

The key is used to create connections between different string sets. We processed the learning process in two stages. In the first stage we added the first seven objects (they are the first seven objects shown on Fig.6). In the second stage we added the rest. The aim is to figure out how will be changed the probability of existing objects when it is added a new object to the system.

C. Recognition Of Modified Objects

Previous step ensures filling up the system with data. We will apply modified 3D objects(partial objects) on the stored objects in this step. Similar to the previous step, this process is divided into two separate phases. The first phase tries to recognize an partial object in the system consisting of the first 7 objects(Fig.6). The second phase uses 15 stored objects instead of 7 objects. Results are shown in Table 1. Results of the first phase are the same than results of the second phase. This finding is very important. Because results of method are stable over time the system will never be overlearned. This is a very important attribute in the recognition method. When we want to use concurrency method such as neural networks or deep neural networks we need to forecast the resolution of layers. We also should do the learning process several times to gain the best recognition results. Our approach doesn't demand this steps. The level of parallelization is high as well. The approach allows to perform the recognition method parallel. The layers may be parallel compared. That's mean the level of parallelization is equals to the number of object layers.

As we can see in Tab.1 all partial objects have been successful recognized. The difference of similarity between correct objects and incorrect objects is significant. The minimal value of similarity is 65 % in the case of correct objects. The maximal value of similarity is 27% in the case of incorrect

objects. Fig.8 shows the average similarity for correct and incorrect objects. While the average similarity of correct objects is 94%, the average similarity of incorrect objects is just 7%. This high difference between average values should ensure the successful object recognition if we used higher amount of objects.

D. System Attributes

Thought, we don't primary focus on system attributes in this paper. Some attributes are interesting to review. We focus on the redundancy of layer strings. This attribute affects the system performance and specifies the level of parallelization. Stored strings are non-redundancy. We want to know the amount of all strings including redundant strings. When we compare the amount of redundant strings and the amount of non-redundant strings we will know the ratio between them. If the values are similar the objects consist of unique strings. In such a case, system requirements will be increased when new objects are added to the system. It is obvious, this isn't an ideal scenario for large systems. However if objects consist of more universal strings the amount of non-redundant strings will be significant lower than the amount of redundant strings. The system requirements will not increase linearly when new objects are added to the system. This scenario is more ideal for large system.

Table 2 shows data what we measured. The learning process stored information about the total amount of strings and the amount of non-redundant strings when it learned objects. To better visualization we shows data on a chart(Fig.9). The total amount of strings is approx 26000 after adding the last object. And the amount of non-redundant string is approx 2300. The chart(Fig.9) shows that both attributes have a linear behaviour. However, the total amount of string has increasing faster than the amount of non-redundant strings. The difference between these two attributes is approx 10 times. Current results show that strings rather consist of universal parts than unique parts. This is good news for us. Even though the system will be able to recognize a lot of objects it will contain a tiny amount of strings. For this reason, the system requirements will be low.

VII. RELATED WORK

We took inspiration from works of Thiemann [4], Takano [5], Murase [6] and Salem [7] when we were creating our 3D symbolization approach. These works suggest very interesting concepts how to recognize visual objects. So far, the 3D symbolization has mainly used to symbolize buildings as shown works Thiemann [4] and Kada [8]. These approaches are focused on special area, the approaches have some limitation. We further inspired of works Zhou [9], Takano [5]. They use the symbolization to describe images. This process allows them to create large system recognizing human motion [5] for instance.

As we presented in this paper, we used the chain code to describe objects. Works of Siddiqi [10], Salem [7], Kollar [11] and Bribiesca [12]use the chain code as well. The first three works use the chain code to symbolize 2D objects. The



Fig. 6. Whole objects that were used in the learning and the recognition process

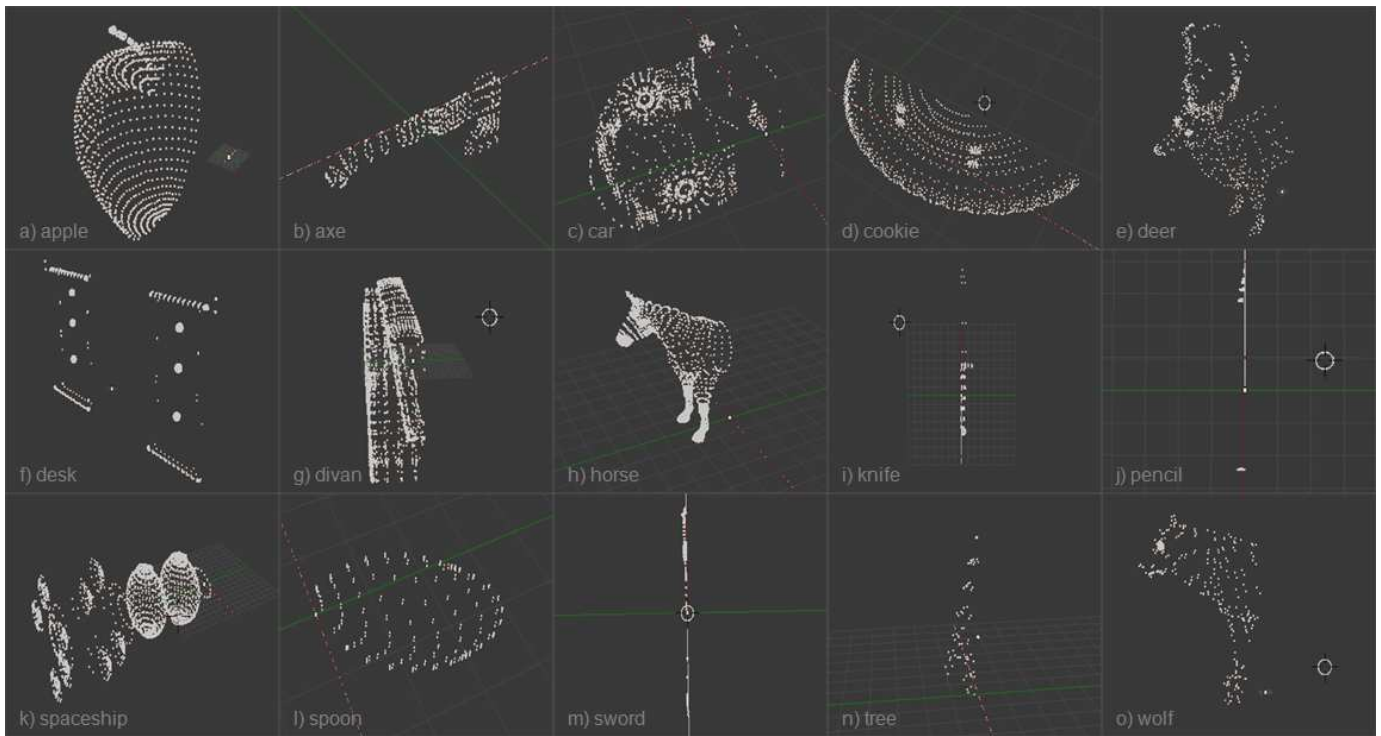


Fig. 7. Partial objects that were used in the recognition process

TABLE I
RECOGNITION RESULTS

	apple	axe	car	cookie	deer	desk	divan	horse	knife	pencil	ship	spoon	sword	tree	wolf
apple	99.4%	5.9%	5.8%	4.7%	8.4%	3.1%	7.5%	14.1%	7.7%	5.6%	4.1%	4.3%	6.5%	13.7%	6.4%
axe	9.8%	100%	10.1%	14.7%	3.8%	19.6%	3.8%	1.6%	10.7%	11.3%	1.4%	2.9%	16.2%	7.6%	5.9%
car	5.7%	2.9%	100%	7.0%	6.8%	5.7%	9.0%	11.5%	2.0%	5.6%	6.5%	2.9%	3.8%	10.7%	6.3%
cookie	5.2%	3.3%	9.3%	99%	8.6%	6.1%	6.5%	15.5%	3.5%	7.5%	7.2%	5.8%	2.6%	13.7%	4.3%
deer	7.4%	5.2%	5.2%	6.4%	100%	1.7%	7.4%	10.5%	2.8%	7.5%	4.2%	4.9%	3.3%	16.6%	5.5%
desk	3.4%	1.8%	7.2%	6.9%	3.9%	100%	3.6%	7.6%	3.5%	3.0%	2.7%	3.9%	1.6%	4.1%	3.5%
divan	5.2%	1.6%	7.1%	4.7%	7.9%	4.6%	70.0%	18.5%	3.8%	8.6%	6.3%	5.0%	1.6%	10.7%	9.7%
horse	5.3%	7.8%	6.6%	5.5%	7.5%	2.0%	10.1%	100%	10.3%	5.2%	5.2%	4.3%	1.4%	10.7%	7.8%
knife	3.2%	2.8%	4.2%	5.7%	4.0%	3.2%	2.8%	17.0%	96.6%	3.2%	3.1%	6.2%	8.0%	4.1%	6.2%
pencil	6.2%	6.2%	5.0%	9.0%	6.2%	6.2%	16.0%	16.0%	8.0%	100%	0.0%	18.7%	6.2%	9.0%	12%
ship	4.7%	0.0%	9.0%	6.7%	3.9%	5.2%	7.4%	14.2%	5.1%	3.0%	65.9%	6.5%	4.9%	3.5%	4.4%
spoon	6.1%	5.9%	2.9%	1.8%	5.5%	2.0%	4.0%	3.9%	4.0%	7.3%	10.2%	97.9%	4.3%	10.3%	4.0%
sword	5.4%	4.4%	4.0%	3.2%	4.1%	3.0%	2.0%	6.1%	4.6%	4.8%	5.8%	5.1%	96.3%	8.3%	2.1%
tree	15.3%	7.6%	0.0%	0.0%	14.2%	9.0%	7.1%	27.2%	18.1%	7.1%	9.0%	14.2%	9.0%	90.9%	9.0%
wolf	7.6%	5.0%	8.3%	6.8%	4.8%	1.7%	12.0%	12.0%	3.5%	6.0%	6.8%	4.6%	1.5%	12.5%	98%

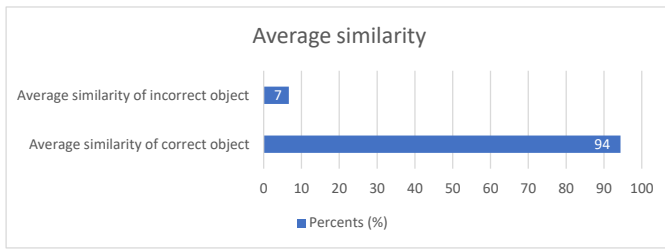


Fig. 8. Average similarity of correct and incorrect objects

TABLE II
THE AMOUNT OF REDUNDANT AND NON-REDUNDANT STRINGS

Step Num#	Amount of non-redundant strings	Total amount of strings
1	297	2258
2	393	3184
3	424	4415
4	434	4571
5	484	5145
6	774	9000
7	1080	11540
8	1297	15370
9	1776	19140
10	1797	19396
11	1907	20224
12	1933	20538
13	1977	20922
14	2065	22257
15	2303	26192

fourth work uses it to symbolize 3D objects. We decided to use it to 2D symbolization to process 3D objects. We therefore need to apply some process which splits 3D objects to several 2D layers. Bosche’s work [13] is very inspiring in this area. Burel’s [14] work is focused on the problem of 3D object orientation. When we recognize 3D object we apply the reduction of object orientation. It is improve the recognition results.

In this work we presented simple recognition method. When we had creating the method we were reviewed works in this research area. Works of Belongie [15] and Shotton [16] are used as base of our recognition method.

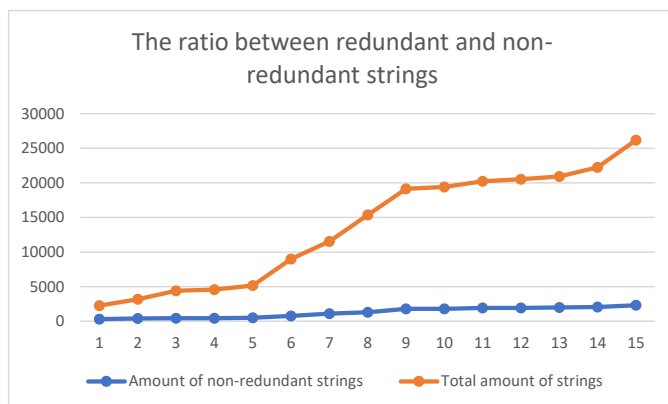


Fig. 9. The ratio between redundant and non-redundant strings

VIII. CONCLUSION

In this work we presented our method for the recognition of 3D objects based on symbolization. Our method uses process of splitting 3D objects to 2D layers. And these 2D layers are subsequently symbolized. We uses the symbolization process based on the chain code. The approach allows to describe objects very detailed. Results of the symbolization process are stored to the experimental system. The system stores only non-redundant results. This restriction ensures the minimalistic set of results. Results are represented by strings in our case. We inserted 15 3D objects to the systems. These objects produced approx 26000 strings. However 2300 string are just unique. This difference indicates that objects consist of universal parts. This case more ideal than the opposite case. The level of parallelization is further important attribute. The recognition process can be applied on the all strings simultaneously. For this reason the level of parallelization equals the amount of strings. We assume the method will get a good result in the massive parallel system based on the SIMD or MIMD architectures.

Our approach successful recognized all tested objects. The average similarity of these objects is approx 97 percent. In contrast the average similarity of incorrect objects is only 7 percent. A larger set of object may have some different results, but it is a matter of further research.

REFERENCES

- [1] M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle, *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning, 2014.
- [2] W. Kahan, "Ieee standard 754 for binary floating-point arithmetic," *Lecture Notes on the Status of IEEE*, vol. 754, no. 94720-1776, p. 11, 1996.
- [3] I. Carlbom and J. Paciorek, "Planar geometric projections and viewing transformations," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 10, no. 4, pp. 465–502, 1978.
- [4] F. Thiemann and M. Sester, "3d-symbolization using adaptive templates," *Proceedings of the GICON*, 2006.
- [5] W. Takano, K. Yamane, and Y. Nakamura, "Capture database through symbolization, recognition and generation of motion patterns," in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 3092–3097.
- [6] H. Murase and S. K. Nayar, "Learning and recognition of 3d objects from appearance," in *Qualitative Vision, 1993., Proceedings of IEEE Workshop on*. IEEE, 1993, pp. 39–50.
- [7] A.-B. M. Salem, A. A. Sewisy, and U. A. Elyan, "A vertex chain code approach for image recognition," *ICGST International Journal on Graphics, vision and Image processing*, vol. 5, no. 3, pp. 1–8, 2005.
- [8] M. Kada, "3d building generalisation by roof simplification and typification," in *Proceedings of the 23th International Cartographic Conference, Moscow, Russian Federation*, 2007.
- [9] X. Zhou, X. Zhou, A. Bouguettaya, J. Taylor *et al.*, "A subspace symbolization approach to content-based video search," in *Data Engineering, 2009. ICDE'09. IEEE 25th International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 1191–1194.
- [10] I. Siddiqi and N. Vincent, "A set of chain code based features for writer recognition," in *Document Analysis and Recognition, 2009. ICDAR'09. 10th International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 981–985.
- [11] J. Kollár and M. Spišiak, "Direction vector grammar," in *Scientific Conference on Informatics, 2015 IEEE 13th International*. IEEE, 2015, pp. 151–155.
- [12] E. Bribiesca, "A chain code for representing 3d curves," *Pattern Recognition*, vol. 33, no. 5, pp. 755–765, 2000.
- [13] F. Bosche and C. Haas, "Automated retrieval of 3d cad model objects in construction range images," *Automation in Construction*, vol. 17, no. 4, pp. 499–512, 2008.

- [14] G. Burel and H. Henoco, "Determination of the orientation of 3d objects using spherical harmonics," *Graphical Models and Image Processing*, vol. 57, no. 5, pp. 400–408, 1995.
- [15] S. Belongie, J. Malik, and J. Puzicha, "Shape matching and object recognition using shape contexts," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 24, no. 4, pp. 509–522, 2002.
- [16] J. Shotton, J. Winn, C. Rother, and A. Criminisi, "Textonboost: Joint appearance, shape and context modeling for multi-class object recognition and segmentation," in *European conference on computer vision*. Springer, 2006, pp. 1–15.

Integrating Runtime Metadata with Source Code to Facilitate Program Comprehension: An Overview

Matúš Sulír

Department of Computers and Informatics
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Technical University of Košice
042 00 Košice, Slovakia
matus.sulir@tuke.sk

Jaroslav Porubán

Department of Computers and Informatics
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Technical University of Košice
042 00 Košice, Slovakia
jaroslav.poruban@tuke.sk

Abstract—We briefly summarize the main results of our dissertation, aiming to facilitate program comprehension and maintenance, particularly by integrating the data collected during program execution with source code. In our thesis, we provided a literature overview of approaches labeling source code with various types of metadata, including data obtained from running programs. After an experiment studying the effect of the presence of concern annotations in code, we demonstrated their semi-automated insertion. The problem of runtime metadata persistence in the code was discussed, suggesting suitable formats and workflows. We also found that many strings displayed in the running applications were not found in their source code or had too many occurrences. For this reason, we designed RuntimeSearch – an approach to runtime string searching. The approach was validated using a controlled experiment with human participants. Next, we presented DynamiDoc, a documentation generator utilizing information from dynamic analysis. As an alternative, we suggested an interactive approach to source code augmentation, RuntimeSamp. Collected sample values of variables are displayed next to each source code line in the editor. As a supplement, we provided a systematic mapping study of visual augmentation of source code editors.

Abstrakt—Stručne sumarizujeme hlavné výsledky našej dizertačnej práce, zameriavajúcej sa na zjednodušenie chápania a údržby programov, predovšetkým integrovaním údajov zbieraných počas vykonávania programu so zdrojovým kódom. V našej práci sme poskytli literárny prehľad prístupov označujúcich zdrojový kód rôznymi typmi metadát, vrátane dát získaných z bežiacich programov. Po experimente študujúcom efekt prítomnosti zámerových anotácií v kóde sme demonštrovali ich poloaautomatické vkladanie. Diskutovalo sa o probléme uchovávanie behových metadát v kóde, navrhujúc vhodné formáty a pracovné postupy. Zistili sme tiež, že mnoho reťazcov zobrazených v bežiacich aplikáciách nebolo nájdených v ich zdrojovom kóde alebo mali príliš veľa výskytov. Preto sme navrhli RuntimeSearch – prístup k behovému vyhľadávaniu reťazcov. Prístup bol overený pomocou riadeného experimentu s ľudskými účastníkmi. Ďalej sme predstavili DynamiDoc, generátor dokumentácie využívajúci informácie z dynamickej analýzy. Ako alternatívu sme navrhli interaktívny prístup k rozširovaniu zdrojového kódu, RuntimeSamp. Zozbierané vzorové hodnoty premenných sú zobrazené vedľa každého riadku zdrojového kódu v editore. Ako

doplnok sme ponúkli systematickú mapováciu štúdiu vizuálneho rozširovania editorov zdrojového kódu.

Index Terms—program comprehension, software maintenance, dynamic analysis, text search, documentation, integrated development environment

I. INTRODUCTION

Maintenance of existing computer program systems typically counts for about 60% of software development cost [1]. Before a part of a system can be changed, it must be comprehended [2]. Nowadays, software projects are built using large frameworks. Systems have an immense number of dependencies and their behavior often depends on results of asynchronous calls to remote servers. They consist of multiple layers and having a web or mobile interface becomes a standard. Project teams are large and dispersed over the world [3], which hinders traditional communication about intents in the source code. Without proper tool support, understanding of software systems may soon become an unattainable task. Therefore, our work aims to improve understanding of existing programs by developers, i.e., *program comprehension*.

A programming language should serve as a mean of communication between a human and a computer. A valid source code of a program, by definition, contains all required information to be unambiguously compiled and executed on a computer. On the other hand, the source code is often understood by humans with great difficulties, or not at all. This can be attributed to a lack of information useful for humans contained in the code. Many approaches aim to fill this gap by assigning additional *metadata* to source code elements. These metadata can come from diverse sources [4]: from manually entered comments, through documentation generated by static analysis, to harvested instant messages. They can be of various types – from numeric values to texts and images – and presented in even more various ways. They can be permanently persisted in the source code or a database, or shown only for a split second in the integrated development environment (IDE).

This work was supported by project KEGA 047TUKE-4/2016 Integrating software processes into the teaching of programming.

A particularly interesting kind of metadata are data obtained by dynamic analysis, i.e., *runtime* metadata. During the execution of a program, inherently abstract source code becomes concrete. Individual runtime states and their transitions offer the developer exemplified views of the program.

The ultimate goal of our thesis is to improve program understanding efficiency, particularly by integrating the runtime information with the source code. We designed a few approaches trying to at least partially fulfill this ambitious goal. Along with them, we provided motivational empirical studies, evaluations and literature reviews about related topics.

In this paper, we provide an overview of our dissertation [5], its main research methods and results. The information presented here is less terse than in the conference version of the overview [6]; however, for a more elaborate discussion, see our papers which are cited throughout the paper.

II. METHOD

This section briefly describes the discussed topics and list hypotheses and research questions of our thesis. We note the used research methods.

A. Program Comprehension

In the survey paper [7], we provided a general overview of program comprehension theories, approaches and tools in the form of an *ad hoc literature review*. Then we outlined rising and falling trends [8] in program comprehension over the timeline of 15 years. We asked the research question:

- What are the rising and falling trends in program comprehension?

An automated technique of *trend analysis* on titles, abstract and keywords of scientific papers was used.

During multiple experiments, we recognized the importance of the software build process. Many open source projects fail to be built from source code, which, besides being a practical problem, hinders program comprehension research. A successful build result is a prerequisite for almost all comprehension activities, including the assignment of dynamic analysis data to parts of source code. Although there exists limited evidence about build failures (e.g., by Neitsch et al. [9] or Seo et al. [10]), the studies are rarely large-scale and suffer from low external validity. To quantify the severity of the build failure problem, we tried to fully automatically build about 7,000 Java projects. In [11], we ask the following research questions:

- What portion of projects fails to build?
- What types of build errors do occur most frequently?
- Is there an association between the build success/failure and other project's properties (e.g., the used build tool, age)?

To answer the first two questions, we use *quantitative methods*. *Statistical hypothesis testing* is used for the third question.

B. Source Code Labeling

Since understanding a program only by looking at its source code is difficult, many approaches label parts of the code with various metadata. They include human-written descriptions of methods, information obtained from static and dynamic analysis, IDE interaction data, information from version control systems and other communication artifacts. These metadata are then presented to the programmer by appropriate tools. We conducted a partially *systematic mapping study* with the aim of taxonomy construction in this broad research area. We combined manual searching of selected years from relevant conferences and journals, keyword search and references search, and a personal bibliography. The main purpose was to show the variety of the research area. The following questions were asked in our article [12]:

- What approaches (and tools implementing them) do exist to label parts of source code with additional metadata and present them to a programmer in order to improve program comprehension?
- How can these approaches be categorized?

Concern annotations represent a specific kind of source code labeling. They are human-written Java annotations describing the intentions behind a particular class or method. Using a *controlled experiment* with human participants, we tested [13] the following hypothesis:

- The presence of concern annotations in the code improves program comprehension and maintenance correctness, time and confidence.

To further support our hypothesis, we also performed an *experiment replication* [14], now on industrial developers instead of students.

Manual insertion and updating of concern annotations in the source code are tedious. Thus we designed a runtime-based, semi-automated approach of concern annotation [15]. This method uses an existing dynamic analysis approach (software reconnaissance [16]) to extract sets of methods pertaining to the given feature. Then we build upon the work which compares the overlap of multiple independent human annotators of the same code by asking the (not yet published) research question:

- How does the overlap between semi-automatic and code author's annotations compare to the overlap among annotations of multiple non-authors?

The previously mentioned approach can be extended to any runtime metadata, not only concern annotations. In the article [17], we describe a method which assigns information obtained from dynamic analysis to source code elements – e.g., a set of dynamic method callers or code coverage results. Thus we ask the question:

- How can runtime metadata be persisted directly in source code files?

We discuss what formats are suitable for metadata persisted in source files and how such an approach fits into an existing software development workflow.

C. Searching Concepts in Running Programs

Programmers often interact with the UI (user interface) of a running program, putting themselves in the role of end users. They create mappings of UI elements to the source code in their minds [18]. However, anecdotal evidence says us that not every textual label displayed in the GUI (graphical user interface) can be easily found in the source code. Therefore, we decided to *quantitatively* examine the relationship between the terms occurring in the static source code and the labels displayed in the GUI of a running program. The GUIs of four open source Java applications were automatically traversed, producing a list of strings and words contained in these strings. In our paper [19], we ask three research questions:

- What portion of strings and words displayed in the GUIs of running desktop Java applications are located in their static source code too?
- Mainly in what types of files are these terms located?
- If some strings are not located in the source code, what are common reasons?

This study presents a motivation for the approach we designed – RuntimeSearch [20]. It allows a developer to find run-time values in a manner similar to traditional, static source code search. After entering the searched string, the program is run, while comparing all evaluated string expressions at runtime with the given text. When a match is found, the program is paused and a traditional debugger is open, with all standard operations available. This is useful as a lightweight form of feature location or to confirm hypotheses during debugging. We had two research questions and one hypothesis regarding our new approach:

- What are possible use cases of RuntimeSearch?
- What is the performance overhead of searching strings in the runtime?
- RuntimeSearch improves the efficiency of search-focused maintenance tasks.

They were answered using *performance evaluation*, a *case study*, and a *controlled experiment*, respectively.

D. Generating Documentation from Runtime Values

There exist multiple approaches which label the source code by automatically generated documentation [21]. However, they traditionally process the static source code of a program and associated collaboration artifacts. Our new approach – DynamiDoc, described in the article [22], generates documentation sentences for methods using information from dynamic analysis. For each method, string representations of concrete arguments, return values and object states before and after the method execution are recorded. Then, sentences utilizing sample values are generated. For example, for a list reversal, the sentence can look like: “When called on [1.5, 2], the object changed to [2, 1.5].” We perform both a *qualitative* and preliminary *quantitative* evaluation [23]:

- What are the strengths and weaknesses of DynamiDoc?
- What is a typical length of documentation sentences generated by DynamiDoc?

- What portion of objects contained in the generated sentences has a custom string representation?

E. Augmenting Code Lines with Variable Values

Instead of inserting metadata into source code files, it is also possible to develop an interactive approach in the form of an IDE plugin. In recent years, we noted the advance of visual enhancements of source code editors. The IDEs for textual languages are no longer purely textual – they display graphs, charts, texts and other information directly next to the related code. We would like to use this fact with advantage and design an IDE augmentation approach using dynamic analysis.

First, we performed a *systematic mapping study* about visual augmentation of source code editors in general. In our paper [24], the following questions are answered:

- What source code editor augmentation tools are described in the literature?
- How can they be categorized?

Finally, in the article [20], we describe RuntimeSamp – our technique of visual source code augmentation using runtime information, namely the values of variables. First, a few values of each variable are recorded during program execution. Next, at the end of each line, the sample values are displayed thanks to an IDE plugin. The approach has a similar base idea as DynamiDoc – to help the programmer by presenting concrete examples of values; however, this time they are assigned to each line instead of the method as a whole. The following research questions were asked:

- How to present complicated objects succinctly on a small space?
- When exactly should we capture the values of variables?
- How to decide which iteration to display?
- How to define an iteration in a way which is easy to detect and present?
- How to collect enough data for sample values presentation while keeping the overhead reasonable?
- Which variable values should be displayed and which not?
- When and how to invalidate the collected variable values?

Since RuntimeSamp is a preliminary approach, we answered some of these questions only naively, leaving space for further research.

III. RESULTS

Now we will summarize the main results described in our dissertation [5].

A. Program Comprehension Trends

Our general goal is to improve program comprehension. Therefore, we first examined the research area and its trends. According to the study [8] performed on the bibliographic data of research articles, feature location and open source systems were trending. On the other hand, program slicing and the study of legacy systems were gradually falling.

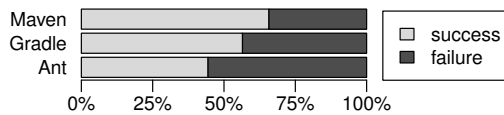


Fig. 1. Build status for individual build tools [11]

B. Buildability of Software Systems

Being able to build a software system is a prerequisite for program comprehension activities, particularly for approaches connecting runtime information with the source code. In our study [11], an attempt to build about 7,000 Java projects from GitHub ended with a failure in 38% of cases. The most frequent errors were dependency-related. The probability of a build failure is associated with the tool used, project size and age. Fig. 1 displays the percentage of build status and failure for each build tool individually.

C. Labeling Source Code with Metadata

Before focusing specifically on runtime information, we reviewed [12] multiple approaches which label parts of the source code with various kinds of metadata. We categorized 25 of them into a taxonomy with four dimensions: source, target, presentation and persistence.

D. Manual and Runtime-Based Concern Annotation

Then we studied (see [13], [14]) the effect of a certain code labeling approach, concern annotations, on program comprehension. Thanks to the controlled experiments, we found that the presence of concern annotations in the source code improves comprehension and maintenance correctness and time. The measured difference was 33% and 34%, respectively.

Traditionally, concern annotations are inserted into the source code manually. We presented [15] a simple tool, AutoAnnot, which uses runtime information to write them into the source code, shifting the source of the metadata (with respect to our taxonomy) from human to runtime. By integrating the existing results in this area with our findings, we stated [5] that the overlap between the annotations produced by this tool and the code author's annotations is higher than the overlap among at least 3 of 7 non-authors, but lower than the overlap among two of them.

E. Persisting Runtime Metadata

Next, we studied [17] the possibilities of an internal persistence of runtime metadata. Two suitable formats were described: annotations for certain element-level data and comments for line-level metadata. For certain kinds of data, such as critical bottlenecks determined by profiling, we suggest a shared workflow where the data are checked into a version control system. For other kinds, we recommend a local-only workflow, which can be perceived as an IDE-independent form of integration of tools with source code editors [25].

F. Location of GUI Concepts in Source Code

Programmers often try to find strings displayed in the GUI of a running program in the source code. In our simulation study [19] performed by GUI-scraping four desktop Java applications, about 11% of strings and 4% of words were not found in the code at all; 24% of strings and 49% of words had at least 100 occurrences (for detailed results, see Table I). About 33% of the found strings and 49% of words did not occur in Java source files. XML, “.properties” and other file types require the programmer to perform multiple steps until the feature implementation is found. Many strings did not have any occurrence because they were dynamically generated at runtime. To sum up, the strategy of finding the displayed strings using traditional, static source code search available in the current IDEs is often insufficient or impractical.

G. Searching in Runtime Values

The GUI study represents one of the motivational factors for our newly designed approach, RuntimeSearch [20]. Instead of searching in the static source code, it searches in all strings being evaluated in a running program. When a match is found, the program is paused and all debugging features of the IDE are available. RuntimeSearch is useful to find an initial investigation point in the source code, search for multiple occurrences throughout the application layers, find also non-GUI strings (e.g., the contents of a file buffer) and confirm hypotheses about strings in the program. We also introduced a “fabricated string technique” when the programmer searches for a made-up string which he entered into the component of interest. In a preliminary performance evaluation, the time overhead was near-zero without an active search, about 38% otherwise. A (not yet published) controlled experiment with human participants shown a 60% improvement of efficiency during maintenance tasks focused on searching displayed strings.

H. Generating Documentation from Runtime Information

After programmers find the relevant portion of the code, they often read the documentation of the methods, which should ideally contain useful examples. We introduced DynamiDoc [22], a documentation generator utilizing runtime information. It collects string representations of arguments, return values, thrown exceptions and current object changes. Then, it generates documentation sentences containing samples of these collected values. In a qualitative evaluation, we found it suitable particularly for utility methods and methods manipulating simple data structures. On the other hand, in complicated methods manipulating many objects, we observed its weaknesses. As a form of preliminary quantitative evaluation, two findings were presented [23]. First, an average length of a documentation sentence is approximately 10% of the associated method length. Second, 88% of objects taken from a small sample had a custom toString method, which is a prerequisite for the usefulness of DynamiDoc.

TABLE I
THE OCCURRENCE COUNTS OF WHOLE STRINGS FROM GUIs IN THE SOURCE CODE [19]

Application	Occurrences of GUI strings in code				
	0	1	[2, 10)	[10, 100)	[100, ∞)
ArgoUML	20.5%	10.4%	42.3%	12.1%	14.7%
FreeMind	7.9%	2.8%	60.6%	13.0%	15.6%
PDFsam	13.8%	13.8%	50.8%	4.6%	16.9%
Weka	8.1%	12.0%	14.0%	30.2%	35.6%
Total	11.2%	9.3%	34.9%	20.1%	24.4%

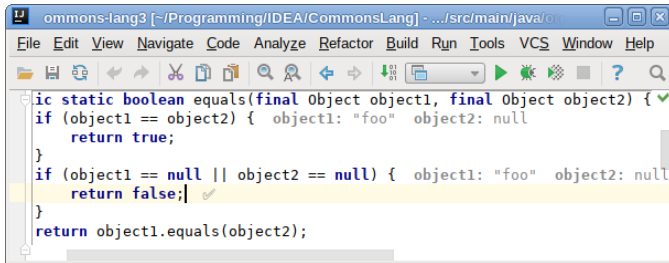


Fig. 2. Augmentation with sample values in RuntimeSamp [26]

I. Augmenting Code Lines with Runtime Values

As an alternative to the documentation of whole methods using plain-text descriptions, we presented a source code augmentation approach, RuntimeSamp [26] (see Fig. 2). The main idea is to display sample values of variables on each source code line, using an IDE plugin. We discussed questions which should be answered for our approach to be useful and provided partial solutions to the outlined problems. Currently, the objects are displayed as strings (using the toString method) and recorded at the end of lines. To select an iteration which should be displayed, we utilize the text caret as a pointer to the programmer’s attention. Time overhead of RuntimeSamp is currently about 140%, so optimization is necessary in the future.

J. Visual Source Code Augmentation

Since RuntimeSamp is a visual source code augmentation approach, we complemented it with a systematic mapping study [24] of similar tools. By combining keyword search, references inspection and manual filtering, we obtained a list of 103 academic tools displaying visual overlays directly in the source code editor. They were categorized in a taxonomy with 7 dimensions: source, type, visualization, location, target, interaction and IDE.

IV. CONCLUSION

First, we will summarize the major contributions of our dissertation to the research field of software engineering, mainly to the subfield of program comprehension using dynamic analysis.

- We performed a large-scale study of Java build failures, providing empirical data about build failure probability and error types [11].

- A taxonomy of source code labeling was devised [12].
- Two controlled experiments showed the causality between the presence of concern annotations in the source code and comprehension/maintenance correctness and time. These experiments were conducted in collaboration with Milan Nosál, see the articles [13], [14].
- We provided empirical evidence about the presence, occurrence counts and location types of strings from the GUIs of running desktop programs in the source files [19].
- An approach to “search in the runtime” was designed [20]. It was validated using a (not yet published) controlled experiment on human subjects, showing a positive effect on program maintenance efficiency during a simple search-focused task.
- A novel documentation approach was presented [22]. It is based on concrete examples of objects obtained by dynamic analysis.
- The definition of the term “source code augmentation” was provided [24]. We designed a taxonomy of visual augmentation of source code editors. The systematic literature review, resulting in a list of 103 relevant articles, was performed in collaboration with Michaela Bačíková and Sergej Chodarev.
- An approach to augment source code lines with sample variable values was designed [26]. A list of important questions for future research was also mentioned.

We also provided multiple minor contributions in the dissertation. Some of these minor research contributions are:

- a trend analysis of topics in program comprehension [8],
- a comparison between human-human and human-machine annotation overlap
- and a discussion about storage possibilities of runtime metadata directly in source code files [17], [25].

V. FUTURE WORK

Many of the topics discussed in this paper suggest future research possibilities. Now we will mention some of them.

The study about build systems describes the current state, which is certainly not optimal, but it does not provide any solutions. However, motivated also by our study, Hassan et al. [27] examined the details behind build failures, and Macho et al. designed an approach to automatically repair dependency-related build issues [27].

Our study of GUI term occurrences in the code was limited to four desktop Java applications. To increase its external validity, we should examine more programs, written in other languages and using different technologies. Since many desktop applications are gradually becoming legacy, a similar study performed on web applications would be more representative.

RuntimeSearch can be extended with more options resembling the traditional textual search (e.g., “Whole words” or “Find previous”) to further strengthen the presented metaphor. Among the ideas presented in the paper, we consider RuntimeSearch to be the readiest for a successful transfer to the industry. Then we could perform field studies with industrial programmers on real projects.

One of the disadvantages of our documentation generator, DynamiDoc, is the inability to produce meaningful sentences when the toString methods are not overridden. Automated generation of string representations in such cases can be a fruitful future research idea. The mentioned shortcoming is shared with the current design of RuntimeSamp. However, in this case, we would like to use a more interactive solution. Although Chis et al. [28] introduced moldable (domain-specific) objects inspectors, their construction is prevalently manual. A completely automated generation of semi-graphical object representations, along with the conduction of supporting empirical studies, is a research idea we would like to fully embrace in the future.

REFERENCES

- [1] R. L. Glass, “Frequently forgotten fundamental facts about software engineering,” *Software, IEEE*, vol. 18, no. 3, pp. 112, 110–111, May 2001.
- [2] V. Rajlich and N. Wilde, “The role of concepts in program comprehension,” in *Program Comprehension, 2002. Proceedings. 10th International Workshop on*, 2002, pp. 271–278.
- [3] I. Steinmacher, A. P. Chaves, and M. A. Gerosa, “Awareness support in distributed software development: A systematic review and mapping of the literature,” *Comput. Supported Coop. Work*, vol. 22, no. 2-3, pp. 113–158, Apr. 2013.
- [4] M. Sulír, “Improving program comprehension: Preliminary results and research plan,” in *SCYR 2016: 16th Scientific Conference of Young Researchers*, May 2016.
- [5] —, “Integrating runtime metadata with source code to facilitate program comprehension,” Ph.D. dissertation, Technical University of Košice, May 2018.
- [6] —, “Facilitating program comprehension with runtime metadata: A report,” in *SCYR 2018: 18th Scientific Conference of Young Researchers*, May 2018.
- [7] —, “Program comprehension: A short literature review,” in *SCYR 2015: 15th Scientific Conference of Young Researchers*, May 2015, pp. 283–286.
- [8] M. Sulír and J. Porubán, “Trend analysis on the metadata of program comprehension papers,” in *2015 13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Jun. 2015, pp. 153–156.
- [9] A. Neitsch, K. Wong, and M. Godfrey, “Build system issues in multi-language software,” in *Software Maintenance (ICSM), 2012 28th IEEE International Conference on*, Sep. 2012, pp. 140–149.
- [10] H. Seo, C. Sadowski, S. Elbaum, E. Aftandilian, and R. Bowdidge, “Programmers’ build errors: A case study (at Google),” in *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering*, ser. ICSE 2014. New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 724–734.
- [11] M. Sulír and J. Porubán, “A quantitative study of Java software buildability,” in *Proceedings of the 7th International Workshop on Evaluation and Usability of Programming Languages and Tools*, ser. PLATEAU 2016. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 17–25.
- [12] —, “Labeling source code with metadata: A survey and taxonomy,” in *2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, Sep. 2017, pp. 721–729.
- [13] M. Sulír and M. Nosál, “Sharing developers’ mental models through source code annotations,” in *2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, Sep. 2015, pp. 997–1006.
- [14] M. Sulír, M. Nosál, and J. Porubán, “Recording concerns in source code using annotations,” *Computer Languages, Systems & Structures*, vol. 46, pp. 44–65, Nov. 2016.
- [15] M. Sulír and J. Porubán, “Semi-automatic concern annotation using differential code coverage,” in *2015 IEEE 13th International Scientific Conference on Informatics*, Nov. 2015, pp. 258–262.
- [16] N. Wilde and C. Casey, “Early field experience with the software reconnaissance technique for program comprehension,” in *Software Maintenance 1996, Proceedings., International Conference on*, Nov. 1996, pp. 312–318.
- [17] M. Sulír and J. Porubán, “Exposing runtime information through source code annotations,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 1, pp. 3–9, Apr. 2017.
- [18] T. Roehm, “Two user perspectives in program comprehension: End users and developer users,” in *Proceedings of the 2015 IEEE 23rd International Conference on Program Comprehension*, ser. ICPC ’15. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2015, pp. 129–139.
- [19] N. Nazar, Y. Hu, and H. Jiang, “Locating user interface concepts in source code,” in *5th Symposium on Languages, Applications and Technologies (SLATE’16)*, ser. OpenAccess Series in Informatics (OASISs), vol. 51. Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2016, pp. 6:1–6:9.
- [20] —, “RuntimeSearch: Ctrl+F for a running program,” in *Proceedings of the 2017 32nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, 2017, pp. 388–393.
- [21] N. Nazar, Y. Hu, and H. Jiang, “Summarizing software artifacts: A literature review,” *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 31, no. 5, pp. 883–909, 2016.
- [22] M. Sulír and J. Porubán, “Generating method documentation using concrete values from executions,” in *6th Symposium on Languages, Applications and Technologies (SLATE 2017)*, ser. OpenAccess Series in Informatics (OASISs), vol. 56. Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2017, pp. 3:1–3:13.
- [23] —, “Source code documentation generation using program execution,” *Information*, vol. 8, no. 4, p. 148, 2017.
- [24] M. Sulír, M. Bačíková, S. Chodarev, and J. Porubán, “Visual augmentation of source code editors: A systematic review,” *Computer Languages, Systems & Structures*, 2018, submitted.
- [25] M. Sulír, J. Porubán, and O. Zoričák, “IDE-independent program comprehension tools via source file overwriting,” in *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics*, 2017, pp. 372–376.
- [26] M. Sulír and J. Porubán, “Augmenting source code lines with sample variable values,” in *Proceedings of the 2018 26th IEEE/ACM International Conference on Program Comprehension (ICPC)*, May 2018, accepted.
- [27] C. Macho, S. McIntosh, and M. Pinzger, “Automatically repairing dependency-related build breakage,” in *2018 IEEE 25th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)*, Mar. 2018, pp. 106–117.
- [28] A. Chiş, O. Nierstrasz, A. Syrel, and T. Gîrba, “The moldable inspector,” in *2015 ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software*, ser. Onward! 2015. New York, NY, USA: ACM, 2015, pp. 44–60.

Výskum využitia akumulčných zariadení v elektrizačnej sústave

Martin Vojtek

Katedra elektroenergetiky
Technická univerzita v Košiciach, FEI
Košice, Slovenská republika
martin.vojtek@tuke.sk,

Michal Kolcun

Katedra elektroenergetiky
Technická univerzita v Košiciach, FEI
Košice, Slovenská republika
michal.kolcun@tuke.sk

Abstrakt — Príspevok je venovaný súhrnu najvýznamnejších výsledkov dizertačnej práce, ktorá sa zaoberá výskumom využitia akumulčných zariadení v elektrizačnej sústave, najmä v súvislosti so súčasným trendom stále vyššieho využitia obnoviteľných zdrojov. Príspevok je možné rozdeliť do troch oblastí, a to výskum akumulčných zariadení v oblasti hybridných systémov, v oblasti distribučných sietí a v oblasti elektrických vozidiel. Vo všetkých týchto oblastiach boli hlavnou metódou na dosiahnutie definovaných cieľov simulácie pomocou programu Matlab/Simulink. V oblasti hybridných systémov je predstavený zostavený model hybridného systému validovaný meraním na experimentálnom systéme. Umožňuje na základe vstupných dát simulovať a skúmať prevádzkové stavy jednotlivých častí ako aj celého systému. V oblasti distribučných sietí bol navrhnutý koncept pre využitie energetických úložísk za účelom zamedzenia nepriaznivých dopadov pri vysokej penetrácii obnoviteľných zdrojov, ako je spätný tok výkonu a kolísanie napätia na dlhých vývodoch. Výskum akumulácie v oblasti elektromobility zahŕňa návrh konceptu pre rýchlo-nabíjanie elektromobilov pomocou hybridných systémov s podpornou akumuláciou, vytvorenie modelu rýchlo-nabíjacej stanice na pozorovanie výkonových a energetických bilancií a vyhodnotenie jej prevádzky.

Kľúčové slová—akumulácia energie, energetické úložisko, obnoviteľné zdroje energie, hybridné systémy, elektrické vozidlá, koncepty riadenia

Abstract — The paper is devoted to a summary of the most important results of the dissertation, which deals with research of the energy storage utilization in the electric power system, especially in connection with the current trend of increasing use of renewable resources. The contribution can be divided into three areas: research energy storages in the field of hybrid systems, distribution networks and electric vehicles. In all these areas, the main method for achieving the defined goals was simulations using the Matlab/Simulink program. In hybrid systems

area, assembled model of the hybrid system is validated by measuring on an experimental system. It allows to simulate and to examine the operating states of individual parts as well as the whole system based on the input data. In the area of distribution networks, a concept for utilization of energy storages has been proposed in order to avoid adverse impacts of high penetration of renewable sources, such as power backflow and voltage fluctuations at long feeders. Research of accumulation in the field of Electromobility includes a draft concept for the fast-charging of electric vehicles using hybrid system with supportive accumulation, creating a model of a fast-charging station for observation of power and energy balances and evaluation of its operation.

Keywords—accumulation of electricity, energy storage, renewable energy sources, hybrid systems, electric vehicles, control concepts

I. ÚVOD

Výroba elektriny z obnoviteľných zdrojov energie (OZE) stúpala v Európskej únii rapídne za posledné roky. Konkrétne, podiel vyrobenej elektrickej energie z OZE na celkovej spotrebe sa takmer zdvojnásobil, z 8,5 % v roku 2004 na približne 17 % v roku 2016. Deje sa to z dôvodu cieľov, ktoré boli definované pre rok 2020 v smernici 2009/28/ES a ktoré počítajú s 20 % podielom výroby z OZE na hrubej domácej spotrebe, ku ktorým sa zaviazali jednotlivé členské štáty [1]. Okrem toho, sa štáty EÚ dohodli na politickom rámci pre roky 2020-2030, kde cieľom je tento podiel ďalej zvyšovať až na úroveň 27 % [2].

S týmto nárastom priamo súvisí aj zvyšovanie záujmu o akumuláciu elektrickej energie, teda o proces ukladania elektrickej energie jej premenou do inej formy a samotné uskladnenie za účelom využitia v čase potreby z dôvodu zachovania súčasnej kvality, spoľahlivosti, bezpečnosti a flexibility dodávky elektrickej energie. Hlavným dôvodom je problém pri OZE využívajúcich slnečnú alebo veternú energiu ako primárny zdroj v súvislosti s ich závislosťou na intenzite slnečného žiarenia a rýchlosti vetra. Intenzitu slnečného žiarenia a rýchlosť vetra je možné zaradiť do teórie náhodných javov. Z toho vyplýva, že aj výkon vyrábaný týmito zdrojmi

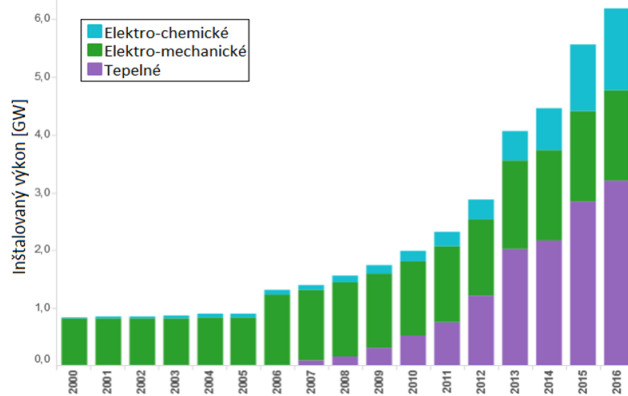
Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18.

bude mať náhodný, teda stochastický charakter. To je zároveň príčinou väčšiny negatívnych vplyvov fotovoltaických alebo veterných elektrární na elektrizačnú sústavu alebo jej časť.

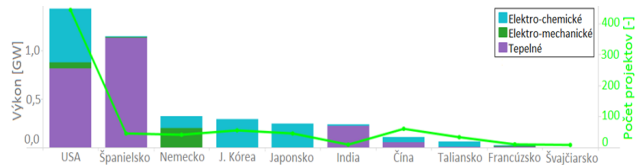
Pre účely skladovania elektrickej energie je v súčasnosti možné využiť širokú škálu akumulčných zariadení (prečerpávacie vodné elektrárne, akumulácia prostredníctvom stlačeného vzduchu, zotrvačníky, statické a prietokové batérie, úložiská merného a latentného tepla, elektrochemické dvojvrstvé kondenzátory, supravodivé elektromagnetické úložiská, alebo akumulácia vo forme vodíka), ktoré keďže slúžia na ukladanie energie, zvyknú sa označovať aj pojmom energetické úložiská. Tieto výrazy je možné považovať za ekvivalentné, rovnako ako aj pojem akumulácia a ukladanie energie. Akumulačné zariadenia sú schopné okrem lepšej integrácie OZE poskytovať aj unikátne služby rozvíjajúcej sa elektrizačnej sústave. Patria tu hromadné energetické služby (presúvanie elektrickej energie - arbitráž, schopnosť dodávky elektrickej energie), podporné služby (regulácia činného výkonu, regulácia napätia, točivá a netočivá rezerva, čierny štart a ďalšie súvisiace využitie), služby prenosovej infraštruktúry (odklad modernizácie siete, zmiernenie preťaženia vedení), služby distribučnej infraštruktúry (odklad modernizácie siete, regulácia napätia) a služby pre energetický manažment zákazníka (kvalita elektrickej energie, spoľahlivosť dodávky elektrickej energie, maloobchodné presúvanie elektrickej energie, manažment dopytu) [3].

Prudké zvýšenie záujmu o akumulčné zariadenia je možné podložiť nasledujúcim obrázkom (Obr.1), ktorý vyjadruje celkový inštalovaný výkon v troch najčastejšie používaných nekonvenčných typoch akumulčných zariadení za posledných šesťnásť rokov. Každoročne je možné vidieť značné prírastky inštalovaného výkonu. Započítané sú iba projekty, ktoré sú plne uvedené do prevádzky. Výstavba množstva ďalších inštalácií bola oznámená, alebo už prebieha.

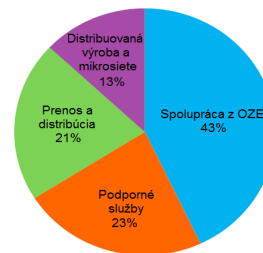
Obr. 2 vyjadruje inštalovaný výkon a počet realizovaných projektov v desiatich krajinách sveta s najviac rozvinutým využívaním elektrochemických, elektromechanických a tepelných akumulčných zariadení. Prvenstvo patrí Spojeným štátom americkým s 1,6 GW inštalovaného výkonu a počtom 456 realizovaných projektov. Obr. 3 predstavuje rozdelenie využitia energetických úložísk vo svete pre najrozšírenejšie typy aplikácií.



Obr. 1 Nárast inštalovaného výkonu moderných elektroenergetických úložísk [4]



Obr. 2 Inštalovaný výkon akumulčných zariadení v top 10 krajinách [4]



Obr. 3 Kumulatívne rozdelenie využitia energetických úložísk pre rôzne aplikácie celosvetovo [5]

V ďalších kapitolách tohto článku je zhrnutý príspevok autora do rýchlo rozvíjajúcej sa oblasti akumulácie elektrickej energie a obnoviteľných zdrojov. Druhá kapitola pozostáva z popisu vytvorených modelov obnoviteľných zdrojov a akumulčných zariadení, ktoré sú v ďalšom výskume používané. Hybridným systémom je venovaná tretia kapitola. V rámci tejto časti bol vytvorený model hybridného systému validovaný na reálnych dátach. Ďalšou skúmanou oblasťou sú distribučné siete a využitie akumulácie na potlačenie nežiaducich javov súvisiacich s vysokým využitím OZE (kapitola IV). Kapitola V je venovaná využitiu akumulčných zariadení v oblasti elektrických vozidiel, konkrétne vytvorenému konceptu nabíjajúcich staníc. Poslednou časťou príspevku je záver, kde sú vyhodnotené výsledky výskumu a načrtnuté ďalšie oblasti smerovania.

II. POPIS VYTVORENÝCH MODELOV V PROGRAME MATLAB/SIMULINK

Praktická časť tejto práce pozostáva z výskumu využitia akumulčných zariadení v rôznych oblastiach a príslušných výsledkov. Na tento účel bol využívaný softvérový nástroj Matlab/Simulink, pomocou ktorého boli vytvorené modely jednotlivých funkčných celkov ako sú napríklad fotovoltaické elektrárne alebo batériové systémy pre následné simulácie. Tieto modely bolo možné vo väčšine prípadov bez úprav použiť pre simulácie vo viacerých oblastiach vykonaného výskumu. Znamená to, že len výnimočne bolo potrebné pre každú oblasť výskumu vytvárať nové modely funkčných celkov. Preto budú v tejto kapitole všetky vytvorené modely vo všeobecnosti popísané, pričom na nich bude v ďalšom texte už iba odvolávané a prípadné modifikácie budú podľa potreby spomenuté na príslušných miestach. Okrem modelov vytvorených autorom boli použité aj ustálené prvky knižnice programu Matlab/Simulink s názvom Simscape power systems.

Simulácie boli vo všetkých prípadoch vykonávané s použitím fázorovej alebo spojitkej simulačnej metódy a solvera ode45.

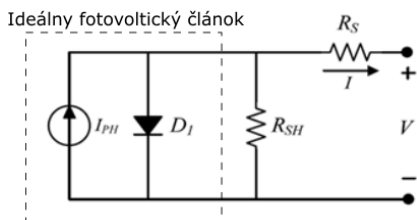
A. Model fotovoltaickej elektrárne

Fotovoltaický článok je zariadenie založené na základe polovodičovým materiálu, ktorý konvertuje energiu slnečného žiarenia na elektrickú energiu. Kvôli jeho malému výkonu, je nevyhnutné kombinovať viaceré články sériovo alebo paralelne, čím vzniká fotovoltaický modul s požadovanými hodnotami napätia a prúdu. Podobným spôsobom sú prepájané jednotlivé moduly, ktorých kombináciou vznikajú fotovoltaické polia. Kombinácia fotovoltaických polí predstavuje fotovoltaickú elektrárňu.

Výstupné parametre článku sú ovplyvnené klimatickými podmienkami, špeciálne solárnym žiarením a teplotou. S toho vyplýva, že modelovanie tohto zariadenia nevyhnutne vyžaduje zahrnúť tieto parametre ako vstupné premenné. Výstupom z modelu môže byť prúd, napätie alebo výkon fotovoltaického článku. Každá zmena týchto parametrov na vstupe sa prejaví zmenou na výstupe.

1) Ekvivalentný obvod a model fotovoltaického článku

Fotovoltaický článok ako najzákladnejší komponent celého fotovoltaického systému je v tejto práci modelovaný pomocou jedno - diódového ekvivalentného obvodu (Obr. 4). Pozostáva zo zdroja fotoprúdu, diódy, sériovo a paralelne zapojeného rezistora. Sériový rezistor reprezentuje vnútorný odpor fotovoltaického článku, zatiaľ čo paralelne zapojený rezistor predstavuje odpor zvodu. Matematický popis modelu je bližšie analyzovaný autormi v [6], [7], [8].



Obr. 4 Všeobecný ekvivalentný obvod fotovoltaického článku

Základná rovnica popisujúca vzťah medzi napätím a prúdom je definovaná nasledovne:

$$I = I_{PH} - I_S \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{kTA}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad [A], \quad (1)$$

kde

- I_{PH} – prúd generovaný fotovoltaickým článkom, takzvaný fotoprúd [A],
- I_S – saturačný prúd [A],
- q – elementárny elektrický náboj (1,6.10-19) [C],
- k – Boltzmanová konštanta (1,38.10-23) [J.K⁻¹],
- T – prevádzková teplota [K],
- V – napätie fotovoltaického článku [-]
- A – faktor ideality [-].

Faktor ideality A je závislý na použitej technológii. Napríklad pre monokrystalický kremík má hodnotu 1.2, pre polykrytalický kremík je to hodnota 1.3 [7], [8].

Fotoprúd generovaný fotovoltaickým článkom je závislý na slnečnom žiarení a okolitej teplote a môže byť vypočítaný pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$I_{PH} = \lambda(I_{SC} - k_i[T - T_r]) \quad [A], \quad (2)$$

kde

- λ – je solárne žiarenie [kW/m²],
- k_i – teplotný koeficient prúdu nakrátko [A.K⁻¹],
- I_{SC} – prúd nakrátko meraný za štandardných testovacích podmienok (1000 W/m² a 25 °C) [A],
- T_r – referenčná teplota (25 °C = 25+273,16 K) [K].

Saturačný prúd závisí od prevádzkovej teploty a je definovaný ako:

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left(\frac{qE_G}{kA} \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right] \right)} \quad [A], \quad (3)$$

kde

- I_{RS} – je reverzný-saturačný-prúd [A],
- E_G – energia-zakázaného-pásma pre použitý materiál vo fotovoltaickom článku [eV].

Reverzný saturačný prúd pri referenčnej teplote je možné približne určiť pomocou nasledujúcej rovnice:

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{e^{\frac{qV_{oc}}{N_S k A T}} - 1}, \quad [A], \quad (4)$$

kde

- V_{oc} – je napätie fotovoltaického článku pri referenčnej teplote [V],
- N_S – počet článkov zapojených do série, v prípade jedného článku je $N_S=1$ [-].

Okrem všeobecného modelu, je možné pomocou určitých zjednodušení odvodiť rovnice pre približný a zjednodušený model fotovoltaického modulu. Približný model s prípustnou komplexnosťou a presnosťou je možné odvodiť z rovnice 1 zanedbaním časti popisujúcej zvodový prúd pretekajúci cez rezistor R_{SH} . Po úprave je možné spomenutú rovnicu prepísať do nasledujúceho tvaru:

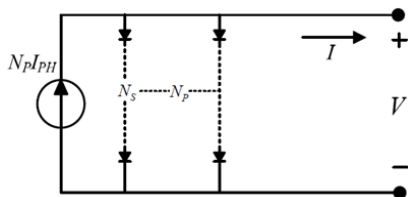
$$I = I_{PH} - I_S \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{kTA}} - 1 \right) \quad [A]. \quad (5)$$

V prípade zjednodušeného modelu sa jedná o model ideálneho fotovoltaického modulu. Vzniká ďalším zjednodušením rovnice 1, konkrétne zanedbaním sériového odporu reprezentujúceho pozdĺžne straty na vnútornom odpore R_S . Vykonaním určitých modifikácií je možné opäť prepísať rovnicu 1 do iného tvaru:

$$I = I_{PH} - I_S \left(e^{\frac{qV}{kTA}} - 1 \right) \quad [A]. \quad (6)$$

2) *Ekvivalentný obvod a model fotovoltického modulu a poľa*

Ako už bolo spomenuté, vzhľadom na nízky výkon jedného článku je potrebné pre praktické aplikácie za účelom dosiahnutia požadovanej výkonnosti potrebné jednotlivé články spájať sériovo alebo paralelne. Napätie stúpa sériovým spájaním, prúd narastá z počtom článkov zapojených paralelne. Vo väčšine prípadov sú v rámci fotovoltického modulu výrobcom zapojené jednotlivé články do série. Následne sú moduly zapojené paralelne v rámci poľa. Zjednodušený ekvivalentný obvod fotovoltického poľa pozostávajúceho z určitého počtu článkov N_S zapojených do série, a N_P modulov zapojených paralelne je znázornený na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5 Zjednodušený ekvivalentný obvod fotovoltického poľa

Výsledný prúd obvodu (Obr. 5) je možné popísať nasledujúcou rovnicou:

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left(e^{\left| \frac{qV}{N_S k T A} \right|} - 1 \right) \quad [A]. \quad (7)$$

Rovnakým spôsobom je možné modifikovať aj rovnice 1 a 5 pre všeobecný, respektíve približný model. V prípade modelovania jedného článku je $N_S=N_P=1$. Ak je potrebné modelovať fotovoltický modul, $N_P=1$ a N_S je počet článkov zapojených do série v rámci modulu. Posledný možný prípad je modelovanie fotovoltického poľa, kde N_S je počet článkov v rámci modulu a N_P počet modulov v rámci poľa.

B. Model veternej elektrárne

V príspevku sú využívané dva typy modelov veternej elektrárne. Prvý z nich je založený na výpočte energie dostupnej vo vetre a výkonovom súčiniteli turbíny, druhý na presnej aproximácii prevádzkovej charakteristiky udanej výrobcom. Obidva modely využívajú aj základné poznatky o prevádzke veterných turbín v závislosti od rýchlosti vetra.

1) *Model založený na energii dostupnej vo vetre a výkonovom súčiniteli turbíny*

Model bol inšpirovaný publikáciou [9]. Rovnica 8 bola základom pre vytvorenie tohto modelu. Popisuje výkon dostupný vo vetre P_w , teda v prúde vzduchu s hustotou ρ , ktorý prúdi cez plochu A s rýchlosťou v . Takýto výkon je závislý od tretej mocniny rýchlosti vetra a je definovaný nasledovne:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho v^3 S \quad [W], \quad (8)$$

kde

- ρ – hustota vzduchu [kg/m³],

- v – rýchlosť vetra [m/s],
- S – plocha cez ktorú prúdi vietor [m²].

V tomto prípade, pre zjednodušenia daného modelu bolo uvažované s konštantnou hustotou vzduchu (1,255 kg/m³), ktorá sa nemení v závislosti na tlaku vzduchu. Výkon dodaný veternou elektrárnou do miesta pripojenia P_{VT} bol teda vypočítaný nasledovne:

$$P_{VT}(v) = \begin{cases} 0 & \text{if } v < v_{rozbeh} \\ P_W * C_p & \text{if } v_{rozbeh} < v < v_N \\ P_N & \text{if } v_N < v < v_{stop} \\ 0 & \text{if } v > v_{stop} \end{cases} \quad [W], \quad (9)$$

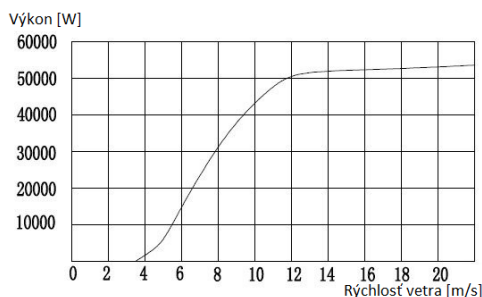
kde

- v_{rozbeh} – rozbehová rýchlosť turbíny [m/s],
- v_N – menovitá rýchlosť turbíny [m/s],
- v_{stop} – rýchlosť pri ktorej musí byť turbína zastavená [m/s].

Ak je rýchlosť vetra menšia ako rozbehová rýchlosť, veterná turbína neprodukuje žiadnu energiu. V prípade, ak je rýchlosť vetra väčšia ako rozbehová rýchlosť, výkon dodaný do siete sa rovná výkonu, ktorý je dostupný vo vetre vynásobenému výkonovým koeficientom turbíny. Ak je rýchlosť vetra vyššia ako menovitá, vyrábaný výkon je rovný menovitému výkonu až po dosiahnutie maximálnej rýchlosti. V prípade vyššej rýchlosti, veterná turbína je zastavená a neprodukuje žiadnu energiu z dôvodu prevencie jej poškodenia.

2) *Model založený na aproximácii dát uvádzaných výrobcom*

Okrem vyššie popísaného spôsobu modelovania je možné veternú turbínu namodelovať aproximáciou výkonovej charakteristiky, ktorú udáva výrobca. Tento spôsob je limitovaný možnosťou odčítania jednotlivých výkonov pri odpovedajúcich rýchlostiach vetra. Ako príklad je možné uviesť výkonovú charakteristiku turbíny s menovitým výkonom 50 kW znázornenú na nasledujúcom obrázku (Obr. 6), udávanú výrobcom - spoločnosťou Hummer.



Obr. 6 Výkonová charakteristika 50 kW turbíny udávaná výrobcom

Na základe uvedenej charakteristiky boli podobne ako v predchádzajúcom prípade vytýčené určité typické prevádzkové oblasti (oblasť kedy turbína nevyrába z dôvodu nízkej rýchlosti vetra, oblasť kedy sa výstupný výkon mení v závislosti od tretej mocniny rýchlosti vetra, oblasť kedy je turbína brzdená na približne menovitý výkon a oblasť kedy musí byť turbína zabrzdená úplne kvôli vysokej rýchlosti vetra). V tomto prípade bolo potrebné aproximovať oblasť kedy sa výstupný

výkon mení s treťou mocninou rýchlosti vetra a oblasť kedy je turbína brzdená na menovitý výkon. Pre tento účel boli odčítané hodnoty vyrábaného výkonu a príslušných rýchlostí vetra pre obidve oblasti. Následne, pomocou programu Excel boli odčítané priebehy aproximované, a rovnice funkcií použité pre vytvorenie modelu v programe Matlab/Simulink. Obidve rovnice funkcií boli aproximované tak, aby bol dosiahnutý korelačný koeficient $R_2=0,99$.

Rovnica funkcie v oblasti, kde sa výkon mení v závislosti od tretej mocniny rýchlosti vetra, teda medzi rozbehovou a menovitou rýchlosťou vetra, bola pre uvedenú charakteristiku aproximovaná pomocou polynomickej funkcie piateho rádu, a má nasledovný tvar:

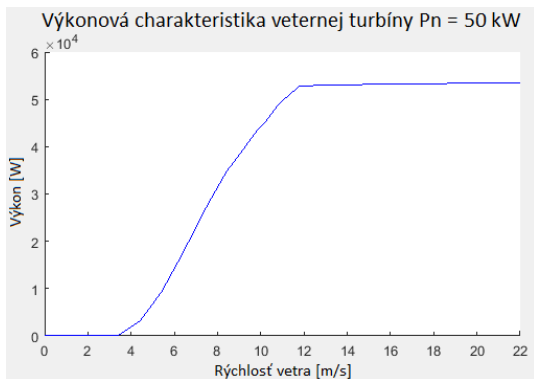
$$f_1(v) = (4.6474 * v^5) - (151.66 * v^4) + (1695.3 * v^3) - (7121.9 * v^2) + (11827 * v) - 6272.7 \quad (10)$$

Rovnica funkcie v oblasti, kde je turbína brzdená na približne menovitý výkon, teda medzi menovitou rýchlosťou vetra a rýchlosťou kedy je turbína zastavená, bola pre uvedenú charakteristiku aproximovaná pomocou logaritmického funkcie, a má nasledovný tvar:

$$f_2(v) = 937,51 \ln(v) + 506018 \quad (11)$$

Výsledný model je potom definovaný nasledovne:

$$P_{VT}(v) = \begin{cases} 0 & \text{if } v < v_{rozbeh} \\ f_1(v) & \text{if } v_{rozbeh} < v < v_N \\ f_2(v) & \text{if } v_N < v < v_{stop} \\ 0 & \text{if } v > v_{stop} \end{cases} \quad [W]. \quad (12)$$



Obr. 7 Výkonová charakteristiky turbíny vypočítaná aproximovaným modelom

C. Modely energetických úložísk

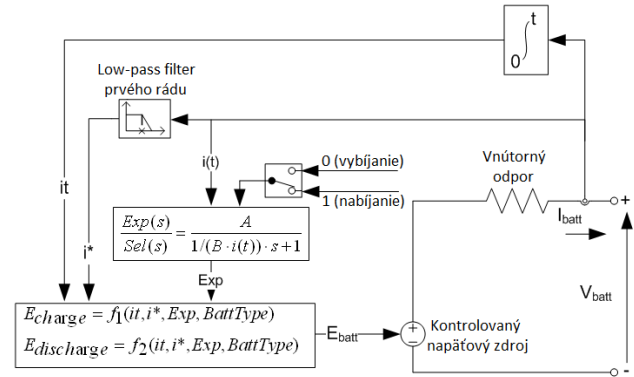
V dizertačnej práci, ktorej výsledky sú predmetom tohto príspevku boli pre výskum využitia akumulčných zariadení vytvorené viaceré modely energetických úložísk. Každý s týchto modelov bol vytvorený pre inú technológiu ako aj konkrétnu simulačnú metódu, ale použitie nie je limitované.

1) Model batérií

Batériu sú najčastejšie využívaným akumulčným zariadením najmä v malých hybridných systémoch určených pre rodinné domy alebo inštalácie podobného rozsahu. V

poslednej dobe sa s klesajúcimi cenami čoraz viac objavuje ich využitie aj v distribučných sieťach najmä v súvislosti s distribuovanou výrobou. Používajú sa rôzne typy technológií detailne popísané v dizertačnej práci [10].

Ekvivalentný obvod (Obr. 8), ktorý je možné použiť na modelovanie najčastejších typov dobíjateľných batérií je znázornený na nasledujúcom obrázku. Konkrétne sa jedná o lítium-iónové, nikel-kadmiové, nikel-metal-hydridové, a oloveno kyselinové batérie. V závislosti od typu použitých batérií je potrebné zmeniť rovnice pre riadenie kontrolovaného napäťového zdroja dosadené do ekvivalentného modelu [11].



Obr. 8 Ekvivalentný obvod generického modelu batérií

Oloveno-kyselinové batérie je možné popísať pomocou nasledujúcich rovníc. Pre napätie batérií E_{batt} pri vybíjaní (prúd batérií $I_{batt}>0$) platí:

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} 0 \right) \quad [V], \quad (13)$$

respektíve pri nabíjaní (prúd batérií $I_{batt}<0$):

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s) 1}{Sel(s) s} \right) \quad [V]. \quad (14)$$

Lítium-iónové batérie je možné popísať pomocou nasledujúcich rovníc. Pre napätie batérií E_{batt} pri vybíjaní (prúd batérií $I_{batt}>0$) platí:

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \exp(-B it) \quad [V], \quad (15)$$

respektíve pri nabíjaní (prúd batérií $I_{batt}<0$):

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{|it| + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \exp(-B it) \quad [V]. \quad (16)$$

Nikel-kadmiové a nikel-metal-hydridové batérie je možné popísať pomocou nasledujúcich rovníc. Pre napätie batérií E_{batt} pri vybíjaní (prúd batérií $I_{batt}>0$) platí:

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} 0 \right) \quad [V], \quad (17)$$

respektíve pri nabíjaní (prúd batérií $I_{batt}<0$):

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{|it| + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s) 1}{Sel(s) s} \right) \quad [V]. \quad (18)$$

kde

- E_0 – konštantné napätie [V],
- $Exp(s)$ – dynamika exponenciálnej zóny batérie [V],

- $sel(s)$ – prevádzkový stav batérie, $sel(s)=1$ počas nabíjania, $sel(s)=0$ počas vybíjania [-],
- K – polarizačná konštanta [A/h],
- i^* - dynamika nízko-frekvenčného prúdu [A],
- i – prúd batérie [A],
- it – vyťažená kapacita [Ah],
- Q – maximálna kapacita batérie [Ah],
- A – exponenciálne napätie [V],
- B – exponenciálna kapacita [A/h].

Úroveň nabitia (*SOC*) batérie sa pohybuje od 0 % pre úplné vybitú batériu až do 100% pre plne nabitú batériu. Je vypočítavaná pomocou nasledujúcej rovnice:

$$SOC = 100 \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right) \quad [\%]. \quad (19)$$

2) Všeobecný univerzálny model úložiska založený na SOC

Pre výpočet energetických a výkonových bilancií energetických systémov, je možné akékoľvek energetické úložisko adekvátne popísať pomocou jeho celkovej kapacity a účinnosti premeny elektrickej energie do inej formy počas nabíjania respektíve vybíjania. Tento prístup dovoľuje simulovať rôzne typy úložísk bez ohľadu na použitú technológiu v systémoch, kde nie je dôležitá ich dynamika. Okrem spomínaných parametrov je potrebné poznať úroveň nabitia v každom čase. Pre tento účel bola zavedená nasledujúca rovnica:

$$SOC(t) = SOC_{INIT} + \frac{100 E_{CH}(t)}{E_{FULL}} - \frac{100 E_{DISCH}(t)}{E_{FULL}} \quad [\%], \quad (20)$$

kde

- SOC_{INIT} - počiatočná úroveň nabitia ako percento celkovej kapacity [%],
- E_{CH} – celkové množstvo energie, ktorá bola nabitá [kWh],
- E_{DISCH} – celkové množstvo energie, ktorá bola vybitá [kWh].
- E_{FULL} – celková kapacita batérií [kWh].

Z rovnice je jasný princíp, na ktorom je rovnica založená. K počiatočnej úrovni nabitia sa pripočítava celkové množstvo energie, ktoré bolo nabité, prepočítané na percentá. Zároveň sa odpočítava percentuálne množstvo energie, ktorá bola z úložiska vybitá. Spomínané množstvá energií sú získané meraním výkonu tečúceho do alebo z úložiska a jeho následným integrovaním v čase.

K tejto základnej rovnici je možné pridávať rôzne podmienky reprezentujúce širokú škálu obmedzení (úroveň rampy, minimálnu a maximálnu úroveň nabitia respektíve hĺbku vybitia, účinnosť premeny a podobne), čím je možné dostatočne presne namodelovať akékoľvek úložisko energie.

3) Model vodíkového úložiska

Model úložiska vodíka pracuje na podobnom princípe, ako univerzálny model založený na *SOC*, uvedený v predchádzajúcom prípade. V každom simulačnom kroku je vypočítavané aktuálne množstvo H_2 , ktoré sa nachádza v zásobníku. Prepočet vychádza z počiatočného množstva H_2 v zásobníku, ktoré je potrebné definovať pred začiatkom simulácie. K tomuto množstvu je pripočítavaný pomer

celkového množstva prebytočnej energie, ktorú je možné uložiť a koeficientu, ktorý definuje energetickú náročnosť premeny jednej kWh elektrickej energie na m^3 vodíka. Naopak, odpočítava sa súčin množstva elektrickej energie ktorá je pomocou vodíka vyrobená a koeficientu spätnej premeny. Matematicky je možné tieto fakty definovať nasledovne:

$$M_{H_2}(t) = M_{H_2,INIT} + \frac{E_{CH}(t)}{k_{kWh \rightarrow m^3}} - k_{m^3 \rightarrow kWh} E_{DISCH}(t) \quad [Nm^3], \quad (21)$$

kde

- $M_{H_2}(t)$ – aktuálne množstvo uloženého vodíka [Nm^3],
- $M_{H_2,INIT}$ – počiatočné množstvo vodíka [Nm^3],
- $E_{ch}(t)$ – množstvo energie použitej na výrobu vodíka [kWh],
- $k_{kWh \rightarrow m^3}$ – koeficient energetickej náročnosti premeny elektrickej energie na vodík [kWh/ m^3],
- $k_{m^3 \rightarrow kWh}$ – koeficient spätnej premeny [m^3 /kWh].

D. Model zaťaženia

Program Matlab/Simulink ponúka viacero možností modelovania zaťaženia. V tejto práci bolo zaťaženie modelované pomocou statických a dynamických záťaží. Zriedkavo v prípade, ak nebolo potrebné danú záťaž modelovať fyzikálnym spôsobom, priebeh zaťaženia bol priamo načítavaný z externého súboru alebo vytvorený ako signál pomocou bloku Signal Builder.

1) Statická RLC záťaž

Ako statické zaťaženie, ktoré sa nemení v čase bol používaný blok pre 3-fázovú RLC záťaž. Alternatívne je možné použiť blok s názvom 3 fázový uzol. Obidve bloky vystupujú ako konštantná impedancia po celú dobu simulácie. Činný a jalový výkon odoberaný záťažou je úmerný štvorcovo príloženého napätia. Rozdiel spočíva v zadávaní vstupných dát. RLC záťaž dovoľuje zadať činný a jalový odoberaný výkon, zatiaľ čo RLC uzol parametre prvkov RLC. Okrem toho blok RLC záťaž umožňuje priamo výber zapojenia zaťaženia do hviezdy alebo do trojuholníka.



Obr. 9 Typy blokov pre modelovanie zaťaženia v programe Matlab/Simulink

2) Dynamická záťaž

Za účelom modelovania zaťaženia premenlivého v čase bol použitý blok s názvom 3-fázová dynamická záťaž s externým vstupom. Jedná sa o záťaž, ktorej odoberaný činný a jalový výkon je možné zadať priamo v dialógovom okne, alebo ho načítavať v čase rôznou formou, napríklad z externého súboru. V prípade načítavania hodnôt výkonov cez externý vstup sa záťaž správa ako konštantná impedancia, výkony sú prepočítané na prúdy podľa aktuálnej hodnoty napätia a následne injektované do jednotlivých fáz v mieste pripojenia.

Nastavené hodnoty výkonov pomocou dialógového okna sa menia v závislosti od súslednej zložky napätia. Impedancia zaťaženia je udržiavaná na konštantnej úrovni ak príložené napätie je nižšie ako minimálna hodnota napätia špecifikovaná

v nastaveniach bloku. Ak je napätie väčšie, činný a jalový výkon sa mení nasledovne:

$$P(s) = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_p} \frac{1 + T_{p_2}s}{1 + T_{p_1}s} \quad [W], \quad (22)$$

$$Q(s) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_q} \frac{1 + T_{q_2}s}{1 + T_{q_1}s} \quad [VAr], \quad (23)$$

kde

- V_0 – počiatočná hodnota súslednej zložky napätia [V],
- P_0 – počiatočný činný výkon pri počiatočnom napätí [W],
- Q_0 – počiatočný jalový výkon pri počiatočnom napätí [VAr]
- V – súsledná zložka napätia [V],
- n_p, n_q – exponenty určujúce povahu záťaže [-],
- T_{p1}, T_{p2} – časové konštanty určujúce dynamiku činného výkonu [s],
- T_{q1}, T_{q2} – časové konštanty určujúce dynamiku jalového výkonu [s].



Obr. 10 Blok dynamickej záťaže v programe Matlab/Simulink

E. Model elektrickej siete

Podobne ako pri modelovaní zaťaženia, boli pre vytvorenie modelu elektrickej siete používané bloky dostupné v knižnici Simpowersystems.

1) Model transformátora

V prípade potreby začlenenia transformátorov do modelovaných prenosových a distribučných sietí bol použitý blok s názvom trojfázový transformátor – dvojinut'ový. Okrem základných parametrov ako je menovitý výkon, frekvencia, napätie primárneho a sekundárneho vinutia, odpor a indukčnosť vinutí, model ponúka na výber aj spomedzi

rôznych typov jadier, umožňuje meniť zapojenie vinutí a simulovať aj saturáciu jadier.

2) Model elektrického vedenia

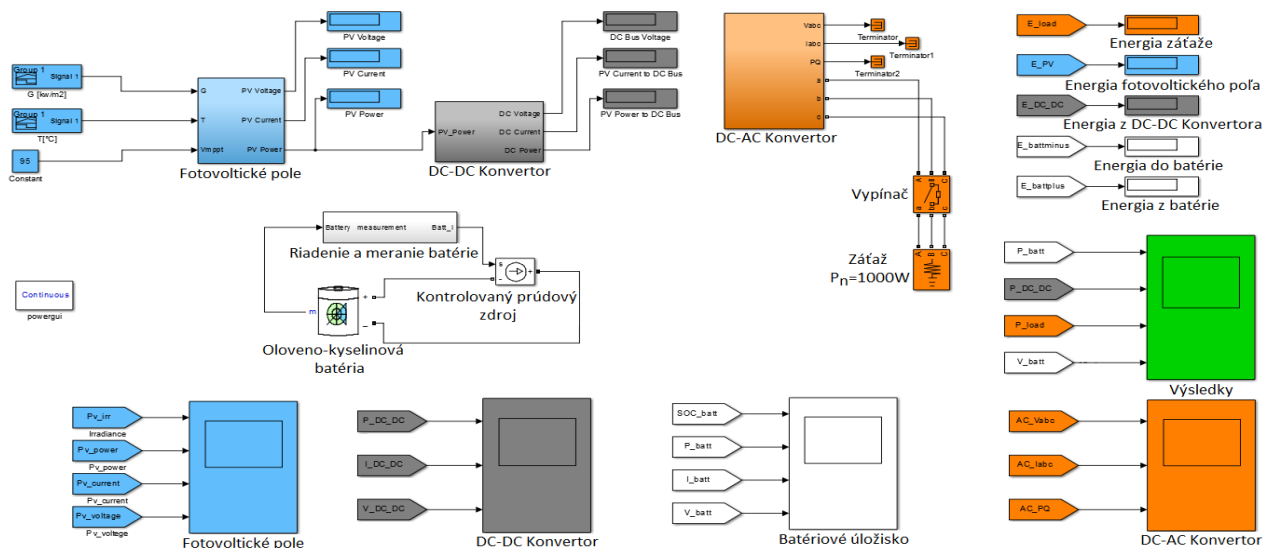
Dlhé elektrické vedenia, ktorých dĺžka presahuje stovky metrov až kilometre, boli modelované pomocou π článkov. Bloky obsahujúce model π článku sú podobne ako v predchádzajúcom prípade dostupné v knižnici Simscape Powersystems. V prípade kratších úsekov, rádovo desiatky metrov, boli vedenia modelované pomocou sériovo zapojených odporov a indukčností. Spravidla, dlhšie úseky bolo potrebné modelovať v distribučných sieťach vysokého napätia, kratšie v distribučných sieťach nízkeho napätia.

III. VÝSKUM VYUŽITIA AKUMULAČNÝCH ZARIADENÍ V OBLASTI HYBRIDNÝCH SYSTÉMOV

Najvýznamnejším výstupom výskumu v tejto oblasti je vytvorený a následne validovaný model hybridného systému, ktorý môže slúžiť ako univerzálny simulátor slúžiaci na výpočet výkonových a energetických bilancií takýchto systémov.

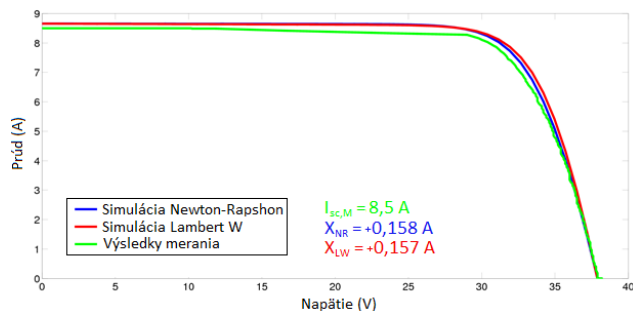
Model hybridného systému bol vytvorený v prostredí Matlab/Simulink. Umožňuje pozorovať energetické a výkonové bilancie celého systému ale aj správanie sa jednotlivých častí. Je tvorený fotovoltickým poľom pripojeným na jednosmernú DC zbernicu prostredníctvom DC-DC konvertora s funkciou MPPT, akumuláčným systémom, DC-AC meničom a zaťažením. Okrem blokov simulujúcich tieto fyzické prvky sú v modeli vytvorené aj zobrazovacie a výpočtové bloky pre grafickú reprezentáciu výsledkov následne simulovaných scenárov.

Po vytvorení matematického modelu bola vykonaná jeho validácia, ktorá spočívala v porovnaní výsledkov simulácie s dátami nameranými na experimentálnom hybridnom systéme v laboratóriách VUT FEKT.



Obr. 11 Implementácia hybridného systému v programe Matlab/Simulink

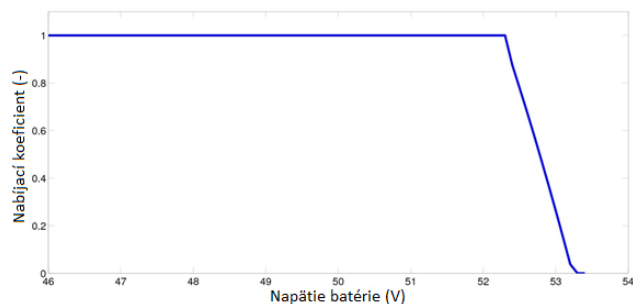
Fotovoltaické pole v predmetnom modeli bolo vytvorené na matematickom základe popísanom v kapitole II, sekcii A. Parametre sériového a paralelného odporu boli určené pomocou Newton-Raphson iteratívnej metódy a Lambertovej W-funkcie.



Obr. 12 Meraná a modelovaná V-A charakteristika fotovoltaického poľa

Porovnanie výsledkov simulácie modelu s vykonaným meraním na reálnom fotovoltaickom module je možné vidieť na tvare I-V charakteristiky zobrazenej na obr. 12. V oblasti prúdu nakrátko je odchýlka X_{NR} a $X_{LW} + 0,158$ a $+0,157$, čo je spôsobené plošným znečistením modulu počas merania, a to sa prejavilo znížením hodnoty prúdu oproti hodnote uvádzanej výrobcom v dátovom liste. Z obrázku je zrejmé, že rozdiely medzi výsledkami simulovaných hodnôt panelu s parametrami získanými pomocou Newton-Rapshonovej metódy a Lambertovej W-funkcie sú minimálne, a obidve je teda možné s veľkou presnosťou použiť pre stanovenie potrebných parametrov (A , R_S , R_{SH}).

Blok simulujúci správanie sa DC-DC regulátora bol modelovaný iba z pohľadu toku výkonu a príslušných regulačných funkcií, spínacie pochody a prechodné deje neboli uvažované. Vstupnou veličinou je výstupný výkon fotovoltaického poľa. Následne je tento výkon vynásobený regulačným koeficientom (Obr. 13), ktorý rešpektuje aktuálny stav akumuláčného zariadenia – batérií a podľa aktuálneho napätia akumuláčného systému reguluje výkon v rozmedzí 0-100 %. V ďalšom kroku je uvažovaná konštantná účinnosť konvertora na úrovni $\eta_{DC-DC}=96\%$.



Obr. 13 Nabíjací koeficient v závislosti od nabíjacieho koeficientu

Matematicky je možné popísať správanie sa DC-DC konvertora pomocou nasledujúcej rovnice:

$$P_{out,DC-DC} = \begin{cases} 0 & \text{if } P_{in,DC-DC} \leq 80 \text{ W} \\ P_{in,DC-DC} * Q & \text{if } P_{in,DC-DC} \geq 80 \text{ W} \end{cases} \quad [W] \quad (24)$$

Okrem vyššie uvedených funkcií, DC-DC konvertor obsahuje funkciu pre hľadanie maximálneho výkonového bodu fotovoltaického poľa (MPPT) na báze Perturb and Observe (P&O) z dôvodu dosiahnutia vyššej prevádzkovej účinnosti.

Akumulačný systém spolu s príslušným systémom riadenia nie je z dôvodu veľkého rozsahu možné popísať v tomto príspevku. Algoritmus riadenia je detailne popísaný v [12]. Návrh riadenia vychádzal z nasledujúcich predpokladov:

- Systém bude primárne využívať dostupný výkon fotovoltaiky pre nabíjanie akumulátorov a napájanie zaťaženia.
- V prípade ak úroveň nabitia klesne na hodnotu 20% a výkon zaťaženia je väčší ako dostupný výkon z fotovoltaiky, je systém dobíjaný zo siete konštantným výkonom, ktorý je voliteľným parametrom simulácie.
- V prípade, že je v platnosti vysoká tarifa, je výkon zaznamenávaný a nabíjanie je ukončené pri dosiahnutí úrovne 30% SOC.
- V dobe platnosti nízkej tarify je nabíjanie začaté nezávisle na hodnote SOC. Výkon je zaznamenávaný a nabíjanie je ukončené až pri dosiahnutí úrovne 100% SOC.

Menič je možné v zostavenom modeli definovať ako zariadenie, ktoré konvertuje jednosmernú energiu na striedavú zo zadanou konštantnou účinnosťou. V praktických aplikáciách sa účinnosť meniča mení v závislosti od aktuálneho zaťaženia, v prípade vytvoreného modelu bola zvolená konštantná hodnota počas celej doby simulácie a to $\eta_{DC-AC}=95\%$. Spínacie pochody neboli uvažované podobne ako pri DC-DC konvertore.

Model ponúka dve možnosti, ktoré je možné využiť pre vytvorenia diagramu zaťaženia.

Priebeh zaťaženia je možné definovať pomocou ľubovoľného počtu spotrebičov a ich spínaním v čase. Tento spôsob je implementovaný pomocou blokov s názvom 3 fázová RLC záťaž (podrobne popísaných v kapitole II, sekcii C) a prvkov pre spínanie zaťaženia. Odoberaný výkon je meraný a následne vstupuje do riadiacej logiky systému.

Druhým spôsobom môže byť priame načítanie požadovanej premennej, napríklad importom meraných alebo vypočítaných hodnôt. Pre účely tejto simulácie bol použitý druhý spôsob, teda diagram zaťaženia je dopredu známy a vstupuje do modelu načítaním ako vstupná premenná.

A. Meranie experimentálneho systému za účelom validácie

Funkčnosť a správnosť vnútornej logiky systému bola validovaná s využitím nameraných dát na experimentálnom hybridnom systéme. Pre prevádzkové meranie bol použitý výkonový analyzátor HIOKI 3390-10 a meranie bolo realizované dňa 15.4. 2016.

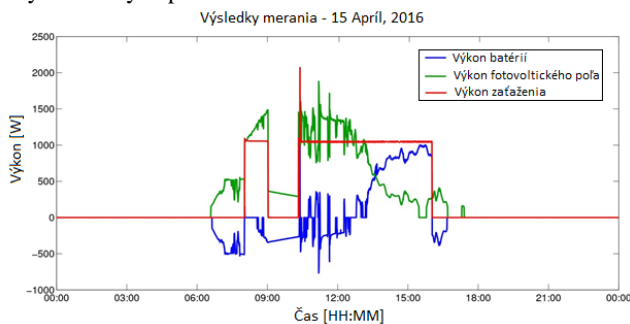
Meranie prúdu bolo prevedené nasledovne:

- striedavý prúd na výstupe DC-AC meniča s kliešťami HIOKI 9272-10 s rozsahom 20 A,
- jednosmerný prúd DC-DC konvertora kliešťami HIOKI 3274 s rozsahom 150 A,
- jednosmerný prúd na rozhraní akumulátorov senzorom HIOKI 9709 s rozsahom 500 A

Napätie bolo merané priamo prostredníctvom napäťových vstupov na analyzátore.

Laboratórny systém je tvorený fotovoltaickým poľom o výkone 2,25 kW, ktoré pozostáva s 9 panelov o výkone 250 W radených do troch paralelne zapojených stringov s tromi panelmi v sérii. Akumulačný systém je tvorený olovenými akumulátormi s menovitým napätím 48V a kapacitou 400 Ah. Výkonovú časť tvoria striedače Studer Xtender (pracujúce v režime Master-slave z dôvodu zníženia strát v stand-by režime), každý o menovitom výkone 2600 W.

V rámci merania prevádzky systému, boli výkony merané na výstupe DC-DC meniča, na rozhraní batériového systému a výkon na výstupe DC-AC striedača.

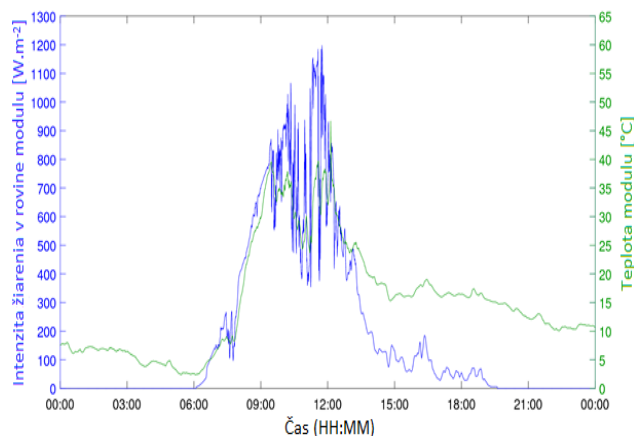


Obr. 14 Výsledky merania výkonov hybridného systému

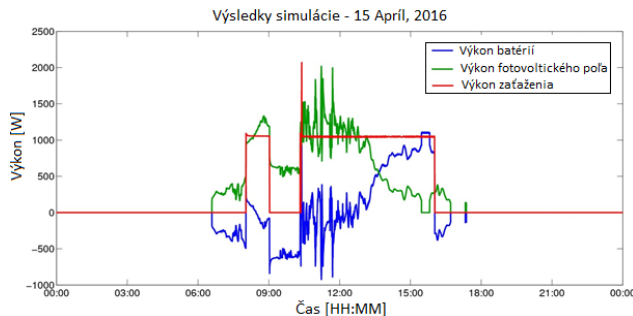
B. Simulácia meraného dňa

Pre overenie správnosti zostaveného modelu bola vykonaná simulácia so vstupnými parametrami nameranými v rovnaký deň, počas ktorého bolo vykonané meranie tokov výkonom experimentálneho hybridného systému, teda dňa 15. Apríla 2016.

Vstupné premenné použité v simulácii (teplota modulu a intenzita slnečného žiarenia) pochádzajú z reálnych meraní a ich priebehy sú znázornené na nasledujúcom obrázku (Obr. 15). Intenzita slnečného žiarenia bola meraná v rovine fotovoltaického modulu kalibrovaným pyranometrom CMP21 a teplota panelu bola meraná na jeho zadnej strane teplotným odporovým snímačom PT100.



Obr. 15 Priebeh intenzity slnečného žiarenia a teploty modulu v simulovaný deň



Obr. 16 Výsledky simulácie získané prostredníctvom vytvoreného modelu

C. Porovnanie energetickej bilancie

Tabuľka I. Porovnanie energetickej bilancie pri validácii - namerané hodnoty

Názov veličiny	Hodnota
Energia odobraná záťažou na AC strane	7.021 kWh
Energia dodaná do systému DC-DC meničom	6.823 kWh
Energia odobraná z akumulátora	2.333 kWh
Energia dodaná do akumulátora	1.548 kWh

Tabuľka II Porovnanie energetickej bilancie pri validácii - výsledky simulácie

Názov veličiny	Hodnota
Energia odobraná záťažou na AC strane	7.021 kWh
Energia dodaná do systému DC-DC meničom	6.818 kWh
Energia odobraná z akumulátora	2.361 kWh
Energia dodaná do akumulátora	1.789 kWh

Tabuľka III Porovnanie energetickej bilancie pri validácii - % rozdiel

Názov veličiny	Hodnota
Energia odobraná záťažou na AC strane	0 %
Energia dodaná do systému DC-DC meničom	-0.07 %
Energia odobraná z akumulátora	+1.2 %
Energia dodaná do akumulátora	+15 %

Z prezentovaných výsledkov vyplýva, že zostavený model vykazuje odchýlku výsledkov 15 % u energie dodanej do akumulátora (Tab.III), ktorá je spôsobená predovšetkým voľbou odlišného spôsobu nabíjania olovenej batérie, kedy nebola v modeli implementovaná funkcia trojstupňového nabíjania (bulk stage, absorption stage a float stage), ako je v praxi obvyklé u oloveno-kyselinových akumulátorov. Vo vytvorenom modeli bolo nabíjanie implementované ako jednoduché s využitím nabíjacieho koeficientu Q . Jedná sa ale iba o chybu súvisiacu iba s konkrétnou použitou technológiou, pričom je možné predpokladať, že pri simulácii napríklad lítium-iónových batérií sa trojstupňové nabíjanie neuplatní a chyba bude omnoho menšia.

IV. VÝSKUM VYUŽITIA AKUMULAČNÝCH ZARIADENÍ V OBLASTI DISTRIBUČNÝCH SIETÍ

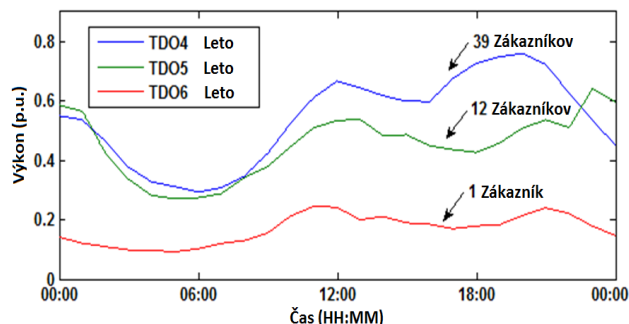
Výskum využitia akumuláčnych zariadení v distribučných sieťach je zameraný na riešenie problémov vyskytujúcich sa pri prevádzke OZE a na ich riešenie pomocou energetickej úložisk. V každom analyzovanom prípade boli posúdené vplyvy obnoviteľných zdrojov na distribučnú sieť najmä z pohľadu tokov výkonov a napäťových pomerov, a následne

v prípade nepriaznivých dopadov navrhnuté spôsoby využitia akumulčných zariadení za účelom odstránenia týchto nepriaznivých javov. Navrhnuté spôsoby využitia spočívajú v návrhu architektúry systému a optimálneho spôsobu jeho riadenia.

A. Študovaná lokalita

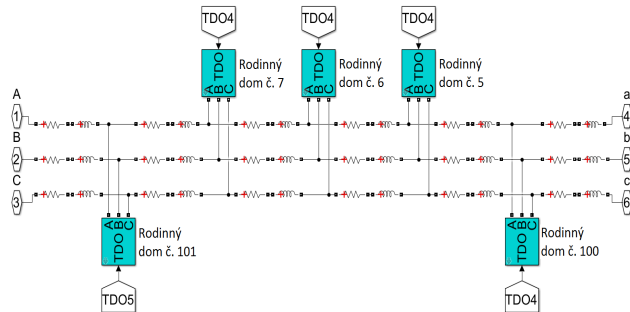
Na preverenie závažnosti týchto vplyvov bola zvolená časť distribučnej siete nn na Východnom Slovensku. Následne, sieťový model rezidenčnej lokality založený na reálnych dátach bol vytvorený pre tento účel. Topológia zvolenej distribučnej siete je zobrazená na nasledujúcom obrázku (obr. 19), pričom štúdie boli vykonávané vo zvýraznenej časti. Sieť pozostáva z distribučného transformátora a radiálneho vývodu, ktorý poskytuje napájanie pre všetkých rezidenčných zákazníkov pomocou vzdušného vedenia. Typy vzdušných vedení spolu s príslušnými dĺžkami sú taktiež znázornené na nasledujúcom obrázku.

V distribučnej sieti je pripojených celkovo 43 domácnosti, ktoré môžu byť rozdelené do troch skupín na základe typických denných diagramov zaťaženia (obr. 17).

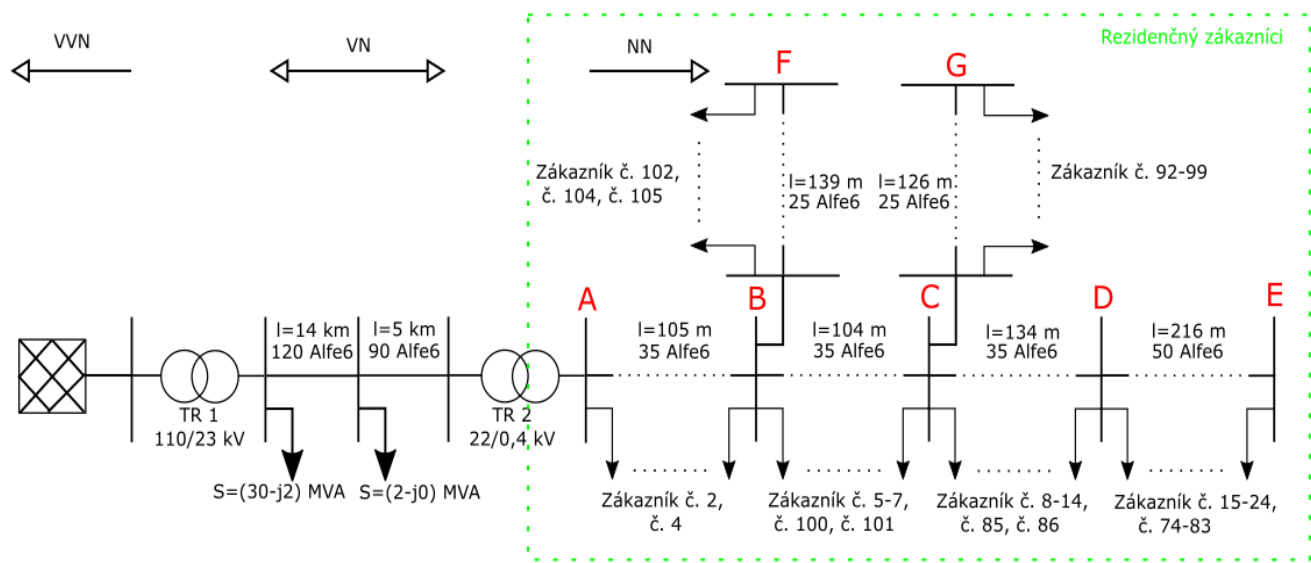


Obr. 17 Ukážka typových diagramov zaťaženia pre typický letný deň

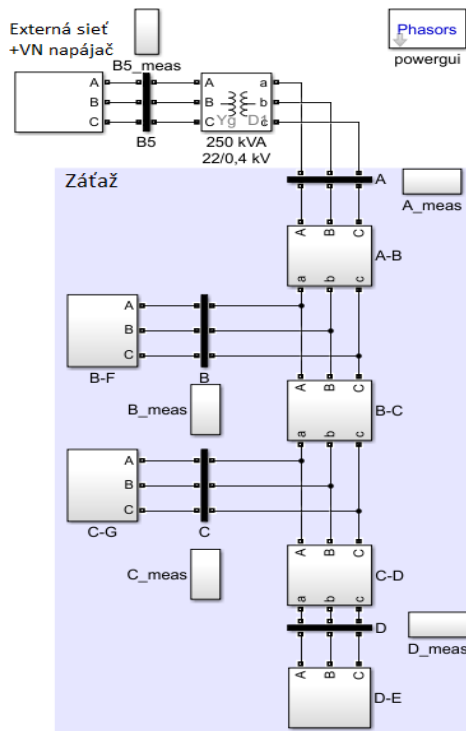
Model siete bol kompletne vytvorený použitím štandardných blokov z knižnice Simscape Powersystems, ktoré boli detailne popísané v kapitole II a sekcii D, respektíve E. Model pozostáva z ekvivalentu externej časti elektrizačnej sústavy, vysokonapäťového napájača, transformátora, nízkonapäťového napájača a zaťaženia. Vysokonapäťový napájač bol tvorený sériou vzdušných vedení a zaťaží, ktoré boli namodelované pomocou π článkov a blokov s názvom RLC záťaž. Pre lepšiu orientáciu je nízkonapäťový napájač rozdelený do niekoľkých sekcií (označených písmenami A až G), kde je každý zákazník pripojený s ohľadom na jeho skutočnú vzdialenosť. Vedenia medzi jednotlivými zákazníkmi boli modelované ako odpory a indukčnosti v sérii na základe typu vedenia a príslušnej dĺžky. Implementácia jednej z menších sekcií (sekcia B-C) je znázornená na obr. 18. Samotný zákazníci boli modelovaný pomocou bloku dynamická záťaž. Každému z nich bol priradený príslušný denný diagram zaťaženia, koeficient zaťaženia a nastavený účinník, to všetko na základe reálnych dát. Náhľad na celkovú implementáciu v programe je uvedený na obr. 20.



Obr. 18 Pripojenie jednotlivých zákazníkov v programe Matlab/simulink



Obr. 19 Topológia študovanej lokality



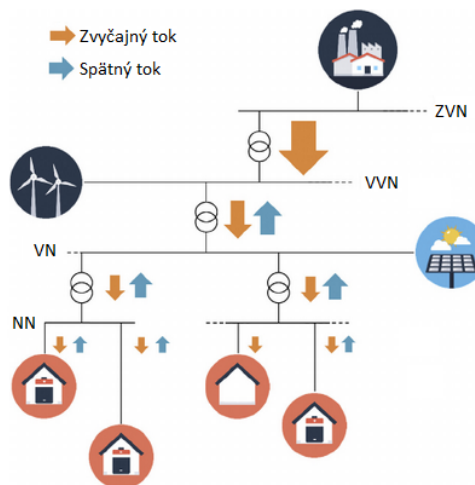
Obr. 20 Implementácia študovanej lokality v programe Matlab/Simulink

B. Energetické úložiská ako prostriedok na odstránenie spätného toku výkonu

Spätný tok výkonu je spôsobený nerovnováhou medzi výrobou a spotrebou v danej oblasti. Fotovoltaické elektrárne sú charakteristické výrobou iba počas dňa, so špičkou okolo obeda. V kontraste, v nízkonapäťových distribučných sieťach kde prevládajú rezidenční zákazníci, je najvyšší dopyt po elektrickej energii v iných časových úsekoch, typicky ráno a večer. Ak úroveň inštalovaného výkonu obnoviteľných zdrojov presiahne určitý limit, v distribučnej sieti sa nachádza prebytočná energia, ktorá spôsobí reverzný (spätný) tok výkonu cez transformátor na vyššiu napäťovú úroveň. Podobná situácia môže nastať aj v distribučnej sieti vysokého napätia, kde je pripojených viacero takýchto komunít, prípadne ďalšie OZE. Tieto prevádzkové stavy sú typické v letných mesiacoch, keďže spotreba elektrickej energie je vtedy celkovo nižšia a výroba vyššia ako v zime.

V Nemecku je táto situácia už v dnešnej dobe samozrejmosťou (najmä v Bavorsku), a preto bežné plány a metódy rozšírenia siete musia byť prepracované, a prevádzkovatelia distribučných sústav čelia rozsiahlym dopadom na ich finančné a technické plány budúceho rozvoja siete.

Stav kedy spätný tok nastáva je možné považovať za nežiaduci, keďže spôsobuje problémy prierezovo na všetkých napäťových úrovniach. Od napäťových odchýlok v sieťach nn až po veľkú mieru re-dispečingu na vyšších napäťových úrovniach. Okrem toho, je z hľadiska strát v elektrizačnej sústave výhodnejšie spotrebovať elektrickú energiu v mieste, kde bola vyrobená.



Obr. 21 Porovnanie tokov výkonov v konvenčnej elektrizačnej sústave a v sústave s vysokou penetráciou OZE

Spomenuté dôvody boli motiváciou pre vykonávanie týchto štúdií a návrhu možných riešení využitím energetických úložísk.

Celkovo boli simulované dva prípady, a to penetrácia iba fotovoltaickými respektíve fotovoltaickými a veternými zdrojmi. V prvom prípade, bola do vytvoreného modelu distribučnej siete vložená fotovoltaická elektráreň s výkonom 55 kWp, modelovaná podľa kapitoly II, sekcia A. Druhý simulovaný prípad zahŕňa fotovoltaickú elektráreň s nominálnym výkonom 40 kWp simulovanú rovnako, a veternú elektráreň o výkone 15 kWp simulovanú v súlade s kapitolou II, sekciovou B.

V tomto prípade boli elektrárne vložené ako jeden celok, je však dôvodné predpokladať, že z hľadiska toku výkonu je sa jedná o rovnakú situáciu ako v prípade rovnomerného rozloženia fotovoltaických a veterných zdrojov v rámci distribučnej siete. To spôsobilo v súlade s predpokladmi značné toky spätné toky výkonu do siete vn.

1) Návrh optimálneho riadenia energetického úložiska pre zamedzenie spätného toku výkonu

Úložisko bolo modelované v súlade s kapitolou II a sekciovou C. Stratégia pre jeho riadenie bola vytvorená za účelom maximálneho využitia vyrobenej elektrickej energie v mieste spotreby a zamedzenia výskytu spätného toku výkonu. Optimálna prevádzka úložiska je zabezpečená súčasným využitím ďalších prospešných služieb, ako je zníženie špičkového odberu presunutím dopytu po elektrickej energii do času mimo špičiek (peak shaving) alebo nastavenie úrovne zaťaženia (load leveling) distribučného transformátora, čo okrem zvýšenia prevádzkovej flexibility predstavuje aj potenciál ekonomických benefitov.

Hlavnou úlohou vytvorenej stratégie je riadiť energetickú výmenu medzi úložiskom a distribučnou sieťou podľa vopred preddefinovaných pravidiel a súboru parametrov. Bolo potrebné definovať prevádzkové stavy a správanie sa systému v každej situácii, teda vytvoriť vnútornú logiku – algoritmus ktorý popisuje kedy a s akým výkonom má úložisko energiu dodávať a odoberať.

Základné predpoklady ohľadom funkcionality úložiska, ktoré boli brané do úvahy pri návrhu boli definované nasledovne:

- Zamedziť spätnému toku do nadradenej sústavy a teda využiť vyrobenú energiu v mieste výroby
- Riadiť nabíjanie/vybíjanie podľa aktuálnej ceny elektriny (nízka a vysoká tarifa)
- Využívať uskladnenú energiu iba počas vysokej tarify
- Možnosť nabíjania zo siete iba počas nízkej tarify
- Dovoľiť nastaviť úroveň zaťaženia distribučného transformátora počas vysokej a nízkej tarify
- Zabezpečiť minimálnu úroveň nabitia na začiatku každého dňa
- Dovoľiť prednastaviť špecifický prevádzkový rozsah úložiska (vzhľadom na špecifiká použitej technológie)

Na základe definovaných funkcionalít bol navrhnutý algoritmus (Obr. 22) pre riadenie distribučného úložiska energie. Vstupné hodnoty je možné rozdeliť do dvoch kategórií. Do prvej kategórie spadajú okamžité hodnoty, ktoré sú nepretržite merané a načítavané. Druhá kategória je tvorená konštantnými parametrami, ktoré musia byť zvolené pred uvedením zariadenia do prevádzky, respektíve pred začatím simulácie.

Význam premenných, ktoré sú použité v navrhnutom algoritme je nasledovný:

- SOC – aktuálna úroveň SOC [%],
- P_{LOAD} – činný výkon odoberaný zaťažením [kW],
- P_{PV} – činný výkon generovaný fotovoltaickou elektrárnou [kW].

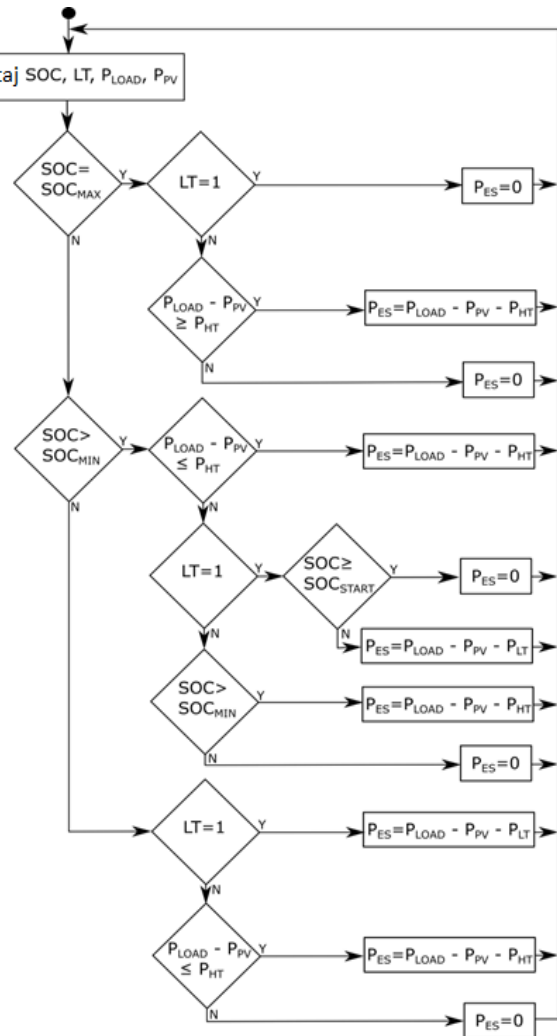
Konštantné parametre, ktoré musia byť zvolené pred uvedením do prevádzky:

- SOC_{MAX} – maximálna úroveň SOC [%],
- SOC_{MIN} – minimálna úroveň SOC [%],
- SOC_{START} – požadovaná hodnota SOC na začiatku každého dňa [%],
- LT – platnosť nízkej tarify (0-1) [-],
- P_{HT} – požadovaná hodnota výkonu odoberaná zo siete počas vysokej tarify [kW],
- P_{LT} – požadovaná hodnota výkonu odoberaná zo siete počas nízkej tarify (nabíjania) [kW].

Výstupom algoritmu je:

- P_{ES} – výkon dodávaný/odoberaný energetickým úložiskom [kW].

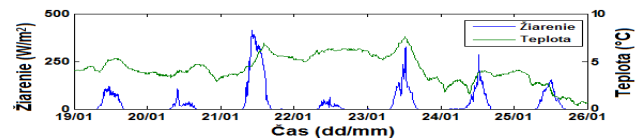
Ako už bolo spomenuté, boli simulované dva prípady (iba fotovoltaická elektrárňa a kombinácia fotovoltaickej a veternej elektrárne). Obidva s týchto variantov boli simulované počas jedného letného (Obr. 29 a Obr. 30) a zimného týždňa (Obr. 25 a Obr. 26). Kapacita úložiska bola nastavená na 750 kWh a výkon 50 kW. Účinnosť počas nabíjania ako aj vybíjania bola uvažovaná na úrovni 95%, z čoho vyplýva celková účinnosť cyklu 90 %.



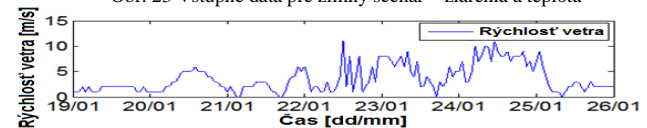
Obr. 22 Algoritmus pre riadenie energetického úložiska

2) Výsledky simulácie navrhnujetej stratégie pre zimný scenár

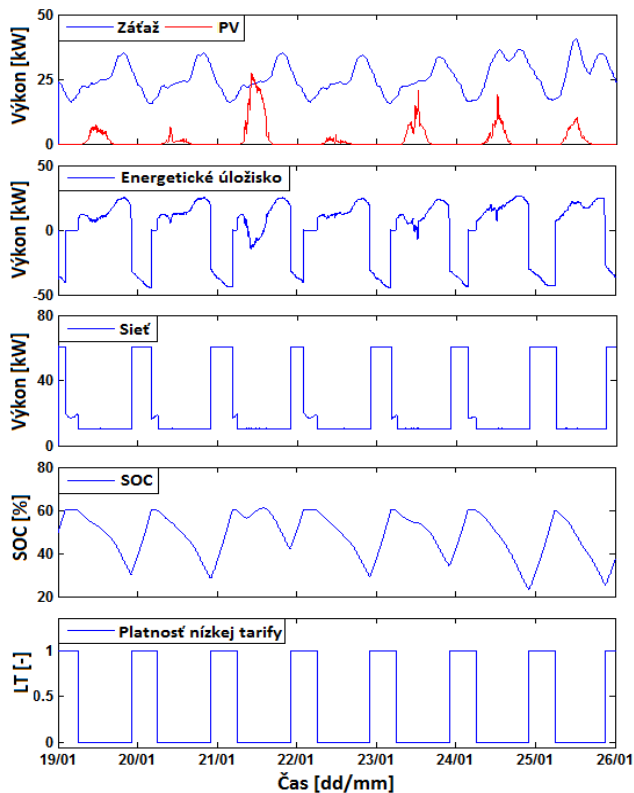
Vstupné dáta pre simuláciu predstavuje teplota, slnečné žiarenie (Obr. 23) a rýchlosť vetra (Obr. 24). Výkonové bilancie systému spolu s SOC úložiska a platnosťou nízkej tarify je možné vidieť na Obr. 25 pre variant iba s fotovoltaickou elektrárnou a na Obr. 26 pre variant s fotovoltaickou a veternou elektrárnou. Energetické bilancie systému pre obidva varianty sú uvedené v Tab. IV.



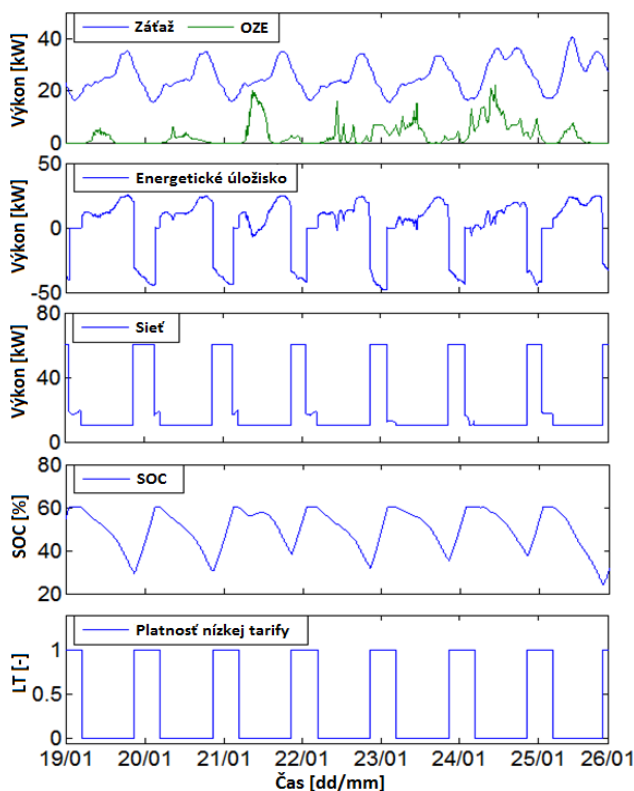
Obr. 23 Vstupné dáta pre zimný scenár – žiarenia a teplota



Obr. 24 Vstupné dáta pre zimný scenár – rýchlosť vetra



Obr. 25 Výsledky simulácií pre zimný scenár – iba fotovoltaická elektrárň



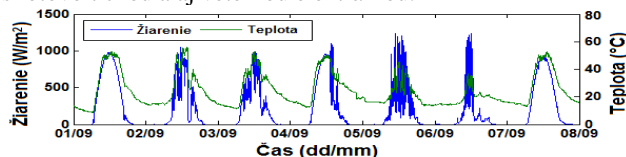
Obr. 26 Výsledky simulácií pre zimný scenár – obidve typy elektrární

Tabuľka IV Výsledky energetickej bilancie pre zimný scenár

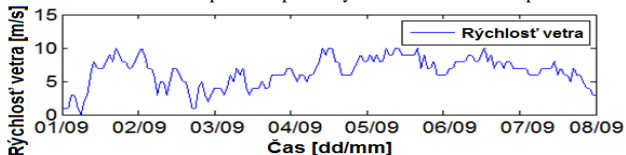
Hodnota	Energia (FV) [kWh]	Energia (FV+VT) [kWh]
Energia spotrebovaná lokalitou	4267,57	4267,57
Energia generovaná fotovoltaickou elektrárnou	298,77	217,3
Energia generovaná veternou elektrárnou	-	285,4
Energia dodaná zo siete 22 kV počas vysokej tarify	1167,17	1167
Energia dodaná zo siete 22 kV počas nízkej tarify	2786,48	2573
Energia dodaná do siete 22 kV	0	0
Energia uložená energetickým úložiskom	1598,52	1450
Energia dodaná energetickým úložiskom	1701,24	1562,1
Bilancia energetického úložiska	-102,72	-112,1

3) Výsledky simulácie navrhnutej stratégie pre letný scenár

Vstupné dáta pre simuláciu predstavuje teplota, slnečné žiarenie (Obr. 27) a rýchlosť vetra (Obr. 28). Výkonové bilancie systému spolu s SOC úložiska a platnosťou nízkej tarify je možné vidieť na Obr. 29 pre variant iba s fotovoltaickou elektrárnou a na Obr. 30 pre variant s fotovoltaickou a aj veternou elektrárnou.



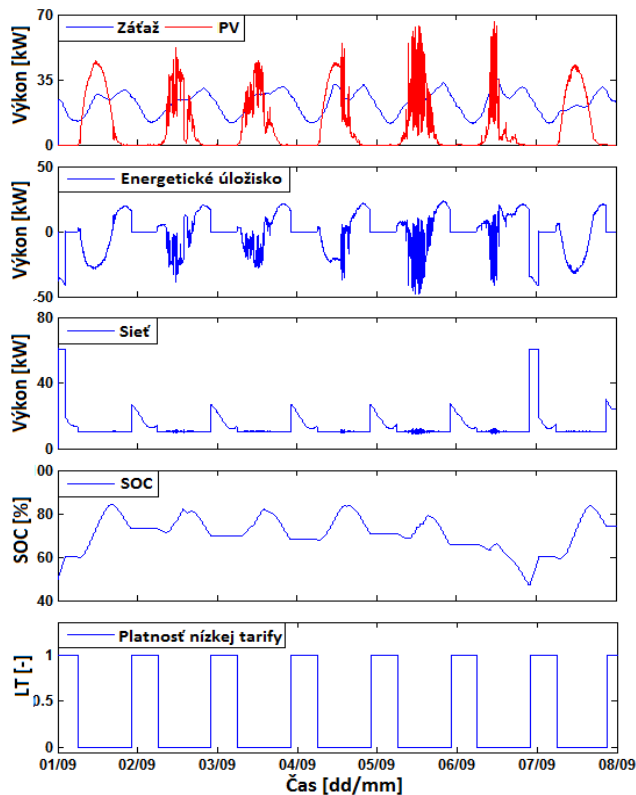
Obr. 27 Vstupné dáta pre letný scenár – žiarenie a teplota



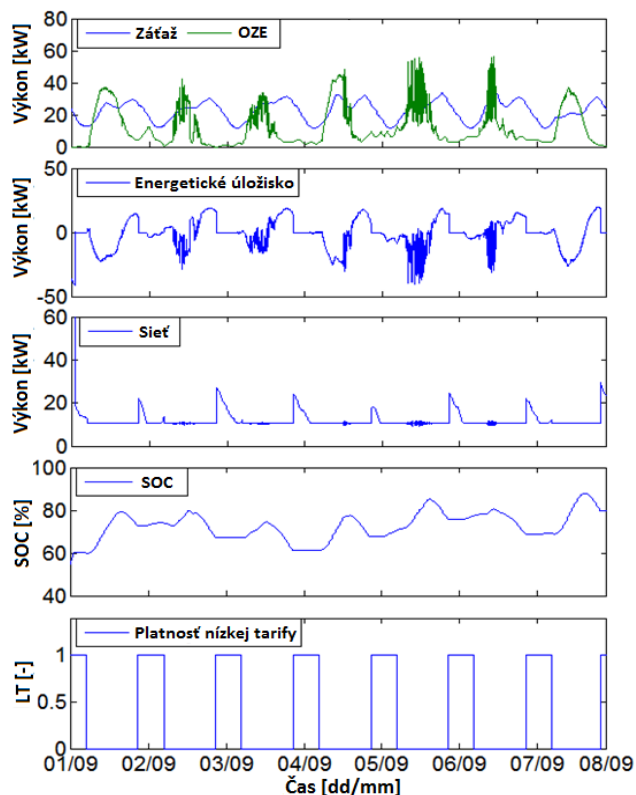
Obr. 28 Vstupné dáta pre letný scenár – rýchlosť vetra

Tabuľka V Výsledky energetickej bilancie pre letný scenár

Hodnota	Energia (FV) [kWh]	Energia (FV+VT) [kWh]
Energia spotrebovaná lokalitou	3761,57	3762
Energia generovaná fotovoltaickou elektrárnou	1663,69	1210
Energia generovaná veternou elektrárnou	-	765,3
Energia dodaná zo siete 22 kV počas vysokej tarify	1167,17	1167
Energia dodaná zo siete 22 kV počas nízkej tarify	1212,26	944,2
Energia dodaná do siete 22 kV	0	0
Energia uložená energetickým úložiskom	1021,15	835,4
Energia dodaná energetickým úložiskom	826,23	597,1
Bilancia energetického úložiska	194,92	238,3



Obr. 29 Výsledky simulácií pre letný scenár – iba fotovoltaická elektrárň



Obr. 30 Výsledky simulácií pre letný scenár – obidve typy elektrární

4) Zhrnutie a popis výsledkov vykonaných simulácií

Priebeh zaťaženia počas zimného obdobia je možné vidieť na Obr. 25 a Obr. 26, čo predstavuje výkon meraný za distribučným transformátorom pozostávajúci zo súčtu zaťaženia jednotlivých odberných miest a strát v distribučnej sieti. Spolu z diagramom zaťaženia je možné na spomínaných obrázkoch vidieť aj priebeh výkonu vyrábaného fotovoltaickou respektíve fotovoltaickou a veternou elektrárnou spolu. Porovnaním týchto hodnôt je na prvý pohľad jasné, kedy vzniká prebytok elektrickej energie v distribučnej sieti, čo by bez nasadenia energetického úložiska s prezentovanou logikou spôsobilo tok výkonu do nadradenej sústavy. Je možné vidieť, že tento stav je v zime zriedkavý, a teda využitie presúvania prebytku elektrickej energie je v tomto období ojedinele, čo je možné vidieť na priebehu dodávaného alebo odoberaného výkonu úložiskom, a to tak, že úložisko sa počas výroby z OZE nenabíja. Naopak, úložisko je počas dňa vybíjané a v noci nabíjané takmer každý deň. To znamená, že v zimnom období prevláda presun elektrickej energie odobranej počas trvania nízkej tarify do časov, kedy je v platnosti vysoká tarifa. Úroveň nabitia úložiska bola na konci každého dňa pod hodnotou 60 %, čo vyústilo v začatie nízko-tarifného nabíjania pre opätovné dosiahnutie tejto hodnoty za účelom zachovania dostatočnej kapacity na prevádzku počas nasledujúceho dňa. Pri porovnaní prípadu s fotovoltaickou elektrárnou a fotovoltaickou spolu s veternou elektrárnou je možné vidieť, že nabíjanie zo siete trvalo kratšie pri začlenení veternej elektrárne do systému. Celý priebeh odoberaného alebo dodávaného výkonu úložiskom je dôsledkom navrhnujetej stratégie riadenia a jej reakcií na udalosti v distribučnej sieti. Z priebehu výkonu odoberaného distribučným transformátorom je možné vidieť úspešné dodržanie nastavenej úrovne zaťaženia. Priebeh úrovne nabitia energetického úložiska neklesol pod 20 % (definovaná minimálna hodnota), čo môže vypovedať o správnej voľbe akumulačnej kapacity. V kontraste je možné vidieť, že počas zimného obdobia je využívaná iba časť akumulačnej kapacity medzi 20 -60 % úrovne nabitia.

Na základe energetickej bilancie systému počas zimného obdobia je možné pozorovať, že viac ako dve tretiny energie odobranej z nadradenej distribučnej siete boli odobrané počas trvania nízkej tarify. Taktiež vyplýva, že príspevok fotovoltaickej elektrárne počas zimy bol takmer zanedbateľný. Príspevok veternej turbíny bol v porovnaní z fotovoltaickou elektrárnou väčší, aj keď jej výkon je takmer trojnásobne menší. Množstvo energie dodanej do nadradenej distribučnej siete je rovné nule, a to znamená, že spätný tok výkonu vďaka využitiu navrhnujetej stratégie nenastal.

Počas letných dní je možné pozorovať oveľa väčšie množstvo energie dodané do distribučnej siete fotovoltaickou elektrárnou, zatiaľ čo rezidenčná lokalita je menej zaťažená ako v zime (obr. 29 a obr. 30). Taktiež množstvo elektrickej energie vyrobené veternou elektrárnou je väčšie a v čase rovnomernejšie rozložené. Počas špičkovej výroby fotovoltaickej elektrárne sa v sieti nachádza značné množstvo prebytočnej elektrickej energie. To sa stáva okolo obeda, v dobe platnosti vysokej tarify. V tomto čase úložisko

zamedzuje spätnému toku výkonu do nadradenej siete jeho ukladaním tak, aby bola dodržaná požadovaná úroveň zaťaženia distribučného transformátora. Uložená prebytočná energia je potom dodaná späť, ešte počas platnosti vysokej tarify. Tento proces je reakciou úložiska na udalosti v distribučnej sieti podľa definovaného riadiaceho algoritmu. Priebeh dodávaného a odoberaného výkonu energetického úložiska spolu so zaťažením distribučného transformátora je taktiež možné vidieť na spomínaných obrázkoch. Z uvedeného vyplýva, že v tomto prípade, teda v letnom období, prevláda presúvanie prebytočnej elektrickej energie generovanej z OZE. Úroveň nabitia úložiska bola v oboch prípadoch takmer po celý týždeň na úrovni nad 60 % v čase, keď platila nízka tarifa. Situácia, kedy nastalo nízko-tarifné nabíjanie zo siete sa vyskytla iba raz, a to dňa 6. septembra v prípade využitia iba fotovoltaických elektrární.

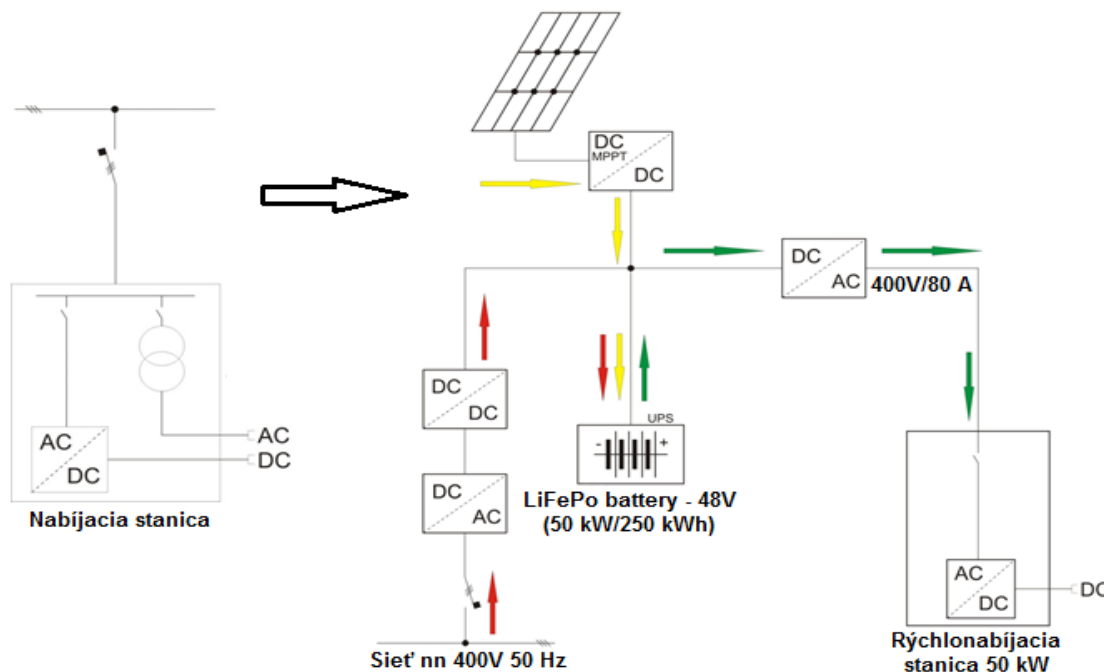
Energetické bilancie počas letného scenára vykazujú, že energia dodaná obnoviteľnými zdrojmi je v oboch prípadoch približne polovica z celkovej energie spotrebovanej zaťažením. Súčasne, energia dodaná do nadradenej siete je rovná nule, čo znamená že spätný tok výkonu nenastal a celkové množstvo energie vyrobenej obnoviteľnými zdrojmi bolo spotrebované v tej časti siete, kde bolo aj vyrobené. V prípade využitia fotovoltaickej elektrárne bola viac ako polovica energie dodaná zo siete počas nízkej tarify. V druhom prípade, pri využití aj veternej elektrárne, bolo množstvo energie odoberané počas nízkej tarify o niečo menšie ako polovica.

Záverom je možné povedať, že navrhnutá stratégia spĺňa predpoklady a požiadavky kladené pri jej návrhu, zabráňuje nepriaznivým vplyvom OZE, zvyšuje prevádzkovú flexibilitu a pracuje spoľahlivo pre obidva testované scenáre.

V. VÝSKUM VYUŽITIA AKUMULAČNÝCH ZARIADENÍ V OBLASTI ELEKTROMOBILITY

Výskum využitia akumulčných zariadení v oblasti elektromobility v dizertačnej práci zahŕňa návrh a simulácie hybridného systému s podpornou akumuláciou pre rýchlónabíjanie elektromobilov a návrh konceptu riadenia a integrácie systému V2H (Vehicle-to-Home) do hybridného systému rodinného domu. Významnejšie publikované výsledky boli dosiahnuté pri návrhu hybridného systému s podpornou akumuláciou, preto táto oblasť bude prezentovaná v rámci tohto príspevku.

Hybridný systém pre rýchlónabíjanie elektromobilov vychádza z validovaného modelu hybridného systému, ktorý bol vytvorený a detailne popísaný v kapitole III, s tým rozdielom, že veľkosti jednotlivých komponentov systému sú prispôbené tak, aby spĺňali nároky na výkon potrebný pri rýchlónabíjaní. Navrhovaná koncepcia (Obr. 31) bola oproti klasickému riešeniu nabíjacej stanice rozšírená tak, aby zahŕňala fotovoltaický zdroj (žlté šípky). Primárne je využitie energie z úložného systému (zelené šípky), zatiaľ čo sieť sa používa predovšetkým na podporu nabíjania úložného systému (červené šípky). Zvolená koncepcia je založená na predpoklade, že väčšina energie potrebnej na nabíjanie EV bude čerpaná v období nízkej tarify, to znamená, že sa počas tohto obdobia uloží do akumulácie a potom sa bude podľa potreby v priebehu dňa využívať. Energia v akumulátore pre EV sa môže použiť aj v obdobiach s vyšším zaťažením siete, čo uvoľní prenosovú kapacitu a odľahčí elektrickú sieť, a tým zníži straty súvisiace s prenosom elektrickej energie. Tento systém a jeho koncepcia je detailne popísaná autormi v publikácii [12].



Obr. 31 Navrhnutý koncept rýchlónabíjacej stanice pre elektromobily

A. Popis navrhnutého systému a simulovaného scenára A

Simulovaný scenár využíva dáta namerané počas prvého septembrového týždňa. Diagram zaťaženia je priamo načítavaný a je tvorený nabíjacími cyklami trinástich elektromobilov počas jedného dňa (denný diagram je rovnaký pre každý deň), ktoré sú nabíjané na 50 kW rýchlonabíjacej stanici. Je uvažované nabíjanie batérie elektromobilu s kapacitou 25 kWh, pričom každý elektromobil je nabitý z 0 % na 80 % jeho akumulačnej kapacity. S toho vyplýva, že jeden akumulačný cyklus predstavuje 20 kWh elektrickej energie a trvá približne pol hodiny.

Grafické výsledky simulovaného scenára A sú znázornené na obr. 32. Obr. 33 ponúka detailný pohľad na časť týždňa, ktorá je vyznačená zelenou farbou na obrázku 32, konkrétne sa jedná o 4. simulačný deň. Prevádzka nabíjacej stanice je uvažovaná iba v čase od 07:00 do 19:00, čo je zohľadnené na distribúciu príchodov elektrických vozidiel na nabíjaciu stanicu v čase. Navyiac, tieto príchody sú koncentrované do ranných a večerných špičiek (červená krivka na obr. 33).

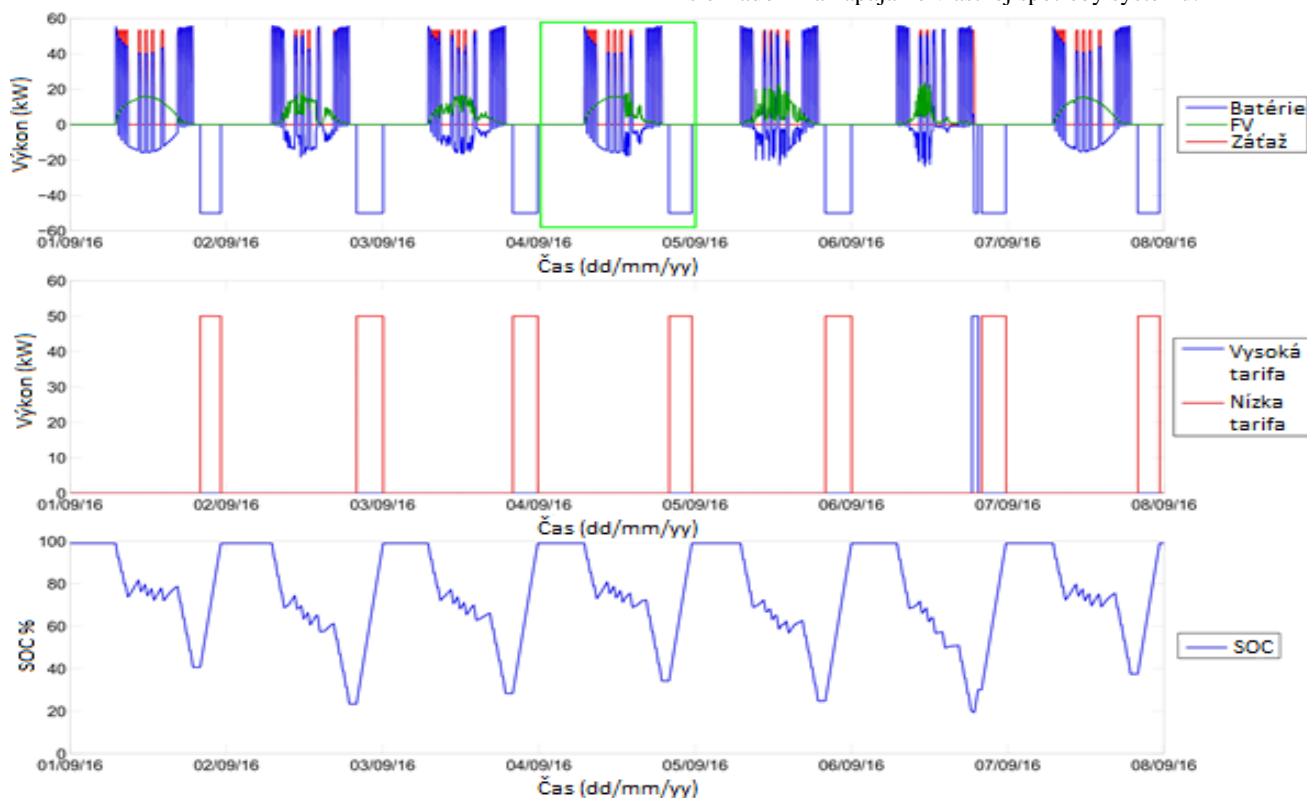
Zvolený maximálny výkon, ktorý je možný odoberať zo siete bol stanovený na hodnotu 50 kW (Je to odvodené od istenia rýchlonabíjacej stanice – 3 x 80 A). Ak je uvažovaná osem hodín trvajúca nízka tarifa, teoreticky môže byť 400 kWh odobraných zo siete v tomto čase. Táto hodnota predstavuje zároveň maximálnu hodnotu celkovej kapacity podpornej akumulácie, ktorú má zmysel z ekonomického hľadiska uvažovať.

Napätie Li-ion akumulátora je uvažované 48 V a kapacita 5208 Ah (250 kWh/48V). Na začiatku simulácie je predpokladané plné nabitie akumulátora.

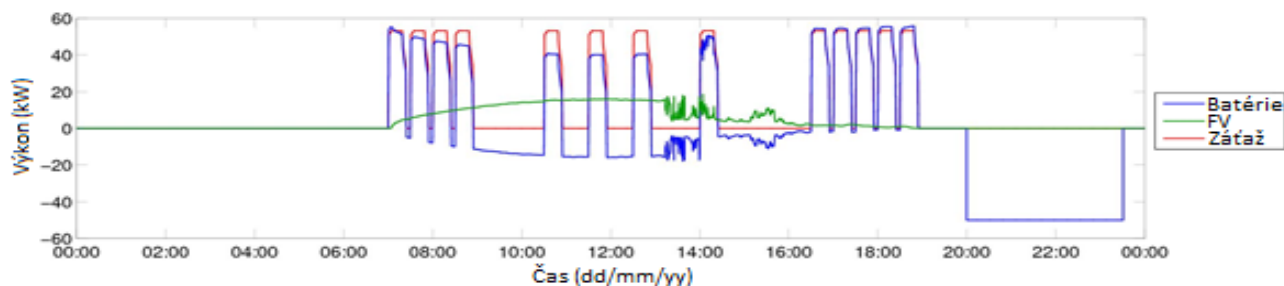
Fotovoltaický systém je tvorený štyrmi paralelne zapojenými stringmi, s ktorých každý obsahuje 20 panelov o výkone 250 W. Jedná sa o rovnaký panel aký bol použitý pri validácii modelu v kapitole III. Toto zapojenie teda predstavujú celkový inštalovaný výkon 20 kWp.

V rámci priority udržania prevádzky rýchlonabíjacej stanice je uvažované dobíjanie systému zo siete tak, aby v prípade poklesu úrovne nabitia akumulátora na 20 % bolo začaté nabíjanie bez ohľadu na nízku alebo vysokú tarifu. Ak je nabíjanie začaté počas vysokej tarify, v prípade dosiahnutia 30 % úrovne nabitia je zastavené a plné nabitie prebieha prioritne v čase nízkej tarify. Pre každý deň bola zvolená doba trvania nízkej tarify od 20:00 do 04:00.

Ako je zrejmé z nižšie uvedených výsledkov, zvolená kapacita (250 kWh) je postačujúca na prevádzku rýchlonabíjacej stanice, s tým, že nabíjanie akumulátorov prebieha prednostne v nízkej tarife. Výnimkou je 6. deň, kedy kvôli poklesu úrovne nabitia na prednastavenú úroveň bolo nevyhnutné zahájiť nabíjanie aj vo vysokej tarife. Ako bolo očakávané, nabíjanie skončilo po dosiahnutí 30 % úrovne nabitia. Týmto procesom sa zabezpečí vysoká prevádzková spoľahlivosť, pretože pri neočakávanom odpojení rýchlonabíjacej stanice od siete je stále zabezpečená možnosť dokončenia nabíjacieho cyklu. Minimálna úroveň nabitia bola zvolená z ohľadom na životnosť akumulátorov a taktiež s ohľadom na napájanie vlastnej spotreby systému.



Obr. 32 Výsledky simulácií pre scenár A



Obr. 33 Výsledky simulácie pre 4. deň, scenár A

Celkové energetické bilancie systému počas simulovaného obdobia sú dané v nasledujúcej tabuľke (Tab. VI). Ako je možné vidieť, celkové množstvo energie odobrané zo siete je 1333 kWh, z ktorých 1289 kWh (96,7 %) bolo odobraných počas nízkej tarify, čo z prevádzkového hľadiska predstavuje ekonomický benefit.

Tabuľka VI Energetická bilancia systému – scenár A

Název	Hodnota
Celková energia odobraná zo siete	1 333 kWh
Energia odobraná zo siete počas NT	1 289 kWh
Energia odobraná záťažou na AC strane	1 824 kWh
Energia odobraná záťažou na DC strane	1 915 kWh
Energetický potenciál PV systému	630 kWh
Energia dodaná do systému DC-DC meničom	590 kWh
Energia dodaná do akumulátora	1 698 kWh
Energia odobraná z akumulátora	1 687 kWh
Bilancia akumulovanej energie	11 kWh

B. Popis a posúdenie scenára B

Scenár B sa od predchádzajúceho scenára A líši iba v diagrame zaťaženia, ktorý rovnako pozostáva z 13 elektromobilov, ale distribúcia príchodov v čase sa líši – je rozložená rovnomerne počas celého dňa. Ostatné parametre ostali nezmenené, z dôvodu jednoduchého porovnania výsledkov. Výsledky simulácie pre scenár B sú znázornené na obrázku 34. Rozdielne rozloženie príchodov elektromobilov môže byť pozorované na obrázku 35. Ako je možné vidieť na základe výsledkov simulácie, úroveň nabitia neklesla na úroveň 20 %, a preto nabíjanie počas vysokej tarify nebolo zahájené. S toho vyplýva, že rozdielny diagram zaťaženia má priamy vplyv na pomer medzi celkovou energiou odobranou zo siete a energiou odobranou počas nízkej tarify. Rovnomernejšie rozloženie príchodu elektromobilov je z hľadiska SOC priaznivejšie. Výsledky simulácie potvrdzujú predpoklady ohľadom rovnomernej distribúcie príchodu elektromobilov, a to najmä predpoklad, že akumulátory majú v tomto prípade limitovaný príspevok k nabíjaniu elektromobilov, pretože veľká časť ich kapacity ostáva

nevyužitá. Výsledky energetických bilancií je možné vidieť v tabuľke VII.

Tabuľka VII Energetická bilancia systému – scenár B

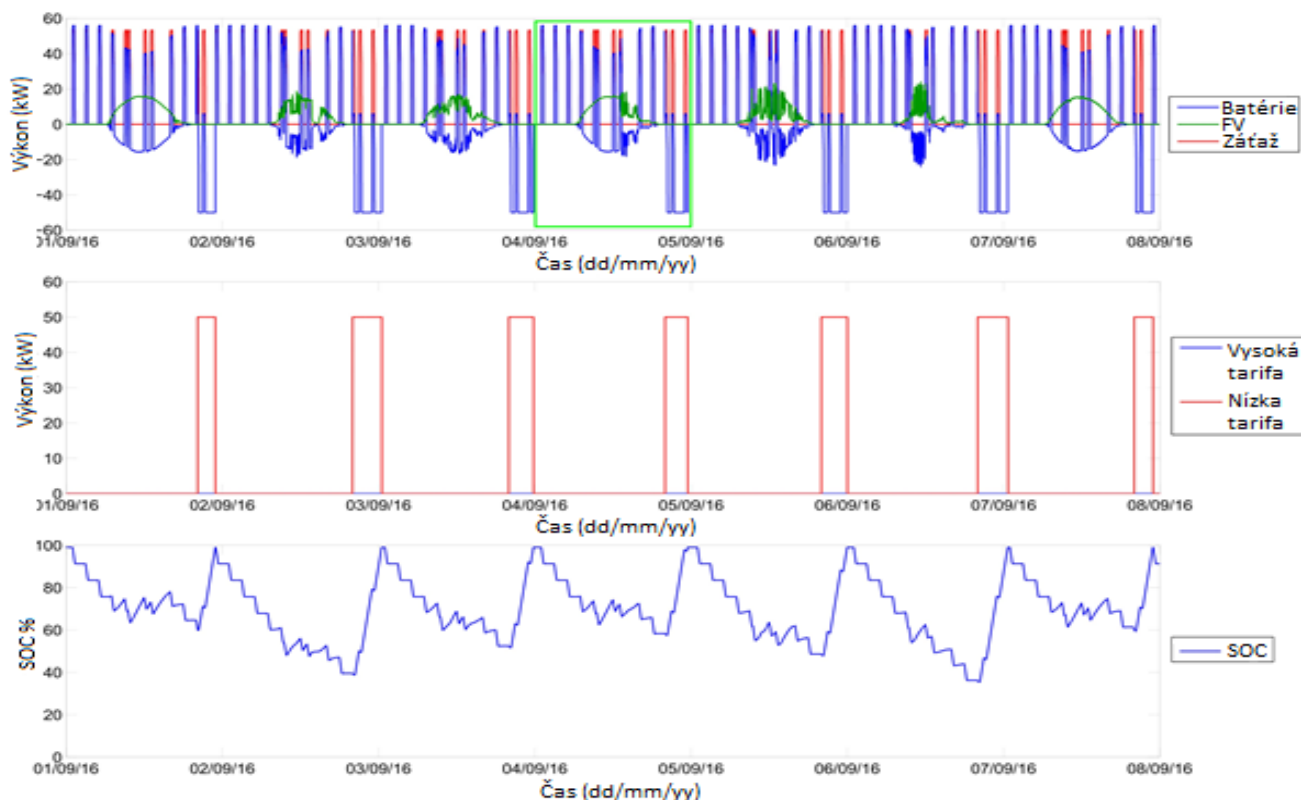
Název	Hodnota
Celková energia odobraná zo siete	1 303 kWh
Energia odobraná zo siete počas NT	1 303 kWh
Energia odobraná záťažou na AC strane	1 824 kWh
Energia odobraná záťažou na DC strane	1 915 kWh
Energetický potenciál PV systému	630 kWh
Energia dodaná do systému DC-DC meničom	600 kWh
Energia dodaná do akumulátora	1 408 kWh
Energia odobraná z akumulátora	1 420 kWh
Bilancia akumulovanej energie	-12 kWh

C. Zhodnotenie – výhody a nevýhody navrhnutého konceptu

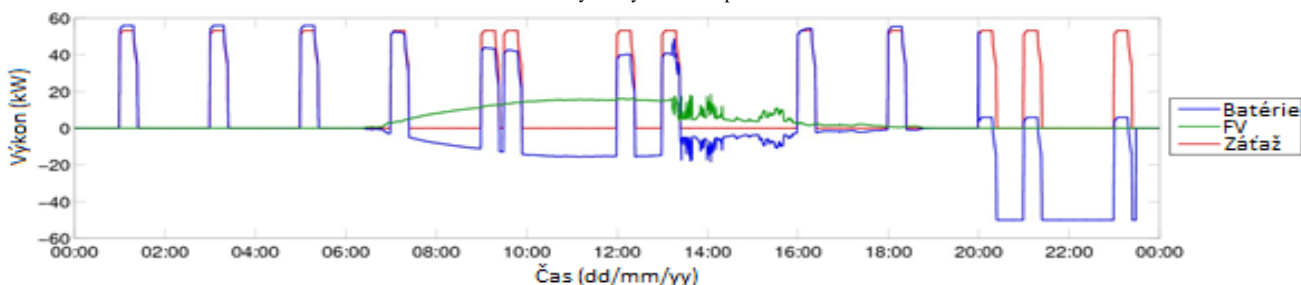
V súvislosti s integráciou nabíjacích staníc sa predpokladá zvýšený záujem o prostriedky vedúce k obmedzeniu spätného vplyvu na sieť. Prezentovaný koncept nabíjacej stanice môže v závislosti na konkrétnej lokalite znížiť negatívne spätné vplyvy na sieť (kolísanie napätia, nesymetria, veľkosť napätia). Optimálne navrhnutý akumuláčny systém (zaisťujúci minimálny odber zo siete počas vysokej tarify) stabilizuje odber zo siete s ohľadom na cyklovanie akumulácie, čo má kladný vplyv na stabilitu siete v konečnom dôsledku aj kladný vplyv na plánovanie rozvoja distribučných sietí.

Hlavným ekonomickým prínosom navrhnutého konceptu je zníženie prevádzkových nákladov vplyvom minimálneho odberu zo siete počas vysokej tarify (rozdiel medzi cenou elektriny počas nízkej a vysokej tarify), pričom ďalej znižuje potrebné množstvo energie odobrané zo siete (predovšetkým počas vysokej tarify) využitím výroby elektrickej energie z OZE priamo na mieste spotreby.

Hlavnou nevýhodou je cena celého systému, ktorú je možné na základe doterajších analýz predpokladať v rozmedzí 200 000 – 250 000 eur pre systém z jednou 50 kW rýchlo-nabíjacou stanicou, hybridným meničom, akumulátorom s kapacitou 250 kWh a fotovoltickým poľom s výkonom 20 kWp.



Obr. 34 Výsledky simulácií pre scenár B



Obr. 35 Výsledky simulácie pre 4. deň, scenár B

Ako je možné vidieť na základe výsledkov simulácií, vytvorený model je možné použiť na simulovanie rôznych scenárov s rôznymi parametrami a overiť tak zvolenú konfiguráciu celého systému v reálnych podmienkach.

VI. ZÁVER

Náplňou predkladaného príspevku je sumarizácia vykonaného výskumu využitia akumulčných zariadení v rôznych oblastiach a na rôznych úrovniach v elektrizačnej sústave v rámci dizertačnej práce. Práca sa zaoberá širokým spektrom aplikácií, kde je potenciál na uplatnenie akumulčných zariadení, od malých hybridných systémov v rodinných domoch až po nasadenie týchto zariadení na úrovni distribučných sietí. Boli navrhnuté rôzne inovatívne koncepcie využívania energetických úložísk. Pre overenie funkčnosti vytvorených konceptov a verifikáciu prínosov akumulčných zariadení, boli implementované matematické

modely týchto riešení v programe Matlab/Simulink. Pred ich využitím v následných simuláciách, boli niektoré modely verifikované pomocou meraní na reálnych zariadeniach. Najvýznamnejšie výsledky popisovanej práce sú zhrnuté v tomto príspevku.

Napriek tomu, že boli prínosy vykonaného výskumu do oblasti elektroenergetiky čiastočne spomínané priebežne v celej práci, ako aj predchádzajúcim zhodnotením, pre väčšiu prehľadnosť je možné ich zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Široko spracovaný prehľad najdôležitejších informácií v oblasti akumulácie elektrickej energie, okrem iného vrátane používaných technológií a ich využitia
- Analýza súčasného stavu doma a vo svete
- Vytvorenie modelov obnoviteľných zdrojov a akumulčných zariadení, vhodných pre vykonávanie rôznych simulácií v elektroenergetike

- Návrh a modelovanie hybridných systémov na báze obnoviteľných zdrojov (klasický hybridný systém, hybridný systém pre nabíjanie elektromobilov, hybridný systém s V2H)
- Verifikácia prínosu použitia energetických úložísk v distribučných sieťach pre zamedzenie spätného toku výkonu a napätových fluktuácií na základe navrhnutých stratégií riadenia
- Vyhodnotenie získaných výsledkov a odporúčanie ďalšieho výskumu

Vzhľadom na obmedzený rozsah prác, nebolo možné verifikovať viaceré funkcie úložísk v elektrizačnej sústave. Preto ďalšie smerovanie výskumu v tejto oblasti by mohlo pokrývať možnosti využitia akumuláčnych zariadení, ktoré neboli verifikované v rámci tejto práce. Zaujímavou možnosťou je napríklad využitie energetických úložísk na reguláciu frekvencie alebo na oddialenie investícií do prenosovej infraštruktúry spolu s ekonomickým vyhodnotením a porovnaním s inými bežne používanými prostriedkami.

V návaznosti na predstavené spôsoby riadenia a fakt, že ich činnosť bola overovaná iba v rámci simulácií, ponúka sa ako vhodný námet na ďalší výskum fyzická implementácia v novovznikajúcom laboratóriu inteligentných sietí na katedre elektroenergetiky FEI TUKE.

Ďalším rozšírením vykonaného výskumu je možnosť simulovať najmodernejšie typy úložísk, ako sú vanádiové redukčno - oxidačné batérie, vodíkové úložiská a podobne.

REFERENCIE

- [1] Eurostat statistic explained: Renewable energy statistics, [online], European commission, Január, 2018, [cit. 2018-5-9], Dostupné na internete: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics>.
- [2] Eurostat statistic explained: 2030 Energy strategy, [online], European commission, [cit. 2018-5-9], Dostupné na internete: <<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>>.
- [3] A. A. Akhil a kol., "DOE/EPRI 2013 Electricity storage handbook in collaboration with NRECA," [Online]. Sandia National Laboratories, California, 2013. [cit. 2015-11-10]. Dostupné na internete: <<http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2013-5131.pdf>>.
- [4] Sandia National Laboratories: DOE Global energy storage database, [online], Office of energy delivery & energy reliability, [cit. 2015-05-10], Dostupné na internete: <<http://www.energystorageexchange.org/>>.
- [5] L.Yao a kol., "Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems", in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, 519—528s., ISSN 2196-5420, Október, 2016,
- [6] A. Islam, M. Chowdhury, "A simulink based generalized model of PV cell / array," Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 3rd International Conference, 1-5s., 29-31 Máj, 2014.
- [7] S. Said, A. Massoud, M. Benammar, S. Ahmed, "A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox," Journal of Energy and Power Engineering, vol. 6, 1965-1975s., December, 2012.
- [8] H. Patel, V. Agarwal, "MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics," IEEE Transactions on Energy Conversion, 302-310s., 2008.
- [9] J. Wellmann, T. Morosuk, "Renewable Energy Supply and Demand for the City of El Gouna, Egypt," in Sustainability, vol.8, MDPI, Marec, 2016.
- [10] M. Vojtek, "Výskum využitia akumuláčnych zariadení v elektrizačnej sústave," Košice, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Dizertačná práca, 168s., 2018.
- [11] The MathWorks, Inc.: Battery – Implement generic battery model, [online], Dostupné na internete: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html?s_tid=doc_ta>
- [12] P. Mastny, - J. Moravek, - M. Vojtek, - J. Drapela, "Hybrid photovoltaic systems with accumulation - Support for electric vehicle charging," in Energies, vol. 10, no. 7, 1-24s. - ISSN 1996-1073 Dostupné na internete: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/834>>

QuoVadis Research @ FEI

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach Fakulta elektrotechniky a informatiky

Sídlo: Letná 9, 042 00 Košice

Elektronická adresa: <http://quovadis.fei.tuke.sk>

Periodicita: 2-krát ročne

Založenie časopisu: September 2018.

Jazyk: V časopise sú články v anglickom a slovenskom jazyku.

ISSN 2585-9587