

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

QuoVadis Research @ FEI



ročník 3, číslo 1
Februar 2020

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

Nepriama Optimalizácia Nastavenia Valcovacích Medzier Profilovej Valcovacej Trate	
<i>Tomáš Borovský, František Ďurovský</i>	4-12
Natural User Interfaces of Computer Systems and Their Evaluation	
<i>Lukáš Galko, Jaroslav Porubán</i>	12-19
Výskum vplyvu inteligentných sietí na distribučnú sústavu	
<i>Michal Ivančák, Juraj Kurimský</i>	19-28
Hierarchical Text Classification with Convolutional Neural Networks	
<i>Milan Krendzelak, František Jakab</i>	28-35
Analýza vlastností experimentálneho hybridného FSO/RF systému	
<i>Michal Márton, Ľuboš Ovseník</i>	35-41
Cognitive Healthcare Platform – Case Study based on Quality-Enabled Decentralized IoT Architecture	
<i>Jozef Mocnej, Iveta Zolotová</i>	41-48
Modelovanie synchronizačných problémov kompozície komponentov pomocou Petriho sietí a lineárnej logiky	
<i>Ján Perháč, Valerie Novitzká</i>	48-55
Porovnanie impulzového a M-sekvenčného UWB radaru pre odhad hrúbky steny	
<i>Miroslav Repko, Ján Gamec</i>	55-61
Integrovaný UWB radar emitujúci M-postupnosť na báze ASIC obvodov	
<i>Stanislav Slovák, Pavol Galajda</i>	61-68
Vývoj pohonu so spínaným reluktančným motorom	
<i>Ľuboš Suchý, Želmíra Ferková</i>	68-80
Riadenie šmyku robotickej platformy s využitím kamerových systémov	
<i>Róbert Üveges, František Ďurovský</i>	80-90
Hybridné modely kyber-fyzikálnych systémov a ich aplikácia v rámci distribuovaného systému riadenia	
<i>Dominik Vošček, Anna Jadlovská</i>	90-104

Nepriama Optimalizácia Nastavenia Valcovacích Medzier Profilovej Valcovacej Trate

Tomáš Borovský
Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
tomas.borovsky@student.tuke.sk

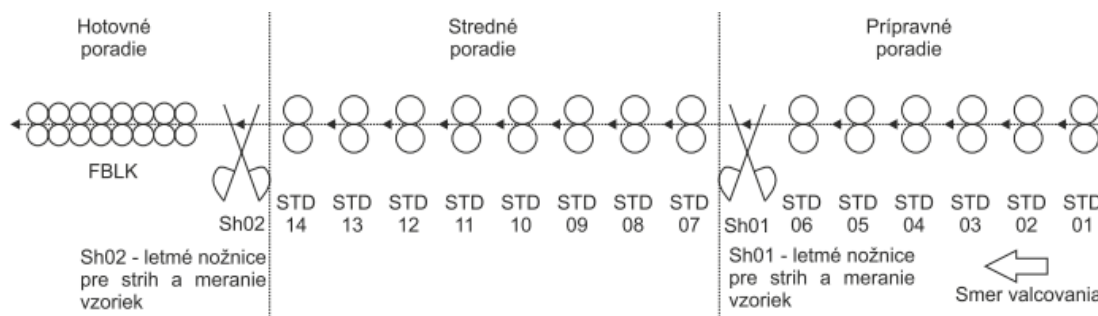
František Ďurovský
Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
Frantisek.durovsky@tuke.sk

Abstract—Pri valcovaní profilov, tyčí a drôtu sa ako vstupný materiál používa sochor, zvyčajne so štvorcovým priečnym prierezom. Ten sa postupne znižuje ako vývalok postupuje jednotlivými stolicami, ktoré sú opatrené kalibrovanými valcami. Rýchlosti jednotlivých stolic sú automaticky regulované tak, aby boli dosiahnuté žiadané ťahové pomery medzi stolicami, keďže rozmery priečného prierezu vystupujúceho vývalku sú dané ako nastavením valcovacej medzery, tak aj ťahom medzi stolicami. Nastavenie valcovacích medzier je však zvyčajne manuálne. Keďže nie je prítomné priame meranie rýchlosti, alebo priečného prierezu vývalku za jednotlivými stolicami, nastavenie valcovacej medzery či už z dôvodu kompenzovania opotrebenia valcov, alebo prvotného nastavenia po zmene sortimentu alebo výmene valcov závisí od skúsenosti obsluhy. V tejto práci je opísaný valcovací proces valcovne tyčí a drôtu spoločnosti Slovakia Steel Mills, a.s. Strážske a je navrhnutý systém automatického vyhodnotenia opotrebenia valcov a riadenia nastavenia valcovacích medzier pomocou genetických algoritmov. Navrhovaný systém riadenia valcovacej medzery je bez senzorový, založený na nepriamom odvodení zmien v priečnom priereze vývalku za jednotlivými stolicami od meraných valcovacích parametrov. Matematický popis valcovania a simulačný model je založený na meraniach získaných počas valcovacích kampaní Roxor 12mm. Niektoré časti navrhovaného modelu boli implementované do riadiaceho softvéru spoločnosti SMS group, S.p.A. a otestované v prevádzke.

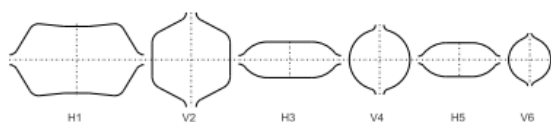
Keywords—valcovanie profilov, riadenie pohonov, genetické algoritmy, regulácia ťahu, optimalizácia valcovacieho procesu

Abstract— In section rolling the billets with square cross section are used as a charge for rolling mill. Cross section area is progressively reduced as the workpiece passes the stands, which are equipped by calibrated rolls. The speeds of individual stands are automatically controlled in order to achieve demanded interstand conditions, as the dimensions of outgoing workpiece depend on the roll gap set-up and interstand tension as well. The cross sectional area of outgoing workpiece depends on rolls gap set-up and as well as on the tension between given and successive stand. Roll gap set-up in profile rolling is usually done manually. Since there is no direct rolling speed measuring or cross sectional area measuring after the stands, roll gap adjustments due to the compensation of groove wear or initial roll gap set-up after roll or product change depend on skills and experiences of operators. This paper describes in details the rolling process of wire rod mill Slovakia Steel Mills, a.s. Strážske and proposes the system of automatic evaluation of roll wear and roll gap control using genetic algorithms. The proposed system of roll gap control is sensor-less, based on indirect estimation of changes in cross sectional area of individual stands from measured rolling parameters. Mathematical model and simulation of rolling process are based on data recorded from rolling campaign Rebar 12mm. Some parts of proposed model have been implemented into the control software of company SMS Group S.p.A. and were tested in the production.

Keywords—wire rod rolling, drives control, genetic algorithm, tension control, rolling process optimization



Obr. 1 Topológia valcovacej linky spoločnosti Slovakia Steel Mills a.s., Strážske. Prípravné poradie pozostáva zo šiestich stolic, za ktorými nasledujú nožnice a následne 8 stolic stredného poradie. Za stredným poradím nasledujú opäť nožnice a hotovný blok.



Obr. 2 Kalibračná sada prvých šiestich stolíc prípravného poradia, pričom valce sú uložené v striedavom, horizontálnom (H) a vertikálnom (V) usporiadaní. Slovakia Steel Mills a.s., Strážske.

I. ÚVOD

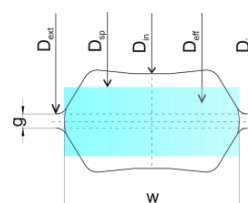
Valcovacím procesom sa dosahuje objemové tvárnenie materiálu. Literatúra zvyčajne popisuje valcovanie pásov s hladkými valcami. Táto práca sa zaoberá valcovaním profilových materiálov, pričom vychádza z parametrov valcovne spoločnosti Slovakia Steel Mills a.s. Strážske, na ktorej sa produkuje valcovaný drôt, tyče a roxory. Pri valcovaní profilov na kontinuálnej valcovni je ako vstupný materiál použitý sochor, zvyčajne so štvorcovým prierečným rezom. Plocha jeho priečneho prierezu sa postupne znižuje ako vývalok prechádza jednotlivými stolicami [1-5]. Vývalok je valcovaný kalibrovacími valcami a tak jeho výška je daná nastavením valcovacej medzery a šírka je daná nastavením valcovacej medzery, veľkosťou priečneho prierezu vstupujúceho vývalku ako aj veľkosťou ťahu medzi stolicami [5,18,19,23]. Ako sa valce postupne opotrebovávajú, mení sa aj rozmer priečneho prierezu vývalku za danou stolicou. Moderné linky určené pre špeciálne produkty sú vybavené snímačmi priečneho prierezu za jednotlivými stolicami a nastavenie valcovacej medzery je tak plne kontrolované riadiacim systémom [10,20]. Väčšina valcovní však nedisponuje meraním priečneho prierezu za každou stolicou a automatická regulácia sa tak obmedzuje iba na riadenie rýchlostí, resp. ťahu medzi stolicami [15, 21]. Nastavenie valcovacích medzier tak ostáva v rukách obsluhy. Z toho vyplýva, že priečný prierez vývalku je tak riadený ako automatickou reguláciou (šírka), tak aj manuálnym nastavením (výška aj šírka vývalku).

Cieľom tejto práce je navrhnúť automatický systém riadenia rozmerov vývalku bez nutnosti inštalácie dodatočných senzorov. Optimalizovaním nastavenia valcovacej medzery a úpravou riadenia sa má dosiahnuť zníženie spotreby energie, nepodarkovosti ako aj opotrebenia valcov [9].

Na valcovni profilov zvyčajne nie sú inštalované snímače ťahu medzi stolicami, ani snímače valcovacej sily. Procesné parametre sú odvodené od rýchlosti stolíc a momentu motorov. Ťah medzi stolicami je regulovaný zmenou rýchlosti stolíc a to na základe zmien v momente motora, alebo riadením voľnej



Obr. 4 Vplyv zmeny predbiehania materiálu na výslednú dĺžku letného strihu za na chladiacom rošte. Sidenor Basauri, Španielsko.



Obr. 3 Geometria kalibra stolice prípravného poradia, kde g je valcovacia medzera, w je šírka vývalku, D_{ext} je vonkajší priemer valca, D_{op} stredný pracovný priemer, D_{in} je vnútorný priemer, D_{eff} je efektívny priemer a D_i je ideálny priemer valca. Pre výpočet valcovacej rýchlosti je zvyčajne použitý D_{eff} . Slovakia Steel Mills a.s., Strážske.

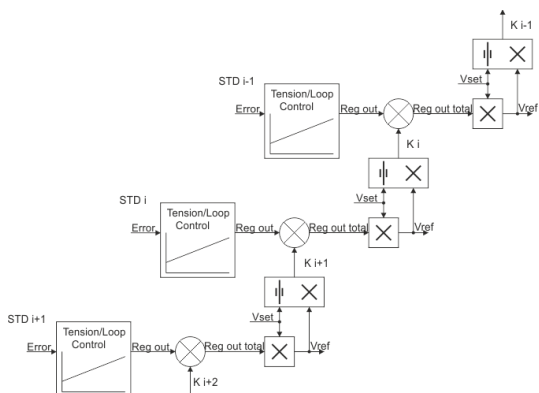
slučky medzi stolicami [6,15,18]. Pri aktívnej regulácii ťahu sa bude meniť rýchlosť stolíc tak, aby boli zachované stabilné ťahové pomery, t.j. minimálny ťah medzi stolicami. Tieto úpravy rýchlostí vyúsťia do zmien v pomeroch rýchlostí po sebe nasledujúcich stolíc pri zmene v ťahu medzi týmito stolicami. Ak dôjde k zmene plochy priečneho prierezu na výstupe niektorej zo stolíc, regulátor ťahu upraví jej rýchlosť a dôjde k zmene pomeru rýchlostí medzi danou a nasledujúcou stolicou [1,8,18]. Práve tento efekt môže byť použitý pre riadenie nastavenia valcovacích medzier, kompenzovanie opotrebenia drážok a optimalizovanie nastavenia valcovacej trate.

II. TECHNOLÓGIA VALCOVANIA PROFILOVÝCH MATERIÁLOV

Pri valcovaní profilových materiálov sa používajú kalibrovacie valce. Stolice (STD) sú zvyčajne uložené v striedavom, horizontálnom a vertikálnom usporiadaní [1-5]. Prvá skupina stolíc vytvára prípravné poradie, za ktorým nasledujú nožnice pre odstrih koncov a šrotovanie nepodarkov. Ďalej nasleduje stredné a hotovné poradie, pričom hotovné poradie môže byť tvorené tzv. hotovným blokom, čo je vlastne kompaktné poradie stolíc uložených blízko seba [7,10]. Typická topológia valcovne je znázornená na **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** Typický kalibračný predpis pre prípravné poradie je znázornený na Obr. 2. Keďže väčšina moderných valcovní používa kontinuálnu valcovaciu linku, vývalok sa pri valcovaní nachádza vo viacerých stolicach naraz. Pre dosiahnutie žiadaných valcovacích parametrov je preto nutné riadiť rýchlosť jednotlivých stolíc tak, aby boli dosiahnuté požadované ťahové pomery [4]. Valcovne však zvyčajne nie sú vybavené priamym meraním rýchlosti valcovania a valcovacia rýchlosť je tak odvodená od rýchlosti motorov jednotlivých stolíc a od priemeru valca. Keďže sa používajú kalibrovacie valce, výpočet rýchlosti je o to zložitejší. Na Obr. 3 je znázornený kaliber stolice prípravného poradia STD02. Valcovacia rýchlosť v je tak určená vzťahom

$$v = \frac{\pi D_{eff} f n}{j 60}, \quad (1)$$

kde D_{eff} je efektívny priemer valca, n sú otáčky motora a j je prevodový pomer prevodovky danej stolice [12,15]. Keďže sa pri výpočte D_{eff} zohľadňuje predbiehание materiálu, ten môže nadobúdať aj rozmer ktorý je väčší ako vonkajší priemer valca D_{ext} . D_{eff} je zvyčajne daný kalibračným predpisom a pre daný produkt sa bude meniť len so zmenou D_{ext} , avšak podľa [17] by sa malo zohľadňovať aj opotrebenie samotnej drážky.



Obr. 5 Principiálna schéma riadenia rýchlostí troch po sebe nasledujúcich stolic, kde v_{ref} je referenčná rýchlosti stolic.

Pre niektoré technologické aplikácie, kedy je nutné presné určenie rýchlosti materiálu (letmý strih, navíjačky) a nie je možné spoľahnúť sa na výpočet podľa (1), je možné použiť priame meranie vývalku a to buď pomocou podávacieho valca, alebo pomocou optických meracích prístrojov [13]. Na Obr. 4 je znázornený príklad vplyvu meniaceho sa predbiehania materiálu na reálnu dĺžku letného strihu za valcovňou. V tomto prípade je letmý strih vykonávaný iba na základe otáčok valcov poslednej stolice. Ako je vidieť na danom obrázku, reálna dĺžka strihu guľatiny sa postupne zväčšuje, čo je spôsobené efektom zmeny v predbiehaní materiálu vplyvom zmien teploty sochora počas valcovania (postupné chladnutie) [1].

III. REGULÁCIA VALCOVACEJ RÝCHLOSTI

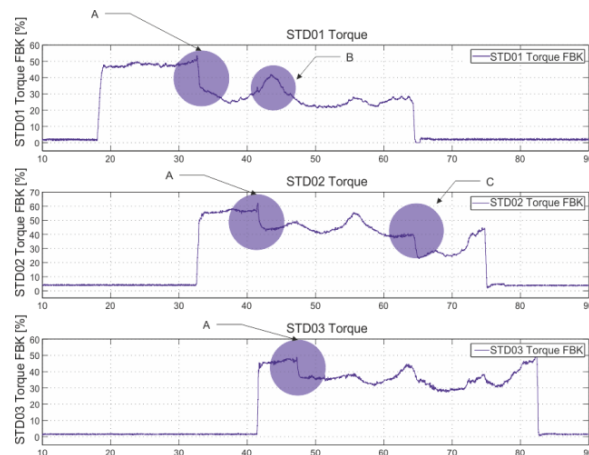
Riadenie rýchlostí jednotlivých stolic je buď automatické, alebo manuálne. Cieľom regulácie rýchlosti je dosiahnutie požadovaných ťahových pomerov medzi jednotlivými stolicami. Zvyčajne sa udržiava mierny ťah, čo zabezpečí minimálnu deformáciu šírky vývalku, menšie opotrebenie valcov a zníženie rizika nepodarku v dôsledku vytvorenia slučky (nekontrolovanej) medzi stolicami [24].

Pri manuálnom riadení rýchlosti, obsluha sleduje zaťaženie motorov jednotlivých stolic počas zavádzania vývalku do jednotlivých stolic a podľa zmien v momente motora upravuje rýchlosť tak, aby boli tieto zmeny momentu minimálne, resp. aby bol pozorovateľný pokles momentu danej stolice po zavedení vývalku do nasledujúcej stolice [6].

Pri automatickom riadení rýchlosti sa zvyčajne používa tzv. kaskádna schéma, ako je to znázornené na Obr. 5 [15,20]. Automatické riadenie rýchlosti môže byť:

A. Riadenie minimálneho ťahu(LTC)

Tento typ riadenia je zvyčajne použitý pre prípravné poradie, alebo pri valcovaní profilových materiálov, kde nie je možné sformovať a riadiť slučku medzi stolicami. Je založené na metóde porovnávania momentu, resp. prúdu motora danej stolice v časových intervaloch pred a po zavedení vývalku do nasledujúcej stolice [11,20,25].



Obr. 6 Moment motorov prvých troch stolic počas zavedenia vývalku do ich valcovacej medzery. A – pokles momentu STD01 z dôvodu ťahu medzi STD01-STD02. B – nárast momentu z dôvodu zmeny teploty vývalku. C – pokles momentu z dôvodu uvoľnenia ťahu medzi STD01-STD02.

B. Riadenie slučky (LC)

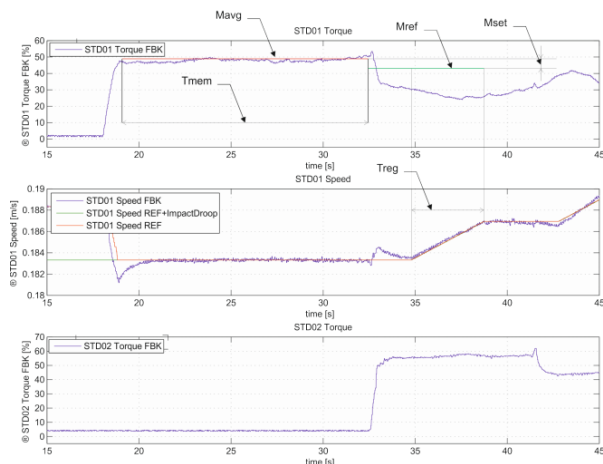
Ak je možné sformovať slučku medzi stolicami, t.j. vývalok nie je príliš hrubý a medzi stolicami sa nachádza formovač slučky, na základe merania výšky slučky (pomocou infračerveného detektora tzv. Loop Scanner) sa môže regulovať výška tejto slučky rýchlosťou danej stolice tak, aby bol dosiahnutý stav s minimálnym ťahom medzi týmito stolicami. Tento typ riadenia je typický pre stredné a hotovné poradie [15,22].

Pre hotovné bloky ktorých stolicie sú poháňané jediným motorom, nie je možné riadiť rýchlosti jednotlivých stolic zvlášť. Pomer ich rýchlostí je fixný a veľkosť ťahu medzi týmito stolicami je daná kalibračným predpisom [7,10]. Pre hotovné bloky, kde sú jednotlivé stolicie poháňané vlastným pohonom, regulácia rýchlosti je vykonávaná aj tak manuálne, keďže riadenie minimálneho ťahu nie je možné z dôvodu príliš malých vzdialeností medzi stolicami a vysokých valcovacích rýchlostí [10].

IV. IDENTIFIKÁCIA A REGULÁCIA ŤAHU MEDZI STOLICAMI

Keďže na valcovniach zvyčajne nie sú inštalované senzory zaťaženia stolic, resp. priame meranie ťahu medzi stolicami, ten sa určuje nepriamo a to na základe momentu motorov resp. vytvorením voľnej slučky [17,24,25]. Moment ktorý pôsobí na hriadeľ motora danej stolice M_m je však zložený z nasledujúcich zložiek [2,3,16]:

- M_t – moment trecích strát naprázdno
- M_d – dynamický moment
- M_{cap} – moment od trenia v čapoch valcov
- M_{val} – valcovací moment
- M_{tah} – moment od ťahu



Obr. 7 Princíp riadenia LTC, STD01-STD02, Slovakia Steel Mills a.s., Strážske. T_{mem} je interval zapamätania si tzv. referenčného momentu, T_{reg} je interval kedy je regulácia ťahu aktívna. M_{ref} je zapamätaný referenčný moment a M_{set} je referenčný moment.

Keďže moment motora obsahuje počas valcovania všetky zložky súčasne a nie je k dispozícii žiadne ďalšie meranie, ktoré jednotlivé zložky spoľahlivo identifikuje, zvyčajne je pre riadenie procesu a pre operátorov valcovne k dispozícii iba celková hodnota momentu, alebo prúdu motora, ktorá je pri určitom zjednodušení úmerná valcovaciemu momentu [2,3]. Keďže určenie jednotlivých zložiek momentu motora osobitne vyžaduje znalosť mnohých valcovacích parametrov ktoré zvyčajne nie sú k dispozícii, zoskupenie týchto zložiek do dvoch skupín sa zdá byť vhodnou metódou, ktorá prinesie oddelenie faktorov súvisiacich s valcovacím procesom od faktorov, ktoré so samotným valcovacím procesom nesúvisia [14].

Celkový moment pôsobiaci na motor počas valcovania M_m je daný [16]

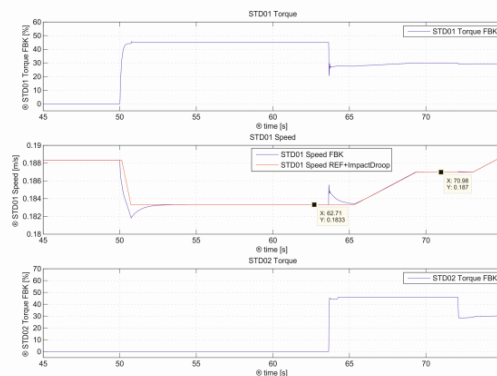
$$M_m = M_t + M_d + M_{tah} + M_{cap} + M_v. \quad (2)$$

Moment ktorý pôsobí na motor a nesúvisí s valcovacím procesom je súčtom M_t a M_d a je možné ho vypočítať a následne vylúčiť pri riadení procesu. Moment súvisiaci s valcovacím procesom M_{vp} je teda daný

$$M_{vp} = M_m - M_d - M_t, \quad (3)$$

kde M_m je moment pôsobiaci na hriadeľ motora, $M_t = f(v)$ a $M_d = f(\frac{dv}{dt})$ [12]. Takto upravený moment môže byť ďalej použitý pre presnú identifikáciu zaťaženia jednotlivých stolic a na určenie zmien v ťahu medzi týmito stolicami, pričom detaily takto navrhovaného výpočtu zložiek momentu sú popísané v [14].

Samotná identifikácia ťahového momentu na danej stolici ako pri LTC, tak aj pri LC, vychádza z porovnania momentu motora pred a po zavedení vývalku do nasledujúcej stolice. Na základe zmeny v momente motora danej stolice sa dá nepriamo určiť ťah medzi danou a nasledujúcou stolicou, ako je to znázornené na Obr. 6, časť A [22,25].



Obr. 8 Simulácia riadenia LTC, STD01-STD02, Matlab Simulink.

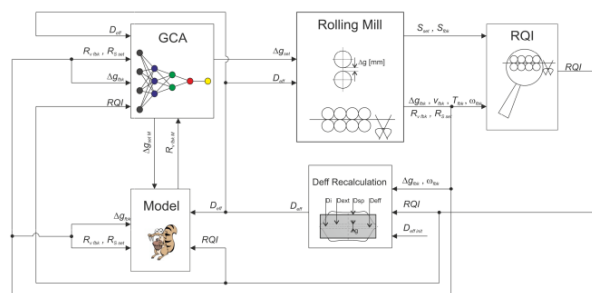
Riadenie ťahu sa vykonáva zmenami rýchlosti jednotlivých stolic, čím sa mení pomer rýchlostí medzi po sebe nasledujúcimi stolicami R_{vi} . Na Obr. 5 je znázornená principiálna regulačná štruktúra pre riadenie rýchlostí troch po sebe nasledujúcich stolic, pričom rýchlosť danej stolice je regulovaná ako vlastným regulátorom ťahu (LTC alebo LC), tak aj kaskádnym komponentom (K_i), ktorý je vlastne tzv. feed-forward riadením pre udržanie stabilných rýchlostných pomerov stolic v prípade zmien rýchlostí na iných stolicach [15,20]. Na kontinuálnej valcovacej linke je stabilný pomer rýchlosti R_v základným predpokladom pre dosiahnutie požadovanej kvality valcovacích parametrov a je daný tzv. rovnicou continuity

$$R_{vi} = \frac{v_{i+1}}{v_i} = R_{Si} = \frac{S_i}{S_{i+1}}, \quad (4)$$

kde v_i je rýchlosť vývalku i -tej stolice a S_i je plocha prierečného prierezu vývalku za i -tou stolicou [1-5]. Z uvedeného vyplýva, že valcovacia rýchlosť je závislá od rozmerov prierečného prierezu vstupujúceho a vystupujúceho vývalku. Keďže na valcovni zvyčajne nie sú automaticky merané rozmery vývalku za jednotlivými stolicami, kompenzovanie opotrebenia drážky ako aj prvotné nastavenie valcovacích medzier sa vykonáva ručne a jeho kvalita závisí od skúseností operátorov danej valcovne. Keďže však existuje závislosť medzi rýchlosťou valcovania a veľkosťou prierečného prierezu, zmeny v prierečnom priereze sa za predpokladu stabilných ťahových pomerov budú premietat do zmien v rýchlosti podľa vzťahu $R_{vi} = R_{Si}$.

V. SIMULAČNÝ MODEL STOLÍC PRÍPRAVNÉHO PORADIA

Podľa parametrov valcovacej linky Slovakia Steel Mills a.s., bol zostavený model prvých troch stolic prípravného poradia. Taktiež bol navrhnutý lineárny model vývalku simulujúci statickú zložku momentu (ideálny valcovací moment bez ťahu, obsahuje zložku M_{cap} a M_v) a dynamickú zložku (M_{tah} , pričom sa uvažuje iba predný ťah) ktorá sa bude meniť so zmenou R_{vi} . Počas valcovania boli pomocou systému IBA [26] merané procesné veličiny a bola určená závislosť medzi R_{vi} a M_t pre stolice STD01 a STD02. Aproximovaním tejto závislosti bol získaný lineárny model vývalku medzi



Obr. 9 Bloková schéma navrhnutého systému riadenia valcovacích medzier IRGC.

STD01 a STD02. Porovnanie simulácie a reálneho valcovacieho procesu na prípravnom poradí s aktivovaným LTC riadením pre STD01 a STD02 je znázornené na Obr. 7 a Obr. 8.

Porovnaním simulačných a meraných veličín sa overil matematický popis a princíp identifikácie ťahu medzi stolicami.

VI. NEPRIAMA OPTIMALIZÁCIA NASTAVENIA VALCOVACÍCH MEDZIER

Ako bolo uvedené v úvodnej kapitole, dnešné valcovne väčšinou nedisponujú meraním priečného prierezu vývalku za jednotlivými stolicami a samotné nastavenie, vyhodnotenie nastavenia valcovacích medzier a teda aj priečných prierezov vývalku je výhradne v rukách operátorov. Toto meranie a nastavenie sa môže vykonávať mimo valcovacieho procesu, alebo priamo počas valcovania, manuálnym meraním valcovacej medzery. Takto sa však nemôže odmerať tvar a presná plocha kalibra, taktiež sa nezohľadní tzv. skok valcov ak je meranie vykonané mimo valcovania [2-4]. To je možné iba priamym meraním vývalku, čo sa na niektorých valcovniach robí priložením dosky na vývalok a následným vypálením dosky počas valcovania. Z vypálenej diery sa tak môžu nepriamo určiť rozmery vývalku. Presnosť a bezpečnosť tejto metódy je však otázna. Všetky tieto metódy nastavenia valcovacích medzier priamo závisia od schopností obsluhy a neexistujúca, resp. nekvalitná evidencia neumožňuje ich objektívne vyhodnotenie. Ak sú na valcovni splnené určité predpoklady, zavedením merania a vyhodnotenia pomerov rýchlostí stolíc R_v je možné aplikovať nepriame vyhodnotenie nastavenia valcovacích medzier a zavedením vhodného riadenia by bolo navyše možné automaticky korigovať valcovacie medzery tak, aby bolo kompenzované opotrebenie drážok valcov. Navrhovaná metóda navyše nemusí vyžadovať inštaláciu ďalších zariadení, alebo snímačov.

Pre navrhovaný systém riadenia valcovacích medzier je nevyhnutné, aby boli udržiavané stabilné ťahové pomery ako pri LTC, tak aj pri LC riadení. Na sledovanej valcovni však bolo zistené, že v prípade LC riadenia sa aj napriek sformovaniu slučky môže vyskytovať ťah medzi stolicami. Preto je nutné zaviesť automatické monitorovanie a vyhodnotenie ťahových pomerov a stability ich riadenia.

VII. SYSTÉM NEPRIAMEHO RIADENIA VALCOVACÍCH MEDZIER

Navrhovaný systém riadenia valcovacích medzier IRGC (Indirect Roll Gap Control) pozostáva z niekoľkých modulov a výmeny dát medzi týmito modulmi. Vďaka modulárnosti bude možné upravovať jednotlivé moduly zvlášť, resp. podľa potreby použiť iba niektoré moduly. Na Obr. 9 je znázornená bloková schéma jednotlivých modulov a výmeny dát medzi nimi:

A. Rolling mill modul

Modul ktorý reprezentuje existujúci riadiaci systém pre kontrolu valcovacieho procesu, ktorý je doplnený o určité vylepšenia a rozhranie pre výmenu dát s ďalšími modulmi. Je zdrojom dát pre ostatné moduly a zabezpečuje tiež automatickú reguláciu valcovacej medzery, ak je dostupná. Vstupnými valcovacími parametrami sú:

- D_{eff} – aktuálny efektívny priemer valcov danej stolice
- Δg_{set} – žiadaná zmena valcovacej medzery

Výstupné parametre sú:

- v_{set} – lineárna valcovacia rýchlosť
- T_{fbk} – moment motora
- S_{set} – žiadaný priečný prierez
- S_{fbk} – skutočný priečný prierez
- R_{vfbk} – pomer aktuálnych rýchlostí medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- R_{Sset} – žiadaný pomer priečných prierezov medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- Δg_{fbk} – aktuálna zmena valcovacej medzery
- g_{init} – počiatočné nastavenie valcovacej medzery
- g_{fbk} – aktuálne nastavenie valcovacej medzery

Vzhľadom k tomu, že pre výpočet ťahových pomerov je moment motora jedným z kľúčových parametrov a jeho vyhodnotenie je pre určité situácie pomerne náročné (najmä na strednom poradí, kde je valcovacia rýchlosť pomerne vysoká a regulácia ťahu výrazne mení rýchlosti jednotlivých stolíc), je nutné aby bola zabezpečená vysoká presnosť a kvalita meraného momentu. Tak, ako to bolo uvedené v časti VI., celkový moment motora pôsobiaci na hriadeľ motora pozostáva z mnohých zložiek a je daný (2). Pre vyhodnotenie ťahových pomerov je však kľúčový moment od valcovacieho procesu M_{vp} . Preto je výhodné implementovať výpočet M_{vp} podľa (3) práve do softvéru pre riadenie procesu, ako to popisuje [14].

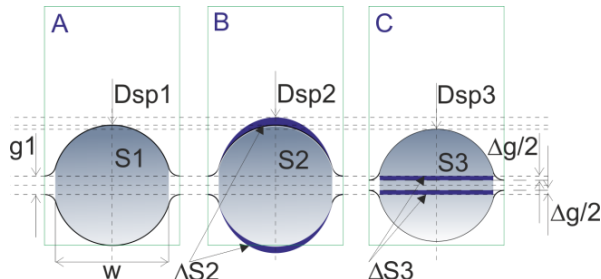
B. RQI

Tento modul má za úlohu zbieranie a vyhodnotenie dát a následné vytvorenie tzv. identifikátora kvality valcovacieho procesu, ktorý sa použije ako vstupný parameter pre ďalšie moduly. Jedná sa vlastne o expertný systém, ktorého úlohou je určiť, či sú namerané dáta relevantné, alebo nie. Vstupnými parametrami sú:

- R_{vfbk} – pomer aktuálnych rýchlostí medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- R_{Sset} – žiadaný pomer priečných prierezov medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- Δg_{fbk} – aktuálna zmena valcovacej medzery
- T_{fbks} – moment od valcovacieho procesu

- S_{set} – žiadaný priečný prierez
- S_{fbk} – skutočný priečný prierez

Výstupným parametrom je:



Obr. 10 Opatrenie drážky valca vybranej stolicce a následná korekcia úpravou valcovacej medzery. D_{sp} je stredný pracovný priemer, S je plocha priečného prierezu vývalku, g je valcovacia medzera, w je teoretická šírka vývalku a Δg je zmena valcovacej medzery oproti počiatočnému stavu. ΔS je zmena v ploche priečného prierezu.

- RQI – štruktúra Boolean signálov pre každú stolicu zvlášť.

C. Deff Recalculation

Tento modul slúži na on-line prepočet efektívneho priemeru valcov jednotlivých stolic D_{eff} v závislosti od zmeny v nastavení valcovacej medzery [17]. Pre správne určenie rýchlosti a následného vyhodnotenia procesných parametrov ostatnými modulmi, prepočítanie D_{eff} sa navrhuje vykonať po každej úprave valcovacej medzery podľa

$$D_{eff} = D_{eff\,init} - \Delta g_t, \tag{5}$$

kde $D_{eff\,init}$ je vlastne počiatočný D_{eff} , Δg_t je celková úprava valcovacej medzery daná $\Delta g_t = g_{init} - g_{fbk}$, kde g_{init} je počiatočné nastavenie valcovacej medzery a g_{fbk} je aktuálne nastavenie valcovacej medzery. Vstupnými parametrami sú:

- RQI – identifikátor kvality valcovacieho procesu
- g_{fbk} – aktuálne nastavenie valcovacej medzery
- g_{init} – počiatočné nastavenie valcovacej medzery
- $D_{set\,eff\,init}$ – počiatočný efektívny prierez valca

Výstupným parametrom je:

- D_{eff} – prepočítaný efektívny prierez valca.

D. Gap Correction Algorithm (GCA)

Tento modul vypočíta potrebnú korekciu valcovacej medzery, aby sa kompenzovalo opotrebenie drážky valca danej stolicce. Keďže sa jedná o nepriame odvodenie potrebnej korekcie na základe zmien v R_v jednotlivých stolic, na tento účel bol vybraný genetický algoritmus. Taktiež sa predpokladá že bude existovať mnoho fitness funkcií (podľa typu valcovaneho produktu), je fitness funkcia navrhnutá samostatne, mimo GCA. Vstupnými parametrami sú:

- RQI – identifikátor kvality valcovacieho procesu
- D_{eff} – prepočítaný efektívny priemer valcov stolicce
- R_{vfbk} – pomer aktuálnych rýchlostí medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- Δg_{fbk} – aktuálna zmena valcovacej medzery

Výstupným parametrom je:

- Δg_{setM} – žiadaná zmena nastavenia valcovacej medzery pre model

E. Model

Model vývalku slúži ako fitness funkcia pre genetický algoritmus a popisuje teda závislosť R_v od navrhovanej úpravy valcovacej medzery Δg . Z dôvodu chýbajúcich dát so spätnou väzbou nastavenia valcovacej medzery sa pre potreby tejto práce zaviedol lineárny model. Navrhovaná koncepcia modulárneho systému však umožní v prípade nutnosti použitia zložitých, nelineárnych modelov ich jednoduchú výmenu bez nutnosti úprav ostatných modulov. Vstupnými parametrami sú:

- RQI – identifikátor kvality valcovacieho procesu
- D_{eff} – prepočítaný efektívny priemer valcov stolicce
- R_{vfbk} – pomer aktuálnych rýchlostí medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- R_{Sset} – žiadaný pomer priečných prierezov medzi po sebe nasledujúcimi stolicami
- g_{fbk} – aktuálne nastavenie valcovacej medzery
- Δg_{setM} – žiadaná zmena nastavenia valcovacej medzery pre model

Výstupným parametrom je:

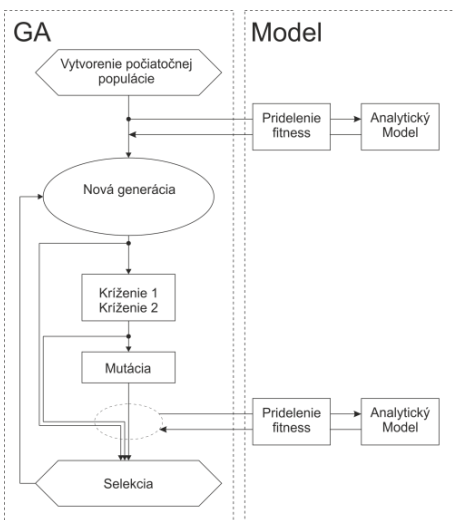
- P_{vfbkM} – pomer aktuálnych rýchlostí medzi po sebe nasledujúcimi stolicami z modelu

Pre potreby testovania bol navrhnutý analytický model postupného výpočtu R_{vi} od zmeny valcovacej medzery Δg_i , v smere proti toku materiálu tak, a jeho parametre sú uvedené v Tab. 1, kde R_{vref} sú referenčné pomery rýchlostí získané meraniami po nastavení trate podľa kalibračného predpisu, R_{vact} sú aktuálne pomery rýchlostí, kde došlo k zmenám oproti R_{vref} z dôvodu opotrebenia drážok. Pre tento prípad sa uvažuje so známou hodnotu priečného prierezu sa poslednou stolicou, teda S_6 , ktorá sa udržiava na stabilnej hodnote podľa kalibračného predpisu. Na základe zmien R_{vact} sa vypočíta odhadovaná aktuálna plocha priečných prierezov S_{act} a zmena voči referenčnej ploche ΔS , pričom w je teoretická šírka vývalku podľa kalibračného predpisu. Na Obr. 10 je znázornená geometria drážky vybranej stolicce:

- A – počiatočné nastavenie podľa kalibračného predpisu. Ako šírka vývalku w sa uvažuje teoretická šírka podľa kalibračného predpisu.
- B – opotrebenia drážky zväčší počiatočnú plochu priečného prierezu S_1 (resp. S_2) o ΔS_2 .
- C – úpravou nastavenia valcovacej medzery o Δg sa kompenzuje ΔS_2 (ΔS_2 je rovné ΔS_3) a nová plocha priečného prierezu S_3 je rovná ploche priečného prierezu pri počiatočnom nastavení S_1 .

TABUĽKA I Valcovacie parameter použité pre výpočet zmeny priečného prierezu z dôvodu opotrebenia valcov.

STD	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R_{ref}	1.387	1.481	1.340	1.376	1.365	1.352
R_{act}	1.381	1.444	1.342	1.386	1.387	1.303
S_{ref} [mm ²]	11498	8290	5597	4177	3036	2224
w [mm]	152	103	115	78.5	92	57.2
g [mm]	12	12	10	10	7	7
v_{act} [ms ⁻¹]	0.28	0.39	0.56	0.75	1.04	1.44
S_{act} [mm ²]	11427	8276	5733	4273	3084	2224
ΔS [mm ²]	71	71	71	71	71	-
Δg [mm]	0.47	0.14	-1.18	-1.22	-0.52	-



Obr. 11 Bloková schéma navrhovaného GA.

VIII. RIEŠENIE POMOCOU GENETICKÉHO ALGORITMU A SIMULÁCIA

Genetický algoritmus (GA) bude riešiť úlohu vhodného nastavenia valcovacej medzery na stolicach prípravného poradia na základe zmien v R_{vi} , pričom posledná stolica sa považuje za referenčnú, s meraním priečného prierezu za touto stolicou. Diagram navrhovaného GA je znázornený na Obr. 11, kde je v ľavej časti znázornený vývojový diagram GA, v pravej časti je znázornený model ktorý priradí fitness jednotlivým jedincom. Samotný GA pozostáva z nasledujúcich častí [27]:

A. Vytvorenie náhodnej populácie

Prvotná populácia jedincov Δg_{init} (zmena valcovacej medzery od pôvodného nastavenia $g_{setinit}$) je vektorom reálnych čísel, ktoré priamo reprezentujú navrhovanú zmenu valcovacej medzery jednotlivých stolíc. Hodnoty vektora počiatočnej generácie sú na jednotlivých pozíciách limitované podľa kalibračného predpisu a povolenej odchýlky.

B. Križenie 1

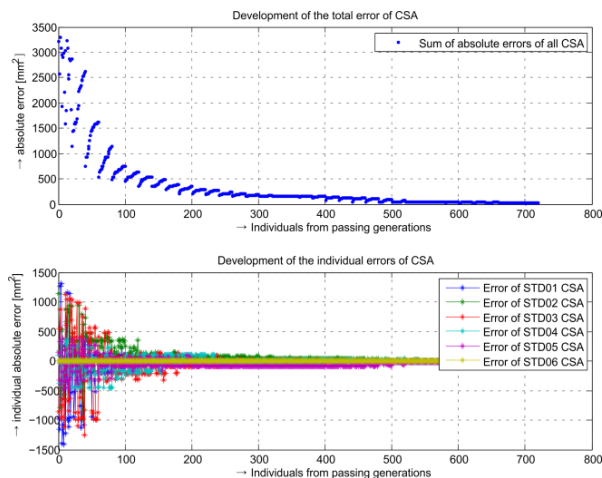
Jedinci sú vybraní z populácie podľa váženej rulety, pričom ako porovnávací faktor je zvolená suma absolútnych chýb referenčného a vypočítaného priečného prierezu jednotlivých stolíc.

C. Križenie 2

Ďalším križením je výmena jedného prvku vektora medzi dvoma náhodne zvolenými jedincami.

D. Mutácia

Z výslednej populácie je náhodne vybraný, parametrom určený počet jedincov, u ktorých sa zmení hodnota vektora v rozmedzí danom parametrom povolenej mutačnej odchýlky od jeho aktuálnej hodnoty.



Obr. 12 Príbeh generácií genetického algoritmu, v hornej časti grafu je znázornený vývoj súm absolútnych chýb plochy priečných prierezov, dolný graf znázorňuje tieto chyby pre jednotlivé stolice zvlášť.

E. Selekcia

Selekcia zabezpečí prechod do nasledujúcej generácie len najlepším jedincom. Faktorom, ktorý rozhoduje o kvalite jedinca je suma absolútnych hodnôt chýb plochy priečných prierezov jednotlivých stolíc.

TABUĽKA 2 Vybrané parametre GA zvolené pre simuláciu valcovania na prípravnom poradí.

Počet jedincov pre križenie	5
Postup do výberu z križenia	10
Postup do výberu z mutácie	5
Postup do výberu z výmeny časti reťazca	10
Postup do výberu z predošlej generácie	20
Celkový počet jedincov postupujúcich do ďalšej generácie	20

Pre simuláciu bolo zvolené modelovanie valcovania produktu rebierkovej ocele $\phi 12\text{mm}$ na prípravnom poradí, pričom vstupné parametre simulácie sú uvedené v Tab. 1. Referenčné hodnoty rýchlostí R_{vref} boli vypočítané podľa rýchlostí z kalibračného predpisu. Pomery aktuálnych rýchlostí R_{vact} boli zámerne zvolené tak, aby sa nezhodovali s referenčnými hodnotami. Takto sa simuloval stav valcovania, kedy už sú drážky jednotlivých stolíc opotrebované a je nutné vykonať nové nastavenie valcovacích medzier. Parametre genetického algoritmu sú uvedené v Tab. 2, počet iterácií bol v tomto prípade fixne stanovený na 35. Jedinci populácie sú reprezentovaní vektorom 1×5 , ktorého hodnoty odpovedajú navrhnutým zmenám valcovacej medzery Δg , pričom každému jedincovi je hneď po jeho vzniku modelom priradený fitness vektor, ktorý obsahuje chyby voči referenčnému priečnému prierezu jednotlivých stolíc, ako aj súčet absolútnych hodnôt týchto chýb. Ako je vidieť na Obr. 12, prvé generácie pomerne rýchlo minimalizujú veľké chyby jednotlivých ΔS_i , keďže sa vyberajú najlepší jedinci z počiatočnej generácie. Ďalší progres závisí od križenia a mutácii, takže postup je už podstatne pomalší. Po 35-tich iteráciách je najvyššia individuálna chyba ΔS_i na úrovni menej ako 0,1%, čo je viac ako postačujúce.

TABUĽKA 3 Porovnanie výsledkov simulácie GA s referenčnými hodnotami.

	STD01	STD02	STD03	STD04	STD05	STD06
Δg_{GA} [mm]	0,522	0,127	-1,171	-1,210	-0,482	0
Δg_{ana} [mm]	0,468	0,139	-1,178	-1,219	-0,520	0
ΔS_{GA} [mm]	11506	8289	5598	4178	3039	2224
ΔS_{ana} [mm]	11498	8290	5597	4177	3036	2224

IX. ZÁVER

Táto práca sa venuje analýze a optimalizácii valcovacieho procesu na valcovacej linke pre dlhé produkty, t.j. profilové materiály, tyče a drôty. Taktiež je prezentovaná analýza existujúceho, konvenčného modelu riadenia na báze PID regulácie a navrhuje sa jeho vylepšenie úpravou spätnej väzby momentu, kedy sa vylúči vplyv dynamickej zložky, čo bolo úspešne implementované do štandardného riadiaceho softvéru pre riadenie valcovacích stolíc spoločnosti SMS group, S.p.A, Tarcento. Správnosť matematického opisu valcovacej trate a jej regulačnej štruktúry sa overila simuláciou a porovnaním s meranými procesnými veličinami. V práci je prezentovaný návrh modulárneho systému automatickej regulácie valcovacích medzier, vyhodnotenia a optimalizácie ich nastavenia. Model vývalku, ktorý bol použitý pre simuláciu vychádza z dostupnej literatúry a z meraní základných procesných veličín na valcovni spoločnosti Slovakia Steel Mills, a.s. Strážske. Do budúcnosti sa uvažuje s použitím adaptívneho modelu, ktorého parametre by sa upravovali podľa procesných veličín danej valcovne. Modulárny koncept, kde je riadenie valcovacích medzier založené na báze genetických algoritmov zabezpečí možnosť testovania rôznych modelov bez nutnosti úprav samotného riadiaceho algoritmu. Pre vyhodnotenie valcovacieho procesu je navrhnutý expertný systém, ktorý vychádza ako z teoretických, tak aj z empirických poznatkov autora.

Cieľom zavedenia automatického vyhodnotenia a nastavenia valcovacích medzier je minimalizovať závislosť kvality nastavenia od ľudského faktora, optimalizovanie tohto nastavenia, minimalizovanie spotreby energie a opotrebenia valcov.

REFERENCES

- [1] L. Youngseog, Rod and Bar Rolling: Theory and Applications, CRC Press, Korea, 2004.
- [2] Karel Stýblo, *Strojní zařízení válcoven a tažiren: 1. část*, VŠB v Ostravě, Ostrava, Czech Republic 1969.
- [3] Eduard Červený, Milan Betuš, *Tvárnice zariadenia a ich automatizácia*, Edičné stredisko VŠT v Košiciach, 1981.
- [4] Mária Kollerová a Milan Židek a Bohumil Počta a Vladimír Dědek. *Valcovanie*, Bratislava, Slovakia., 1991.
- [5] NIIR Board of Consultants&Engineers, *The Complete Technology Book on Hot Rolling of Steel*, Delhi – India, National Institute of Industrial Research, 2010.

- [6] Korhonen A.S., Nikkilä K.J., *A Study on the Rod Exit Speed in Wire Rod Rolling*, Scandinavian Journal of Metallurgy, Helsinki, Finland, 1974
- [7] Scaglia Antonella, Melandri Fraziano, *Impact Speed Drop Compensation Procedure for a new layout Wire Rod Mill*, IEEE, Milano, Italy, 2002.
- [8] L. Youngseog, Laila S.B., *Effect of interstand tension on roll load, torque and workpiece deformation in rod rolling process*, Journal of Materials Processing Technology 145, 2004, 7-13.
- [9] A Nilabja, T. Mathur, *Profile Mill Advanced Service Portfolio*, Technological ABB, 2013.
- [10] SMS group. *WIRE ROD and BAR MILLS*, Information Brochure, Moenchengladbach, Germany, 2010.
- [11] Jingrong Liu, *Design and Analysis of Intelligent Fuzzy Tenion Controllers for Rolling Mills*, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2002.
- [12] L. Zboray, F. Ďurovský, J. Tomko, *Regulované pohony*, Viena, Košice, 2000.
- [13] Astech VLM500 – User Manual V2.2, ASTECH Angewandte Sensortechnik GmbH, Rostock 2010-2017.
- [14] T. Borovský, D. Ďurovský, K. Kyslan, “Material Tracking with Dynaic Torque Adaptation for Tension Control in Wire Rod Mill”, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, pp. 176-182, 2017.
- [15] X. Sun, H.F. Sun, *Speed cascade control system for bar and wire rod mills*, *ABB Value Paper*, ABB China Ltd, 2009
- [16] Tomáš Borovský, *Rolling Speed and Torque Prediction in Wire Rod Mill*, SCYR, Herľany, Slovakia, 2013.
- [17] M. G. Malmgren, I. Onghia, *Technological Papers*, Morgardshammar AB, Sweden, 2006.
- [18] M.G. Olsson, *ABB Interstand Dimension Control, ISD Improved Tolerances in Profile Mills*, ABB Automation Technologies AB, Vasteras Sweden, 2007.
- [19] T. Samad, A.M. Annaswamy, *Advanced Tension Control on Steel Rolling Mills*, IEEE Control System Society, 2011.
- [20] Gi. Li, F. Janabi-Sharifi, L. Witnisky, *Decoupling of Multiple Stand Interactions in Looperless Rolling Control Process*, IEEE Industrial Technology 2002 (821-826), 2002.
- [21] Dag. N. Sollander, *Upgrading rod and bar mills with state-of-the-art control technology*, ABB Automation Systems AB, Sweden, 1999.
- [22] GuominLi, F. Janabi-Sharifi, *Fuzzy Tension Control Scheme for Roughing and Intermediate Rolling Mills*, Proc. ANNIE’2002, St. Louise, USA, 2002.
- [23] J. Joulet, *Control of the width of bars in the roughing train of a hot strip mill*, Commission of european communities, Luxemburg, 1987.
- [24] Cony Eriksson, *Roll Pass Design for Improved Flexibility and Quality in Wire Rod Rolling*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2004.
- [25] Harutoshi Ogai, Akira Fujii, Kanji Baba, Yukio Nouchi, *Free Tension Set-up of Rod Bar Rolling by Fuzzy Inference Method*, IEEE, Hokkaido, Japan, 1991
- [26] ibaAnalyzer, *IBA analyzer*, iba AG [online]. Dostupné na: <http://www.iba-ag.com/en/iba-system/iba-system/analyze/>.
- [27] D. Micek, “Genetické algoritmy”, *Vysoké učení technické v Brně*, Master Thesis, Brno: Brno University of Technology, 2009.

Natural User Interfaces of Computer Systems and Their Evaluation

Lukáš Galko

Technical University of Košice
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Department of Computers and Informatics
Letná 9, 040 01 Košice
Email: lukas.galko@tuke.sk

Jaroslav Porubán

Technical University of Košice
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Department of Computers and Informatics
Letná 9, 040 01 Košice
Email:jaroslav.poruban@tuke.sk

Abstract—We created a platform for the evaluation of natural user interfaces. We named it OpenLab, as it is accessible by the public. It was created in a hallway of the Department of Computers and Informatics. Students as well as researchers enter this space each day. Through this we ensure, that the users of the OpenLab will get familiar with it and some of them will even use its environment on a daily basis. We examined metrics used for the evaluation of user interfaces and tailored them to our needs. We present the created metrics as well as the results that we attained with their use.

Index Terms—Natural user interfaces, human-computer interaction, observation of the user, person tracking, evaluation of interfaces

I. INTRODUCTION

Computers tend to affect our daily lives, as they enhance our work and leisure time. Increased interest for usability [1] of user interfaces in the recent years is evident. User experience is growing part of IT projects, as it highly affects the use of applications.

Multiple metrics exist for the evaluation of the usability of traditional user interfaces, namely web, mobile and desktop applications. We differentiate these metrics whether they are *objective* or *subjective*. *Objective* metrics provide us with possibilities to evaluate each user interface by the same set of rules. In these metrics, we don't collect subjective opinions from the system users, as we only use data observed by sensors embedded in the user interface [2]. For *subjective* measures we record personal opinions of testers collected through written notes, questionnaires or recorded speech.

An example of *objective* measures would be the Automated domain usability evaluation (ADUE) [3]. ADUE evaluates user interface of component-based application. It gathers information from components used in the applications' interface and evaluates *domain content and specificity, language barriers and errors* and *tooltips*. This way it's possible to identify whether terms used in the interface belong to the desired domain. Also errors as typos are identified and hence can be fixed. The interface is also evaluated for tooltips, since they can be helpful to the users.

An example of a *subjective* metric would be the System Usability Scale (SUS) [4], questionnaires or focus groups.

As the computers surround us in our everyday life, there is a high demand for creating natural user interfaces (NUIs). In this work we focus on existing metrics and how to collect usability data in such interfaces. To unite the terminology we provide the definition of a natural user interface.

A. Natural User Interface

A natural user interface (NUI) is a user interface, which reacts to the user in a way that corresponds with the users' understanding of the world [5]. The basic idea of a NUI is fairly old, but only in recent years tools for creating such interfaces have become commonly accessible. Each NUI needs to be [6]: *aware of the context, personalized, anticipatory, adaptive, ubiquitous* and *transparent*.

Aware of the context means that the NUI use situational and contextual information from its environment. It is aware of what users and objects move through its environment and of its purpose - what goals the users seek to accomplish in it.

A NUI is *personalized* when it is suited for the needs of every individual that enters it. If a new user enters a NUI, sensors should adapt to his/her physical conditions and the use cases should mirror the users' physical abilities.

Ideal NUI is *anticipatory* as it tries to respond to the needs of the user without the need of mediation of these needs from the user. Also it would be *adaptive* to the ever changing needs of the user.

Ubiquity of the NUI means that the interface is embedded into the users' work environment. It observes each detail and is fully accessible by each user who enters it. Whenever the user moves in the NUI, it should be able to react to his activities.

Even though the NUI needs to observe the user, the user should not feel like (s)he is being monitored. Each sensor in a NUI should be hidden from the sight of the user, thus the NUI could be called *transparent*.

Following the aforementioned characteristics, it is also important that the user of the UI is not encumbered by the UI in any way. This means that all observation of the user should be done by sensors, that are in no direct contact with the user.

Research of interfaces that surround the user in his work environment is connected to the development of *ubiquitous*

computing [7]. NUI are part of this development as computers that are in the work environment of the user directly affect the user. It is therefore needed to optimize the interaction with them in such way, that it is usable, satisfactory and effective on the long-term basis. Satisfaction of the user is a complicated discipline, as it is a highly subjective characteristics.

Another research area that is dependent on the research of NUI is the *ambient intelligence*. Environment that is ambiently intelligent has no conventional input our output medias. These are replaced with sensors and processors that are integrated into objects with which the users come to contact in a day to day basis [8].

The adjustment of a UI so that it corresponds to the users understanding of the world is directly influenced by the HCI. Interface for HCI consist of a sensor and an activator. Between them there is a transformator, that based on the scanned data from sensors adjusts the data shown on activator. User recognizes this change and conducts another movement based on this change. This movement is again recognized by the sensors of the interface and therefore ensures the cycle of HCI in the interface [9].

As we want to evaluate user interfaces on a day to day basis, we needed to create a laboratory that would allow this. This is why we decided to create an open laboratory, which will be used on a day to day basis by students and researchers.

II. OPENLAB - PLATFORM FOR THE EVALUATION OF NUIS

OpenLab is publicly accessible laboratory to researchers and students. This laboratory was created in the hallway on the fifth floor of the Department of Computers and Informatics of the Technical University of Košice. This ensures that users come to contact with it on a daily basis.

A. The purpose of the OpenLab

The OpenLab we created has multiple purposes. The main and most important is to create a platform in which students and researchers could enter a NUI and conduct experiments with it. Such an environment is unique in the global scale, so it is a practical place to identify the tasks that come with the creation of an open laboratory.

The OpenLab will observe students and researchers that enter it and people who communicate with the OpenLab [10]. OpenLab will be used for conducting controlled and non-controlled experiments. In the case of a controlled experiment, the researcher would call desired participants into the laboratory, or could easily ask the people that are present in the laboratory at the time of the experiment. For the purposes of such experiments, the laboratory could even be closed down, so that the environment gains the attributes of a closed laboratory.

Creating an open laboratory which is always closed for experiments is meaningless. The main benefit of the open laboratory from the point of experiments comes from the non-controlled experiments. For these experiments, the researcher does not communicate with the participants. The participants enter the interface out of their free will and interact

with it on their own [11]. The researcher can observe the participants when the participants are using the application that the researcher wants to evaluate. Experiments are often influenced by the Hawthorne effect [12], which states that the behaviour of an observed object changes as it knows that it is being observed. Non-controlled experiments could diminish the Hawthorne effect, as even though the users know they are being monitored, they conduct interaction with the interface without the interference of the researcher.

The OpenLab also comes with the possibility to adjust it for the needs of a specific domain. This allows domain analysis of software used in NUI that was not possible before.

Last but not least, the space of the OpenLab is created in the first place for the students. They should be able to rest in it and spend time in it between the lectures. Important aspect of the OpenLab is that it opens the possibility of displaying student assignments. This could motivate students through competition, as the best assignment solutions would be shown and could be used by them and other students. A ladder of the assignment solutions together with their final grade could also be shown in the OpenLab, displaying the best and the worst assignment solutions.

B. The design of the OpenLab

The place in which the OpenLab is created is the hallway on the fifth floor of the Department of Computers and Informatics of Technical University of Košice ¹. This means that the main focus of students and researchers that will come into the OpenLab is computer sciences. The environment of the OpenLab should provide NUI and surround the users from all sides when they will enter it. It should react on activities of the users that are present in it.

Student can enter the OpenLab through paternoster, stairs or from one of the two corridors that lead into it. These enters can be seen in the Figure 1 as entrance paternoster - EP, entrance stairs - ES, entrance corridor north - EC1 and entrance corridor east - EC2. Display areas that are used in our OpenLab can also be seen in this figure. Display areas represent public displays [13].

Display area on the large wall (area A) is the largest display area on which the most important data will be shown as it can be observed by the most users [14] that will be present in the OpenLab. It is constructed by putting 9 FullHD displays next to each other in the manner of a multi-monitor system [15], reaching full resolution of 6K.

Second area for display (area B) is an area that is seen by users that enter the hallway through paternoster, stairs or from the north corridor. This area is most suitable for application that are meant for students, like the time schedule of classes and map to the classroom. This display area is created by 4 FullHD displays mounted as a single multi-monitor, reaching the resolution of 4K.

Letter C marks the position of projectors that we placed in the environment. Each projector comes with the resolution

¹<https://kpi.feit.tuke.sk/sk/content/rekonstrukcia-respiria-kpi>

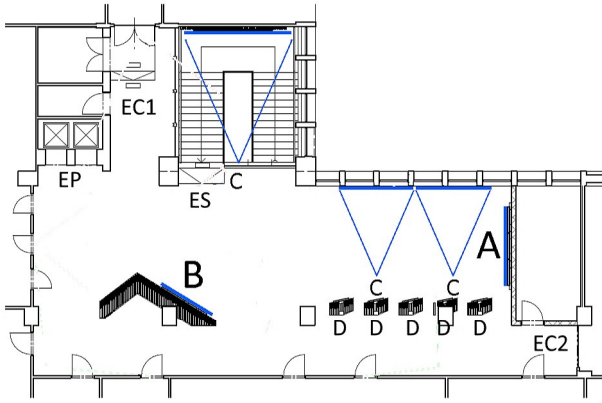


Fig. 1. Map of the display areas and entrances of the OpenLab

1920x1200. Of of them is used to display data over the stairs. This area is ideal for displaying data of incoming events that take place in another places than in the OpenLab, as it can be seen by students that are leaving the OpenLab. Other two projectors display data next to the area A for creating better spatial distribution of data. These two projectors additionally create a continuous area as described in the multi-monitor system setting. As these projectors are oriented toward windows, it is important to have curtains on the windows on which the projections could be seen and which would fully cover the outside light.

Letters D indicate five vertical FullHD displays that are placed on columns next to the display area A (note that they are facing north into the open area in front of display A rather than into the entrance from the east corridor EC1). Each of these displays shows individual data and applications [16]. An example of use for these display is to display different student assignments.

We also placed two microphones in the OpenLab. One is positioned over the display area B and one in front of the display area A. These microphones record all noise made in the area that surrounds them. This placement was chosen as the possible voice recognition for the control of the UI of the OpenLab should come from the areas in front of these display fields, as it is not feasible to give voice commands to a system that is far away from the user.

Additionally we placed 6 multipurpose sensors in the ceiling. These sensors track the temperature, humidity, pressure, illumination, voice intensity and vibrations. Receptor for these displays are placed so that they have access to the environment of the OpenLab. We also collect the data about the consumption of the OpenLab, namely electric current, voltage, power and charge.

Sensors as well as the light LED units are connected to 6 RaspberryPi devices placed in the ceiling. As the RaspberryPi devices are powered with accumulators that are also placed in the ceiling, the sensors that measure temperature in the

OpenLab only provide us with the data of the temperature in the ceiling, which differs from the temperature which the users are experiencing. The sensors communicate through MQTT messages that uses the *publish-subscribe* protocol.

In the future development of the OpenLab it will be extended by more sensors and will offer more capabilities. We believe that this design can be adjusted for more universities and can help with the creation of more open laboratories in other university settings.

III. TOOLKIT FOR THE EVALUATION OF OPENLAB

From the sensors and display devices used in the OpenLab, it is possible to collect large amount of data. These data need to be computed to be usable in our evaluation. Therefore, we created a toolkit that contains metrics usable in the OpenLab. We differentiate three parts of the toolkit:

- *person tracker*
- *questionnaire evaluation guideline*
- *EEG brain-wave analysis*

A. Person tracker

For tracking people movements in the OpenLab, we used cameras that observe the environment of the OpenLab. This means that we will focus on algorithms and libraries that can execute object detection based on the given image or video. We decided to use a single-stage detector, as they are faster for object detection. We have chosen YOLO object detector. The first iteration of the YOLO object detector processed at the speed of 45 FPS while achieving accuracy of 63.4%. Although the accuracy is not very high, compared to the other object detectors, YOLO object detector is less likely to produce false positive object detection on the background. YOLO detector has more iteration, with the current one being YOLOv3 [17], which is the version we used for the OpenLab.

Object detectors need to be trained on existing datasets. A common dataset that consist of 80 different labels is a COCO dataset [18]. As we create NUIs for human-computer interaction, we need to recognize people on the images. However, creating our own dataset based on the recordings from cameras would be time consuming and therefore we will stick with an existing dataset. Although, a dataset for the OpenLab environment could be created withing the life-cycle of the OpenLab.

As we are tracking people within the OpenLab, we know that if the detector identifies a person, that person cannot leave the cameras until it enters borderline regions. With this we can say that the highest detected number of people is the number of people that are present in the OpenLab. Furthermore, if one of these persons is hidden on some frames, we can try to return his/hers id when a person is detected on a later frame close to the last detected location of the person.

With the use of the person tracker we managed to detect people on the standard cameras. However, the person tracker failed to identify people on fish-eye lens cameras. We assigned an identification number to each standard camera. This will be later used for visualization of the pathing for detected people.

First step in our person tracker was to track the persons by assigning identification numbers to them. We used the YOLOv3 object tracker to compute each frame. When no person was detected on a frame, the frame would be put in an output video file without adjustment. The only thing that would be changing in this case is the number of the current frame. When at least one person was detected by the person detector, we would assign attributes to the person and save it in a list. For better understanding here is a list of attributes we are storing for each person:

- Person ID - a number that distinguish the user.
- Last active position - set of two tuples $(x\text{-mid}, y)$ and (w, h) . Second tuple represents the *width* and *height* of the bounding box that surrounds the person. First tuple is the position to display ID of user onto the screen.
- First frame - first frame of the video on which the person was detected.
- Last frame - last frame of the video on which the person was detected.
- Active - Boolean indicator whether the person was detected on last frame or is missing.
- Disappear count - number of frames on which the person was not detected since the first occurrence.
- Frames found - represents the number of frames on which the person was detected since first occurrence.
- List of all positions - stored in two tuples as last active position. We track the path the person took in the OpenLab. For each new frame the person is detected we add new position to this list.

After assigning attributes to each person on a frame, we would add ID of each detected person with the bounding box that surrounds them onto the frame and append it to the output video. The algorithm then steps onto next frame. For this frame we will need to compare the positions of currently detected people with the list of people from the last frame. The closes distances will be assigned to the same person ID. Each assigned new person will then be removed so that it is not assigned to multiple IDs. The new position will be added to the list of all positions of the user. In the case that the number of people was the same as on the previous screen, we try to connect all people on the full person list. Although it is important to note, that only when the distance is not high enough, it is possible for the user to move from one location to the other. Again as this distance represents the distance on the screen, we will use a program argument to set this value to our needs and an ideal value needs to be find through experiments. If more persons were detected on the current frame than on the previous one, we will add each new person that was not connected to the list of active people. Afterwards we will increase the disappear count for each person, whose position was unassigned to any of the current recognized positions.

Frame by frame, this algorithm computes the whole video. This way it will create a video-recording with identified persons for researchers to further examine.

The algorithm creates a path map from the OpenLab, as

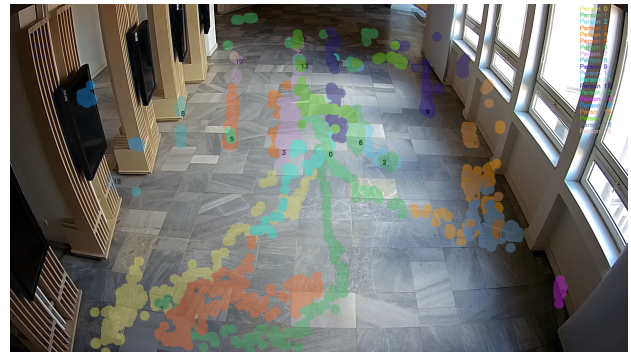


Fig. 2. Calculated pathing from OpenLab camera

illustrated in Fig. 2. As this version is distorted, we need to transform it onto an OpenLab floor plan. For our calculation we will need to transform point $(x1, y1)$ on the camera image $(width1, height1)$ onto a point $(x2, y2)$ on the OpenLab map image with $(width2, height2)$. Firstly we will transform the $y1$ position tracked by the camera into position $x2$. For this we calculate the percentage on what level does the position $y1$ appear on the original camera image by dividing it with the $height1$ of the camera. The lower the $y1$ percentage level is, the more distance on the position $x2$ we will add (or subtract based on the orientation of the camera) from the position of the camera in the OpenLab.

The calculation of the $y2$ position however proves more difficult, as the camera image covers larger width increasing distance from the camera. Because of this we will need to calculate the inverted value of the $y1$ height percentage. Then we calculate the $x1$ percentage from the camera view by dividing it with the cameras' $width1$. If the person stands under the camera, the level reaches values close to 1. This means that we put the position according to the percentile calculation to the width of the area displayable on the OpenLab map. The further is the position from the camera, the width of the area recorded by the camera in comparison to the OpenLab map increases. This means that we widen this width and use it with the percentile calculation to calculate the final position $y2$. Illustration of the result when we applied this calculation for each path of each user from Fig. 2 is shown in the Fig. 3.

B. Questionnaire

Questionnaire evaluation guideline consists mainly of recommendations how to tailor a questionnaire for the evaluation of an application in the OpenLab. During our experiments we confirmed that open text questions are not suitable for the use on the touch-screens. Therefore we recommend using recorded answers to subjective questions [19] in which users give opinions (which can be done by using microphones present in the OpenLab). For the more formal metrics we provide two questionnaires. One of them which we recommend using is the *SUS* created by John Brooke in 1986 [4]. The other one we recommend is the one we created for formal evaluation of domain usability. We named this evaluation technique as *System Domain Usability Scale* - SDUS.

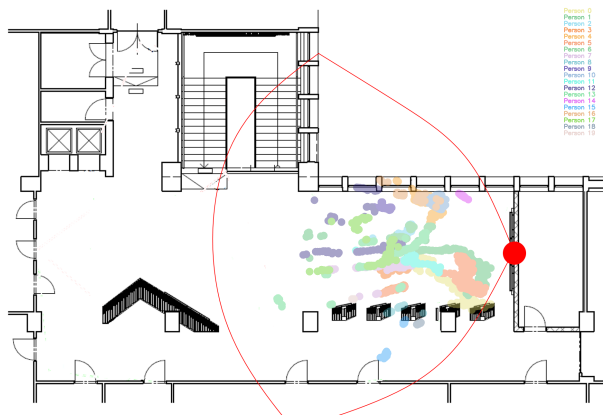


Fig. 3. Recalculated positions on the OpenLab map

[20] defined *domain usability* in five UI aspects: *Domain content*, *Consistency*, *World language used in the interface*, *Domain specificity*, *Language barriers and errors*. Domain content represents the terms that are used in the interface, as the terminology should correspond to the targeted domain. Consistency describes that each term should have the same meaning when it appears on multiple location in an application and should always describe the same functionality. World language simple means that the language of the interface is the same to the language of the user and no foreign worlds appear in it. Term used in the application should be as specific as possible which ensures domain specificity. And for the last part there should not be typos and language errors in the application as well as the interface should not create language barriers for its users.

For each one of these aspects we created a manual technique for its evaluation [21]. We conducted multiple experiments, in which we evaluated the different domain usability aspects. Incrementally from the results we adapted these techniques and improved them to their current state. We also tried to identify the weights of each one of these aspects and how influential they are on the domain usability of an application interface. We did this as in each iteration of our experiments, we introduced a different domain usability aspect issue to the application. We looked how noticeable these issues were, and whether they had impact on the task completion. Furthermore we created a *Words filling* technique. The task of this technique is to fill the interface with terms that are most appropriate for the interface.

C. EEG brain-wave analysis

All metrics that we mentioned to this point are *freely bound* to the user. The observed user is not hindered by the presence of any sensors that are placed on his/her person. For the last part we focused on one metrics that does not fulfill the *transparency* of a NUI. The metrics chosen for this was one that uses an EEG head set to track the brain waves of a user.

The chosen EEG headset for the use in OpenLab was

MindWave². MindWave EEG does not need a saline solution applied onto its receptors. This makes it easier for researchers to use on multiple users as well as it is less of a nuisance for the users. However this comes at the price of accuracy of measured brain waves.

With the MindWave EEG we are able to record *low alpha*, *high alpha*, *low beta*, *high beta*, *low gamma*, *high gamma*, *theta* and *delta* brain waves. It also calculates the meditation and attention level of the users.

For OpenLab we will use these brainwaves to better understand the cognitive processes behind using a given interface. We need to record values for each individual brain wave and match it with the action that the user was performing. With this we are able to diagnose what caught the attention of the user as well as which task was (s)he focusing the most.

We conducted a study of using EEG for evaluating user experience for the open space interface. Using a wide touch-screen on the movable stand, a laptop and the Mindwave EEG helmet, we conducted a short experiment in the empty hallway. This was done prior to the construction of the OpenLab. For this experiment we observed how the users interacted with a web page through the use of a multi-touch display. To compare the results we conducted a comparative experiment with the use of a touch-screen laptop in a closed environment.

Video recordings contained the interaction with a web-page and the values of the brain waves in the time of the interaction. We distinguished the the mutuality of these interactions and we recorded the key events into tables. Results were then computed into graphs. For the brain waves we focused on the *Alfa*, *Beta* and *Gamma* waves. These are connected to higher brain activity. Brain waves *Delta* and *Theta* were excluded, as they are prominent for sleeping, meditation and relaxation. Although, we considered the *meditation* and *attention* values calculated by the Mindwave EEG. These values are ranging from 0-100 and indicate on which action the user is focusing and which action cause the user to feel relaxed.

From the recorded values we found out that it was far easier to relax for users in the control group. As for the attention of

²<https://store.neurosky.com/pages/mindwave>

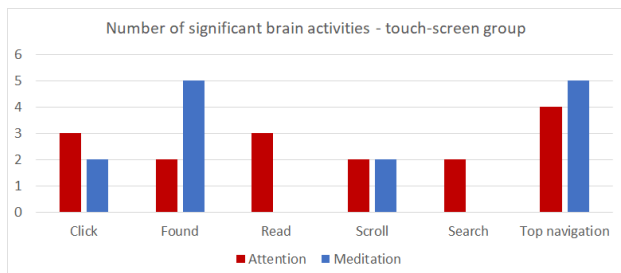


Fig. 4. Significant brain activity in open environment

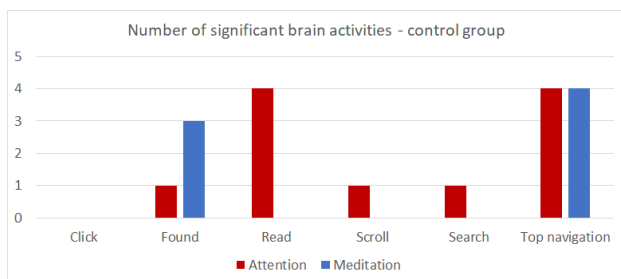


Fig. 5. Significant brain activity in closed environment

the users, the users in the control group had the average value of attention higher than those in the open space. This indicates that the open space has effect on the attention that a user can give to a task. It is a task for further research to identify, what is more natural for the users, to have higher or lower attention on a task. Higher attention means that the user focuses on the task, while lower could mean (s)he pays attention to his/her surroundings.

As for the key events, we distinguish six events: *click*, *found*, *read*, *scroll*, *search* and *top navigation*. Click means an event in which the user changes from one site to another. Found is an event when the user finds out an answer to his/hers current task. Read event indicates time when the user is reading a text on the screen. Scroll represents the time the user spends with scrolling context on the web page. Search represents time when the user is looking through the displayed elements. Top navigation represents the time when user displays the top navigational panel for orientation on the web page.

We recorded number of times when either attention or meditation of the users reached values over 90, which means it was reaching the top 10% values and was significant in this way. The results achieved during an open space experiment with a wide touch-screen are shown in the Fig. 4, while the results from the control group that used laptop are shown on Fig.5. This shows that even though the average values of attention and meditation for users in open environment are lower, they tend to reach higher maximal values.

IV. FUTURE WORK

The OpenLab has a long way ahead of it to become a functioning platform. It will be even more difficult for the OpenLab to become a real natural user interface, with which users could interact as soon as they enter it. As the toolkit was

made, now the research should focus on executing experiments in the OpenLab environment and improving the metrics for better precision and better automation. As smart-phones are used by majority of the students and researchers on TUKE, the data about which device connected to the different application could ease long term evaluation. It would allow the researchers to identify how many different users use the applications and perhaps also in what manner.

As new sensors will be put into the OpenLab, new metrics could be tailored for the needs of the OpenLab. Furthermore, new application are being add to the OpenLab. They are either made by researchers and students who are interested in improving the OpenLab, or they are simply being made by students for their assignments.

The OpenLab creates a unique opportunity for the evaluation of usability of user interfaces in it. As students go for a summer vacation, the applications in the OpenLab allow the evaluation of the *memorability* of its user interface. Also it will be needed to conduct experiments at the beginning of the next school year, as adjustments in the OpenLab will happen even through the summer.

OpenLab is a platform to push the boundaries of the user interface evaluation. It allows researchers to conduct long term experiments with many student participants. Furthermore, the possibility of displaying student assignments could motivate the students to work harder on their assignments and feel the satisfaction when their solutions will be displayed in the OpenLab. With the number of people that are involved in the evolution of the OpenLab, it could rise to new technological heights and hopefully one day, the OpenLab will become a real, natural user interface.

V. CONCLUSION

For the evaluation of natural user interfaces we created the OpenLab, an open platform for researchers' and students' work. The OpenLab is a prototype solution of an open laboratory for the research of natural user interfaces. The OpenLab was created so that it can be tailored to the needs of many different experiments and evaluations. As for now, it uses cameras, microphones and sensors (temperature, humidity, loudness, illumination, electric current, voltage, power and charge) to observe users in its environment.

We also created a movable multi-touch screen display on a stand. With this stand we can place a touch-screen display wherever we may need it in the OpenLab. As its alignment can be changed from vertical to horizontal, it provides us with an option to simulate smart table in the environment. By rotating the display so that it is oriented for the height, we could further simulate the conditions of different environments.

We analyzed different metrics that are used for the evaluation of user interfaces. We adapted them for the use for evaluating natural user interfaces. As the OpenLab is ever evolving environment, these metrics are just the first step of creating a formal metrics. The toolkit we created for evaluating natural user interfaces in the OpenLab environment consists of:

person tracker, questionnaire evaluation guideline and EEG brain-wave analysis.

With the *person tracker*, we can evaluate the movement of users in the OpenLab. It can be used to identify areas of interest (for example in front of different displays), how many people were standing in these areas and for how long. It can also be used to calculate how many people entered the OpenLab through stairs, hallway or paternoster. It is tailored so that it can cover different areas of the OpenLab as a single camera is not able to observe the entire environment of the OpenLab.

For the questionnaire evaluation guideline, we experimented with questionnaires for the evaluation of user interfaces in open spaces. We compared the usage of printed questionnaire to an electronic questionnaire displayed on a touch-screen. We confirmed that respondents were more willing to give subjective options by writing them on a paper, compared to writing answers with touch-screen keyboard. On the other hand, people filled the questionnaire with given answer faster on a touch-screen. Therefore we concluded that for the OpenLab we will use electronic questionnaires for quantitative measurements (like the *SUS* metrics, or the *SDUS* that we created). For the qualitative measurements with open answer questions, we will use voice recordings. We chose voice recordings, as it would be difficult to provide a stable surface for users to write down their answers.

For the use of EEG brain-wave analysis of user brain activity when working in OpenLab, we conducted an experiment to evaluate the changes of brain activity in closed and open environments. We identified that the attention and meditation achieved lower values for the OpenLab. Furthermore we found that the brain waves achieve significant values for different task when a user is in a closed environment compared to the open environment. As an EEG is intrusive method that demands to have a helmet put on the head of the user, it is not really suited for the *naturalism* of an user interface, although it can provide important data for the evaluation of the interface itself. Furthermore the emotion analysis can be used to evaluate the satisfaction of the users with the interfaces in the OpenLab.

With the use of the toolkit, it is possible to collect data in the environment of the OpenLab. It is important to note that for the evaluation of application in the OpenLab, the application should log the number of people that used them and the times for how long the users were using them.

OpenLab is only at the start of its life-cycle. OpenLab will evolve with new sensors and application being introduced in it. It serves as a prototype for the design of open laboratories.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by FEI TUKE Grant no. FEI-2018-57 "Representation of object states in a program facilitating its comprehension".

REFERENCES

- [1] J. Nielsen, *Usability 101: Introduction to usability*, 2003.
- [2] L. Galko and J. Porubän, "Tools used in ambient user interfaces," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 16, no. 3, pp. 32–40, 2016.
- [3] M. Bačíková and L. Galko, "Experiments with automated evaluation of domain usability," in *2016 9th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, July 2016, pp. 252–258.
- [4] J. Brooke, "Sus: A retrospective," *J. Usability Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 29–40, Feb. 2013. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2817912.2817913>
- [5] M. Weiser, "The computer for the 21st century," *Scientific american*, vol. 265, no. 3, pp. 94–104, 1991.
- [6] F. Sadri, "Ambient intelligence: A survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 43, no. 4, pp. 36:1–36:66, 10 2011. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1978802.1978815>
- [7] E. Serrano and J. Botia, "Validating ambient intelligence based ubiquitous computing systems by means of artificial societies," *Information Sciences*, vol. 222, pp. 3 – 24, 2013, including Special Section on New Trends in Ambient Intelligence and Bio-inspired Systems. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025510005578>
- [8] J. Nehmer, M. Becker, A. Karshmer, and R. Lamm, "Living assistance systems: An ambient intelligence approach," in *Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering*, ser. ICSE '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 43–50. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1134285.1134293>
- [9] T. Froese, K. Suzuki, Y. Ogai, and T. Ikegami, "Using human–computer interfaces to investigate 'mind-as-it-could-be' from the first-person perspective," *Cognitive Computation*, vol. 4, no. 3, pp. 365–382, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s12559-012-9153-4>
- [10] L. Galko and J. Porubän, "Approaches to human-computer interaction based on observation of a software developer," in *2015 IEEE 13th International Scientific Conference on Informatics*, Nov 2015, pp. 103–108.
- [11] N. Davies, M. Langheinrich, R. Jose, and A. Schmidt, "Open display networks: A communications medium for the 21st century," *Computer*, vol. 45, no. 5, pp. 58–64, 5 2012.
- [12] J. McCambridge, J. Witton, and D. R. Elbourne, "Systematic review of the Hawthorne effect: new concepts are needed to study research participation effects," *Journal of clinical epidemiology*, vol. 67, no. 3, pp. 267–277, 2014.
- [13] E. M. Huang, A. Koster, and J. Borchers, *Overcoming Assumptions and Uncovering Practices: When Does the Public Really Look at Public Displays?* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 228–243.
- [14] U. Rashid, M. A. Nacenta, and A. Quigley, "Factors influencing visual attention switch in multi-display user interfaces: A survey," in *Proceedings of the 2012 International Symposium on Pervasive Displays*, ser. PerDis '12. New York, NY, USA: ACM, 2012, pp. 1:1–1:6. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2307798.2307799>
- [15] A. Ebert, H. Hagen, T. Bierz, M. Deller, P.-S. Olech, D. Steffen, and S. Thelen, *SEE MORE: Improving the Usage of Large Display Environments*. Vienna: Springer Vienna, 2011, pp. 161–180.
- [16] L. Galko, M. Bačíková, and J. Porubän, "Multi-display work environment in the pharmacy domain," in *2016 9th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, 7 2016, pp. 259–265.
- [17] J. Redmon and A. Farhadi, "Yolov3: An incremental improvement," *CoRR*, vol. abs/1804.02767, 2018.
- [18] T.-Y. Lin, M. Maire, S. J. Belongie, L. D. Bourdev, R. B. Girshick, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, and C. L. Zitnick, "Microsoft coco: Common objects in context," in *ECCV*, 2014.
- [19] T. Tarkanič, M. Madeja, L. Galko, and J. Porubän, "Usability of an open space class location and schedule application," in *2018 16th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, Nov 2018, pp. 569–576.
- [20] M. Bačíková and J. Porubän, "Domain usability, user's perception," in *Human-Computer Systems Interaction: Backgrounds and Applications 3*. Springer, 2014, pp. 15–26.
- [21] M. Bačíková and L. Galko, "The design of manual domain usability evaluation techniques," vol. 8, no. 1, pp. 51–67, 2018.

Výskum vplyvu inteligentných sietí na distribučnú sústavu

Michal Ivančák

Katedra elektroenergetiky
FEI, TUKE
Košice, Slovenská republika
michal.ivancak@tuke.sk

Juraj Kurimský

Katedra elektroenergetiky
FEI, TUKE
Košice, Slovenská republika
juraj.kurimsky@tuke.sk

Abstrakt— O dôležitosti elektrickej energie v súčasnom svete nemožno pochybovať. Jej neodmysliteľnou súčasťou sú aj inteligentné siete, ktoré sú každým dňom populárnejšie. Úvodná časť tejto záverečnej práce predkladá teoretický základ týkajúci sa technických požiadaviek inteligentných sietí a ich technológií, ktoré sú jej blízke a požiadavkám, ktoré sú v súčasnosti kladené na inteligentné siete. Nasledujúca kapitola je zameraná na konkrétne projekty inteligentných sietí nielen na Slovensku, ale aj vo svete, kde je okrem iného opísaná aj stratégia Európskej únie v tejto oblasti do roku 2035. Tretia kapitola je sústredená na výskum, následne je navrhnutá inteligentná sieť so všetkými parametrami a na základe prieskumu je vybraný vhodný softvérový program, pre potreby tohto výskumu. Hlavnú časť tejto záverečnej práce predstavuje kapitola, sústredená na modelovanie inteligentnej siete. Táto kapitola popisuje model siete z pohľadu vplyvu inteligentných sietí na distribučnú sústavu, z pohľadu spolupráce obnoviteľných zdrojov a tiež ako sa dajú využiť inteligentné meracie systémy v inteligentných sieťach. V závere tejto dizertačnej práce je opísaný prínos práce a jej ďalšie smerovanie.

Kľúčové slová— *Inteligentné siete, Elektrická energia, Obnoviteľné zdroje energie, Distribučná sústava, Elektroenergetika*

I. ÚVOD

Pojem „smart“ je v súčasnej dobe veľmi populárny. Zvyčajne označuje rôzne produkty s vyšším stupňom informatizácie. Smart produkty ako napríklad mobilné telefóny „Smart Phone“, televízory „Smart TV“ alebo inteligentná elektronika s najrôznejšími funkciami a aplikáciami sú dnes veľmi obľúbené. Elektrická energia je v súčasnosti strategická „surovina“ a jej dôležitosť v nasledujúcich rokoch jednoznačne porastie. Z tohto dôvodu sa kladie čoraz väčší dôraz na stabilitu, bezpečnosť a zaistenie dodávky elektrickej energie koncovým odberateľom. Preto sa informatizácia postupom času viac a viac zavádza aj do elektrizačnej sústavy. Na popularite tak postupne nabera aj nové pomenovanie „Smart Grid“ inak známe aj ako „inteligentná sieť“.

Aj keď je pojem inteligentná sieť v súčasnosti celkom populárny, nie je každému zrejmé čo sa pod týmto pojmom rozumie. Inteligentná sieť je často označovaná aj ako sieť budúcnosti a tiež sieť ktorá dokáže zabezpečiť vysoký podiel distribuovanej výroby. Pojem inteligentná sieť postupom času získal takmer až prívlastok akéhosi čarovného prútika schopného riešiť všetky problémy súvisiace s obnoviteľnými

Tento článok bol podporený projektami VEGA 1/0372/18 a APVV-15-0438.

zdrojmi energie pripájanými do distribučných sietí a zároveň redukovať konečnú cenu elektriny pre odberateľov. Spomedzi viacerých dostupných definícií je najzaujímavejší práve výrok Fereidoona P. Sioshansiho, ktorý pojem Smart Grid vo svojej publikácii vykladá nasledovne: „Smart Grid je to najlepšie, čo môže byť, ale nevieme, čo to vlastne je.“ [1][2]

Téme inteligentných sietí sa venuje množstvo projektov, článkov a publikácií, rovnako ako aj zahraničných či domácich konferencií. Napriek veľkej popularite ale existuje široká nejednotnosť v definícii tohto pojmu. Napriek mnohým odlišnostiam je inteligentná sieť často označovaná ako sieť budúcnosti a zároveň považovaná za sieť, ktorá je schopná využiť väčšie množstvo obnoviteľných zdrojov energie a distribuovanej výroby ako súčasná sieť.

Pretvorenie súčasnej fungujúcej siete na inteligentnú bude finančne veľmi náročné. Ide o proces, ktorý bude dlhodobý a ktorý viaže na seba kapitál v priebehu desiatky rokov. Je preto nutná spolupráca všetkých zúčastnených strán. Stále nie je úplne overené, ako budú jednotlivé technológie v rámci týchto nových inteligentných sietí spolupracovať. Tento proces prestavby už však beží a mnohé krajiny rozbiehajú rôzne pilotné projekty, ktoré majú demonštrovať realizovateľnosť a výhodnosť tejto technológie [2]

II. ANALÝZA INTELIGENTNÝCH SIETÍ

Za hlavný rozdiel medzi sieťou súčasného typu a inteligentnou sieťou sa považuje reverzibilita, teda obojsmerný prenos elektrickej energie. Súčasná energetická sieť umožňuje prenos elektrickej energie len jedným smerom, teda z miesta centralizovanej výroby do miesta spotreby. Používaním inteligentná sieť sa umožní výrobu v mieste spotreby do takej miery, že smer toku elektrickej energie bude sa bude meniť. Bude dochádzať k stavu, keď elektrická energia vyrobená v jednom regióne bude spotrebovaná v inom regióne. Takto fungujúca sústava si však vyžaduje zavedenie a rozšírenie viacerých technológií, či už tieto technológie považujeme za súčasť inteligentných sietí, alebo len za príbuzné technológie. [2]

A. Inteligentná sieť a príbuzné technológie

V súvislosti so zavádzaním a rozvojom inteligentných sietí dochádza tak isto aj k vzniku nových technológií. Ako príklad môžeme uviesť nasledujúce príbuzné technológie:

- Smart metering (inteligentné meranie) a pokročilá meracia infraštruktúra – zabezpečuje nie len pravidelný automatický odpočet údajov z inteligentných meracích systémov, ale aj obojsmernú komunikáciu potrebnú pre zabezpečenie dynamických taríf, prípadne pre odpájanie zátáže. Aplikáciu Inteligentných meracích systémov (IMS) máme na Slovensku od roku 2014 na základe vyhlášky číslo 358/2013 (zo dňa 28. 10. 2013) z dielne Ministerstva Hospodárstva SR.
- Systémy smart home (inteligentný domov) – umožňujú automatickú reakciu niektorých spotrebičov na zmenu tarify v závislosti na potrebách spotrebiteľa. Zároveň tieto systémy sprístupňujú spotrebiteľovi on-line údaje o jeho spotrebe energií. V prípade úpravy zmluvných vzťahov medzi spotrebiteľom a prevádzkovateľom distribučnej siete, ako aj vhodného technického prepojenia medzi systémom inteligentnej domácnosti a riadiacim systémom distribučnej siete, je možné zabezpečiť priame riadenie vybraných spotrebičov v rámci domácnosti. V súčasnosti ide o nájdenie integrácie všetkého so všetkým napr. osvetlenia za pomoci inteligentnej žiarovky, ktorú je potom možné ovládať cez mobilnú aplikáciu v telefóne za pomoci WiFi siete v domácnosti.
- Distribuovaná výroba (smart distribution) – nepredstavuje nevyhnutnú súčasť inteligentnej siete, patrí však medzi faktory vedúce k potrebe vytvorenia takejto siete. Veľké objemy distribuovaných, prevažne obnoviteľných zdrojov pripájaných do distribučných sietí, má za následok vznik mnohých problémov. Od inteligentnej siete a riadenia distribučnej sústavy na úrovni VN a NN sa očakáva riešenie týchto problémov. Riešenia inteligentnej distribúcie sú navrhnuté tak, aby minimalizovali energetické straty, obmedzovali prerušenie napájania a optimálne využívali distribuované komponenty inteligentnej siete, vrátane alternatívnych zdrojov energie, ukladania energie a nabíjacej infraštruktúry hybridných elektrických vozidiel - PHEV (Plug-in hybrid electric vehicles).[5]
- Elektromobilita - podobne ako distribuovaná výroba, nepredstavuje nevyhnutnú súčasť inteligentnej siete, napriek tomu tieto pojmy navzájom úzko súvisia. Rovnako ako v prípade distribuovanej výroby platí, že súčasná sieť nebude schopná plniť svoju funkciu po rozsiahlom rozšírení elektromobilov. Od inteligentnej siete sa očakáva, že umožní nielen efektívne postupné dobíjanie elektromobilov, ale umožní aj využitie časti kapacity batérií pripojených elektromobilov pre potreby siete.
- Systém iNES - (inteligentná OrtsNETzStation - inteligentná transformátorová stanica NN) je systém vyvinutý v spolupráci Univerzity vo Wuppertale spolu so spoločnosťami SAG GmbH a Bilfinger Manuel GmbH. Systém iNES je určený na sledovanie a vyhodnocovanie on-line stavu NN siete a na riadenie tejto siete tak, aby nedochádzalo k nebezpečným

stavom v sieti (prepätie, podpätie, preťaženia vedení) [2].

- SCADA – (Supervisory Control and Data Acquisition) je systém, ktorý dozerá na geograficky rozložené procesy a riadi ich. Tento systém sa tiež nazýva aj „Telecontrol System“ a teda predstavuje systém, ktorý slúži na monitorovanie a riadenie územne rozľahlých procesov. V takomto systéme sú zahrnuté všetky zariadenia a funkcie na zber, spracovanie, prenos a zobrazovanie nevyhnutných informácií o procesoch [4].

B. Požiadavky na inteligentné siete

Vo všeobecnosti môžeme požiadavky na inteligentné siete rozdeliť na normatívne požiadavky a na legislatívne požiadavky. Legislatívne požiadavky vychádzajú zo Smernice Európskeho parlamentu a Rady 2009/72/ES z 13. júla 2009 o spoločných pravidlách pre vnútorný trh s elektrinou. Kde „cieľom vnútorného trhu s elektrinou, ktorý sa postupne zavádza v celom Spoločenstve od roku 1999, je ponúknuť všetkým spotrebiteľom v Európskej únii, či ide o občanov alebo podniky, skutočný výber, nové obchodné príležitosti a zvýšiť objem cezhraničného obchodu v snahe získať výhody vyplývajúce z vyššej efektívnosti, konkurenčných cien a vyšších štandardov služieb a prispieť k bezpečnosti dodávok a trvalej udržateľnosti“.[10]

V bode (27) sa ďalej uvádza: „Členské štáty by mali podporovať modernizáciu distribučných sústav napríklad prostredníctvom zavádzania inteligentných sústav, ktoré by sa mali budovať tak, aby podporovali decentralizovanú výrobu a zabezpečovali energetickú účinnosť.“ [6]

Inteligentné siete majú byť teda prostriedkom a nevyhnutnou súčasťou pri vytváraní novej infraštruktúry v rámci budovania a rekonštrukcie elektrických sietí v Európe. Budovanie inteligentných sietí má byť optimalizované najmä z hľadiska zvyšovania energetickej účinnosti. Z hľadiska zavádzania IMS bolo potrebné do roku 2020 nainštalovať inteligentné meracie systémy aspoň u 80% spotrebiteľov.

Do úvahy treba zobrať aj ďalšie nariadenia, ktoré sú nepriamo spojené s prevádzkou siete a to sú Smernica európskeho parlamentu a rady 2009/28/ES o podpore využívania energie z obnoviteľných zdrojov energie a o zmene a doplnení a následnom zrušení smerníc, Smernica európskeho parlamentu a rady 2010/31/EÚ o energetickej hospodárnosti budova, Smernica európskeho parlamentu a rady 2014/94/EÚ o zavádzaní infraštruktúry pre alternatívne palivá.[7]

Z pohľadu normatívnych požiadaviek treba pre potreby Slovenska vychádzať najmä z predpisov európskych normalizačných organizácií CEN, CENELEC a ETSI. Na základe mandátu od EÚ vydali tieto organizácie základné požiadavky v rámci inteligentných sietí s názvom First Set of Standards, ktorý obsahuje okrem iného časť s názvom Smart Grid Reference Architecture (referenčná architektúra pre inteligentné siete). Podľa tohto dokumentu je architektúra inteligentných sietí tvorená množstvom systémov, ktoré medzi sebou spolupracujú, a spoločne tak tvoria elektrizačnú sústavu.

Koordináčna skupina pre inteligentné siete definuje v tomto dokumente 3 hlavné ciele:

- Zabezpečenie toho, aby hlavné prvky architektonického modelu mohli abstraktne reprezentovať doménu inteligentnej siete so všetkými hlavnými zúčastnenými stranami. Takýto model by mal byť v súlade s už existujúcimi porovnateľnými modelmi na celom svete.
- Definícia architektonického rámca, ktorý by podporoval celý rad rôznych prístupov zodpovedajúcich rôznym požiadavkám zainteresovaných strán a urobiť ho v časovom rámci, ktorý by ho nútil obmedziť počet takýchto prístupov.
- Poskytnutie metodiky, ktorá by používateľom architektonického modelu umožnila uplatniť ho vo veľkom množstve prípadov použitia, aby tak poskytla najmä návod na analýzu potenciálnych implementačných scenárov, identifikujúcich oblasti možnej nedostatočnej interoperability (napr. chýbajúce normy) atď. [3]

Inteligentnú sieť je rozumné vnímať ako vývoj súčasnej siete, kde treba zohľadniť nové požiadavky, vyvíjať nové aplikácie a integrovať nové najmodernejšie technológie, najmä informačné a komunikačné (IKT). Integrácia IKT do inteligentných sietí poskytne rozšírené možnosti správy aplikácií cez internet a vytvorí tak integrovanú, bezpečnú, spoľahlivú a výkonnú sieť.

Výsledkom bude nová architektúra s viacerými zúčastnenými stranami, viacerými aplikáciami, viacerými sieťami, ktoré musia vzájomne spolupracovať. To sa dá dosiahnuť iba vtedy, ak sa bude rozvíjať Inteligentná sieť a najmä jej normy. Vplyvom toho sa vývoj môže spohľadnúť na dohodnutý súbor modelov, ktorý to umožní: na tieto modely sa v tomto odseku odkazuje ako na referenčnú architektúru.

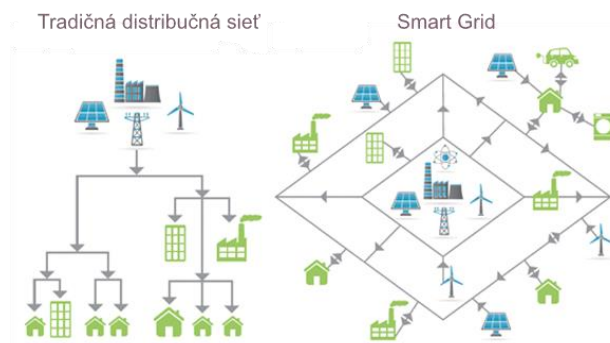
C. Analýza funkcionalít a ich implementácia v súčasných podmienkach

Inteligentné siete majú oproti klasickým sieťam viaceré odlišnosti, no môžeme ich definovať aj na základe ich vlastností a výhod:

- sieťová topológia,
- začlenenie distribuovanej výroby,
- rôzne smery toku energie,
- obojsmerná komunikácia,
- aktívne prvky a senzory v celom systéme,
- samo-monitorovanie,
- vyššia spoľahlivosť,
- vyššia bezpečnosť,
- väčší komfort pre zákazníkov,
- rýchla detekcia a lokalizácia porúch,
- väčšia efektívnosť využitia elektrickej energie,

- poloautomatické obnovovanie a autoregenerácia,
- adaptabilná ochrana a izolácia prípadného problému,
- začlenenie zákazníka a poskytnutie nových služieb,
- využitie centralizovaných zdrojov spolu s decentralizovanými zdrojmi,
- decentralizované zdroje malých výkonov sú rozmiestnené po celé Európe,
- nadvzúja sa snahu a záväzok Európskej únie zvýšiť podiel výroby z obnoviteľných zdrojov na 20 % v roku 2020,
- vysoká miera automatizácie v distribučných a prenosových sústavách,
- zníženie strát v systéme a s tým súvisiace zvýšenie ekológie, ekonomie a efektivity prevádzky,
- podpora rozptýlenej výroby spoločne s rozvojom a výskumom nových metód riadenia.[6]

Na obr. 1 je možné vidieť názorné porovnanie tradičnej siete a siete inteligentnej. Ako bolo spomenutú vyššie, inteligentná sieť má veľa odlišností od tradičnej siete, ale má tiež aj veľa spoločného.



Obr. 1 Topológia a tok energie tradičnej siete (vľavo) a inteligentnej siete (vpravo) [6]

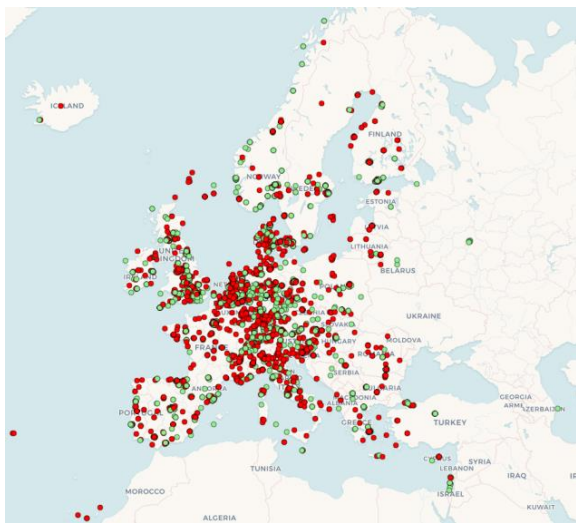
D. Stratégia Európskej únie pre projekty inteligentných sietí do roku 2035

Dokument, ktorý vypracovala Európska technologická platforma (ETP) pre inteligentné siete sa zaoberá hlavnými cieľmi, týkajúcimi sa práve oblasti zameranej na inteligentné siete v období do roku 2035. Prioritou sú možné inovácie, regulačný rámec a bezpochyby aj finančná stránka. V roku 2007 ETP Smart Grids odprezentovalo stratégiu zameranú na rozvoj inteligentných sietí Strategic Research Agenda 2035 (SRA 2035). v marci 2012 ETP aktualizovalo pôvodnú stratégiu.

Stratégia SRA 2035 by mala byť podstatným dokumentom pre základy nasledujúceho rámcového programu (HORIZONT 2020) ako podstatného nástroja Európskej komisie pre podporu vedy a výskumu.

Dokument stanovuje nasledujúce priority v oblasti inteligentných sietí:

- sieťová bezpečnosť - bezpečná výmena informácií,
- sledovanie spotreby v reálnom čase pomocou moderných technológií (inteligentné meracie systémy IMS),
- vytváranie malých a stredne veľkých systémov pre skladovanie elektrickej energie,
- inteligentné technológie v domácnostiach
- a pokročilá úroveň predpovede spotreby elektriny a produkcie z OZE s odchýlkou.



Obr. 2 Rozloženie projektov Inteligentných sietí v Európe [8]

Je veľmi dôležité zamerať sa na trendy v energetiky aj z dlhodobého hľadiska. Takéto sledovanie podporuje správne rozhodovanie o tom, kde je potrebnejšie investovať v rámci energetických zariadení. Mnoho takýchto zariadení má životnosť 30 až 50 rokov, a teda zariadenia, ktoré sú nasadené v danom období by mali byť použiteľné aj v odlišnom prostredí budúcnosti. A preto je veľmi dôležitý odhad a správne nastavenie technických, prevádzkových a ekonomických parametrov.

Európska komisia, Rada a Parlament uzavreli dohodu o znení novej smernice týkajúcej sa efektívnosti v energetike. Bola schválená 11. septembra 2012. Táto smernica je pre krajiny Európskej únie záväzná. A taktiež sú krajiny viazané povinnosťou, aby raz ročne zverejňovali úspory energie každého subjektu. Tie musia poskytnúť informácie o koncových odberateľoch a ich spotrebe.

Smernica definovala pre členské krajiny EÚ, aby si zadefinovali svoje národné ciele, ktoré sú schopné dosiahnuť a budú pre nich záväzné. Po zozbieraní týchto cieľov (v období do júna 2014) určila európska komisia spoločný cieľ pre cieľ EÚ. Táto smernica pre určuje pre všetky štáty EÚ, vtedy 27, povinnosť každoročne zverejniť úspory ktoré za daný rok dosiahli. Subjekty a podsubjekty musia na základe žiadostí poskytnúť štatistický prehľad o koncových odberateľoch a ich spotrebe.

Ďalšou z povinností ktoré museli členské štáty splniť bolo poskytnutie meracích systémov na meranie odberu elektrickej energie, zemného plynu, centralizovaného zásobovania teplom a tiež centralizovaného zásobovania teplej a studenej vody. Podmienkou pri tom bolo, aby ich cena mohla byť z pohľadu zákazníka primeraná.

Meracie systémy majú byť inštalované do nových budov a tiež v prípade rozsiahlejších rekonštrukcií do už existujúcich objektov. Smernica tiež hovorí o výmene starých meracích systémov za nové v prípade, že tento krok je z hľadiska nákladov ekonomicky efektívny a taktiež technicky možný. Ekonomická efektívnosť má vychádzať z pohľadu dlhodobej prevádzky a z dosiahnutia úspor dlhodobým používaním. Smernice o tzv. treťom energetickom balíku (smernice č. 2009/72/ES a č. 2009/73/ES), hovoria o tom, že v prípade inštalácie inteligentných meracích systémov pre elektrickú energiu a pre zemný plyn je potrebné zabezpečiť, aby bolo vytvorené rozhranie, ktoré zabezpečí spotrebiteľovi možnosť získania informácií o priebežnej spotrebe a tiež prístup k historickým dátam za obdobie posledných 24 mesiacov spätne.

Smernica tiež myslí na prípad inštalácie malého obnoviteľného zdroja. V tomto prípade má IMS viesť započítať takto dodanú energiu do distribučnej sústavy. Dostupnosť týchto dáta má byť zabezpečená aj pre zainteresované tretie strany, napr. dodávateľov energií.

Ďalšou z podstatných vecí, ktoré smernica opisuje, je zabezpečenie bezpečnosti a ochrana dát získavaných z IMS. Údaje z týchto zariadení, ako aj údaje o spotrebiteľoch musia byť chránené právnymi predpismi EÚ, tzv. GDPR, ktoré hovorí o práve na ochranu osobných údajov a ochrane súkromia.

Ak koncoví odberatelia nemajú nainštalované inteligentné meracie systémy, členské štáty musia zabezpečiť, aby údaje o vyúčtovaní boli presné a založené na skutočnej spotrebe. Povinnosť je možné dosiahnuť aj motivovaním odberateľov k priebežnému vykonávaniu tzv. „samoodpočtov“, teda odčítavania a nahlásenia stavu meracieho systému samotným spotrebiteľom. Ak spotrebiteľ nenahlási hodnoty z meracieho systému za dané obdobie, vyúčtovanie sa môže vykonať aj na základe realistického odhadu spotreby.

Koncový odberateľ dostane všetky svoje vyúčtovania a informácie o vyúčtovaní spotreby energie bezplatne. Výnimku tvorí len vyúčtovanie za individuálnu spotrebu vykurovania

a chladenia v bytových domoch a viacúčelových budovách. V takomto prípade sa náklady môžu preniesť na koncových spotrebiteľov, pokiaľ sú tieto náklady primerané.

Elektrická energia má jasné postavenie nielen na Slovensku, ale aj vo svete. Inteligentné siete majú už niečo za sebou, ale stále môžeme povedať, že sme ešte len v počiatkoch. Základy pre budovanie inteligentnej siete sú na Slovensku tvorené už desaťročia, ide o technológie a zariadenia pre automatizáciu, monitorovanie a ochranu prevádzky všetkých napäťových sústav, zber a spracovanie dát týkajúcich sa spotreby a tiež údaje o dodávkach a výpadkoch v rámci distribučnej, ale aj prenosovej sústavy. V súčasnosti majú operátori k dispozícii vyše 3500 kilometrov optických káblov, čiže vedú mapovať situáciu v reálnom čase, a tak lepšie riadiť

sústavu a predchádzať globálnym výpadkom, tzv. black-outom. V rámci Európy funguje systém virtuálnej elektrárne, sústava ENTSO-E, vďaka ktorej si vieme v čase nedostatku energiu „požičať“ a v čase prebytku posunúť ďalej do susedných krajín. Na úplné zapojenie inteligentných sietí je potrebné zapojenie aj na úrovni NN a zároveň zapojenie zákazníkov. Na to však bude musieť prebehnúť rozsiahla obnova siete.

III. VÝSKUM INTELIGENTNEJ SIETE

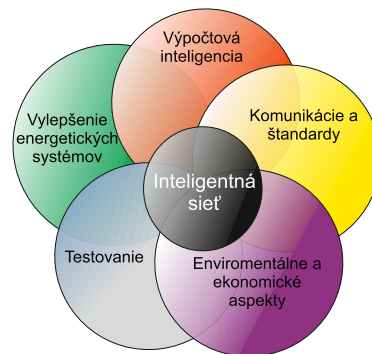
Na výskum inteligentných sietí sa je možné pozerat' z rôznych pohľadov, či už z pohľadu použitých prostriedkov alebo z pohľadu dosiahnutia nejakého cieľa. Každopádne je možné zvolit' viacero pohľadov na výskum inteligentných sietí. V tejto kapitole sú opísané viaceré pohľady, ktoré viedli k vytvoreniu modelov opísaných v štvrtej kapitole.

Mikrosieť sa považuje za inovatívnu technológiu, ktorá pomáha integrovať obnoviteľné zdroje energie do distribučných systémov a poskytuje ďalšie výhody rôznym zúčastneným stranám, napríklad kompenzáciu investícií do infraštruktúry a zvýšenie spoľahlivosti miestneho systému. Tieto systémy si však vyžadujú ďalšie investície do regulačnej infraštruktúry, a preto je potrebné kvantifikovať dodatočné náklady a očakávané prínosy, aby sa stanovilo, či je investícia ekonomicky uskutočniteľná. Dokument [6] navrhuje metódu systematizácie a reprezentácie výhod a ich vzájomných vzťahov založených na paradigme UML Use Case, ktorá umožňuje reprezentáciu komplexných systémov v stručnej a elegantnej podobe. Táto metóda je demonštrovaná stanovením ekonomickej uskutočniteľnosti mikrosiete a distribuovanej výroby inštalovanej na typickom kanadskom modeli vidieckych distribučných systémov ako prípadovej štúdie. Štúdia sa snaží minimalizovať náklady na energiu dodávanú komunite, berúc do úvahy fixné náklady spojené s mikrovrstvami a distribuovanou výrobou a navrhuje výhody pre rôzne zúčastnené strany. [5]

A. Návrh inteligentnej siete

Na základe požadovaných vlastností budúcej inteligentnej siete je potrebné vyhodnotiť rozdiely v charakteristikách súčasnej energetickej siete a navrhovanej inteligentnej siete, aby sa zdôraznila charakteristika siete a výzvy. Keď bude inteligentný sieťový systém plne vyvinutý, umožní zapojenie zákazníka, vylepší výrobu a prenos pomocou nástrojov, ktoré umožnia minimalizovať zraniteľnosť systému, odolnosť, spoľahlivosť, primeranosť a kvalitu energie. Tréningové nástroje a rozvoj kapacít na riadenie a prevádzku sietí a pripravujú nové pracovné príležitosti, ktoré budú súčasťou požadovaných cieľov vývoja inteligentnej siete, a ktoré bude možné testovať pomocou testovacieho zariadenia. Na dosiahnutie rýchleho nasadenia sietí je potrebné, aby testovacie stredisko a výskumné centrá pracovali naprieč disciplínami a aby vybudovali prvú generáciu inteligentných sietí. Zameraním sa skôr na bezpečnostné kontroly ako na jednotlivé zraniteľné miesta a hrozby môžu spoločnosti poskytujúce služby a predajcovia technológií inteligentných sietí opraviť základné príčiny, ktoré vedú k zraniteľnostiam. Bezpečnostné kontroly je však zložitejšie a niekedy nemožné pridať do existujúceho systému a v ideálnom prípade by sa mali integrovať od začiatku, aby sa minimalizovali problémy s

implementáciou. Prevádzková efektívnosť sa bude pravidelne hodnotiť z dôvodu ochrany inteligentnej siete pred vyvíjajúcimi sa hrozbami. [33]



Obr. 3 Kľúčové aspekty pri navrhovaní inteligentnej siete

B. Modelovanie obnoviteľných zdrojov energie

Návrh a vývoj inteligentnej siete si vyžaduje modelovanie obnoviteľných koncových zdrojov a technológií ako sú veterné, fotovoltaické, solárne, biomasa a palivové články. Na zistenie úrovne ich zapojenia je potrebné posúdiť ich vplyv na nový systém. V rámci fungovania inteligentných sietí sa predpokladá rozsiahle rozmiestnenie distribuovaných energetických zdrojov (DER) v blízkej budúcnosti. Obnoviteľné technológie by mali byť umiestnené tak, aby znížili závislosť Európy od fosílnych palív a environmentálne vplývali na výrobu energie. Technológie obnoviteľnej energie a ich integrácia predstavujú niekoľko problémov vrátane zvýšenia efektívnosti a spoľahlivosti a rozvoja najmodernejšieho sledovania s cieľom riadiť variabilitu. Architektonické návrhy, ktoré zahŕňajú optimálne prepojenia, optimálne dimenzovanie a umiestnenie DER pre optimálnu spoľahlivosť, bezpečnosť a ekonomické prínosy, sú tiež kritickými aspektmi. Okrem toho je potrebné zaoberať sa výpočtovým vývojom inteligentnej siete, ktorý umožňuje modely odhadu a predpovedania pre rýchle predpovede týchto premenlivých zdrojov energie v reálnom čase. Táto podkapitola sa venuje významu a technológiám vrátane konverzie, ukladania a PHEV.

Solárna energia využívaná fotovoltaickými (FV) bunkami bola prvýkrát objavená v roku 1839 francúzskym fyzikom Edmundom Becquerelom. Technológia môže byť použitá ako jeden panel, reťazec FV panelov alebo množstvo paralelných reťazcov FV panelov. Solárny FV panel nemá žiadne emisie, je spoľahlivý a vyžaduje minimálnu údržbu. FV systém všeobecne zvažuje:

- Žiarenie: Dostupnosť premeny slnečnej energie na elektrinu. Úroveň žiarenia je ovplyvňovaná prevádzkovou teplotou, intenzitou svetla FV buniek (v závislosti od polohy) a polohou solárnych panelov (maximálny výkon pri kolmom dopadaní svetelných lúčov).
- Emisie: Úroveň emisií FV sú šetrné k životnému prostrediu.

Kvôli zvýšeniu efektívnosti fotovoltaiických článkov, materiály používané na ich výrobu zahŕňajú amorfný kremík, polykryštalický kremík, teluridkadmenný, mikrokryštalický kremík a amorfný CIS (meď-indium-selén).

Existuje niekoľko FV simulačných programov, ktoré umožňujú sériovú analýzu času. Vstup zvyčajne pozostáva z ročného globálneho priameho ožiarenia za jeden rok a údajov o teplote a rýchlosti vetra, napríklad z údajov národných hydrometeorologických ústavov, geometrie poľa a ďalších parametrov FV a rovnováhy systému. Existuje veľa modelov na výpočet výstupného výkonu FV článku alebo FV poľa. Z dôvodu premenlivej efektívnosti a množstva technológií, ktoré sú v súčasnosti k dispozícii, je výstupný výkon ovplyvňovaný podmienkami prostredia a špecifikáciami modulov. Charakteristický model jednej bunky sa bežne používa pre fotovoltaiické technológie.

Vietor je jedným z najrýchlejšie rastúcich zdrojov obnoviteľnej energie v celom svete. Rok 2018 bol pre globálny veterný priemysel dobrý rok, v rámci roka bolo nainštalovaných 51,3 GW novej energie z vetra, čo je mierny pokles o 4,0% v porovnaní s rokom 2017, napriek tomu je to silný rok. Od roku 2014 ročné inštalácie každoročne dosiahli najvyššiu hodnotu 50 GW, a to aj napriek zvýšeniam a poklesom na niektorých trhoch. Nové zariadenia s výškou 51,3 GW prinášajú celkový kumulatívny počet zariadení až do 591 GW. Na pevnine bolo nainštalovaných 46,8 GW, čo je pokles o 4,3% v porovnaní s rokom 2017. Čína a USA zostali lídrami s najväčšími pobrežnými elektrárnami s novou kapacitou 21,2 GW a 7,6 GW. Európsky pobrežný trh nainštaloval 9 GW, čo je o 32% pokles v porovnaní s rokom 2017.

Energia z biomasy je energia vyrobená spracovaním organických materiálov ako sú kukurica, pšenica, sója, drevo a iné zvyšky ktoré môžu produkovať chemikálie prípadne iné látky. V rámci výroby bioenergie sa najčastejšie používa proces nazývaný splyňovanie, čiže premena na plyn, ktorý následne spaľovaným v plynovej turbíne výroba elektrickej energie. Biomasa sa môže prevádzať tiež priamo na tekuté palivá, ako je etanol, alkohol alebo bionafta pochádzajúce z kukuričného etanolu. Rastliny na biomasu sú komerčne dostupné po celom svete. Výkon elektrární na biomasu sa pohybuje od 0.5 GW až 3.0 GW využívajúc skládkový plyn a lesné produkty. Biomasa sa v rozvojových krajinách tradične používa na domáce varenie a kúrenie. Energiu z biomasy je možné vyrábať, iba ak je k dispozícii dostatok bioproduktov a ak sa uskutoční proces premeny. Biomasa produkuje CO a ďalšie emisie. Požadovaná stratégia plánovania a lokalizácia výroby z biomasy v si vyžaduje schopnosť zahrnúť variabilitu takejto výroby do konceptov nových systémov

Vodná energia je zďaleka najväčší obnoviteľný zdroj energie. Najväčšie vodné elektrárne dosahujú výkony niekoľko stoviek MW, stredné vodné elektrárne sa pohybujú od 100 kW do 30 MW, zatiaľ čo malé vodné elektrárne sú menšie ako 100 kW. Malé vodné elektrárne pracujú s premenlivou rýchlosťou kvôli toku vody. Indukčné motory vytvárajú energiu vďaka turbínovému systému. Hydraulická turbína premieňa vodnú energiu na mechanickú rotačnú energiu. Malé a mikrovodné systémy sú vhodnými adeptami pre optimalizáciu OZE na zlepšenie funkčnosti inteligentnej siete. Aj v tomto prípade sa

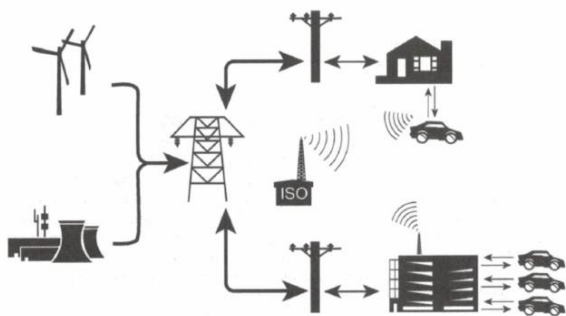
riešia otázky spoľahlivosti a modelovania ako vo fotovoltaiickej a veternej energii. Vodná energia je závislá na ročnom období a musí brať do úvahy aj množstvo vody ktoré tečie korytom rieky, zároveň je to tiež ideálny prostriedok na akumuláciu energie.

Od vynájdenia elektrickej energie sa hľadali účinné spôsoby skladovania tejto energie a jej použitie na požiadanie. V priebehu minulého storočia sa priemysel skladovania energie vyvíjal, prispôboval a inovoval v reakcii na meniace sa energetické požiadavky a technologický pokrok.

Systémy na uchovávanie energie poskytujú širokú škálu technologických prístupov k riadeniu napájania s cieľom vytvoriť odolnejšiu energetickú infraštruktúru a priniesť úspory nákladov pre verejnoprospešné služby a spotrebiteľov. Pre lepšie porozumenie rôznych prístupov, ktoré sa v súčasnosti používajú po celom svete, vieme rozdeliť spôsoby akumulácie do piatich hlavných kategórií:

- Batérie - rad elektrochemických úložných riešení, vrátane pokročilých chemických batérií, prietokových batérií a kondenzátorov.
- Akumulácia tepla - zachytávajúce teplo a chlad, aby sa vytvorila energia na požiadanie alebo kompenzovali energetické potreby.
- Mechanické skladovanie - inovatívne technológie využívajúce kinetickú alebo gravitačnú energiu na ukladanie elektrickej energie.
- Akumulácia pomocou vodíka - výroba elektrickej energie z vodíka a opačne, prostredníctvom elektrostatózy – premena energie na vodík a jeho uskladnenie.
- Prečerpávanie vody - vytváranie veľkých vodných nádrží s vodou. [9]

Vďaka systému V2G môže zaparkované vozidlo poskytovať energiu do distribučnej siete. Na túto technológiu môžu byť použité akumulátorové elektrické vozidlo, vozidlo s palivovými článkami alebo dokonca hybridné plug-in vozidlo. Uložená alebo nevyužitá energia, ktorú energetické spoločnosti vytvárajú v noci alebo v čase mimo špičky, sa môže použiť na podporu vozidiel v prípade mimoriadnych udalostí, napríklad pri výraznom znížení dodávok ropy alebo náhlom zvýšení cien ropy. Každé vozidlo PHEV bude vybavené prípojkou do siete na tok elektrickej energie, ovládacím alebo logickým pripojením potrebným na komunikáciu s prevádzkovateľom siete a palubnými ovládacími prvkami a meraním. Obrázok 25 schematicky znázorňuje spojenia medzi vozidlami a sieťou. Elektrina tečie z rozvodnej siete z generátorov ku koncovým užívateľom, zatiaľ čo nevyužitá energia prúdi do a späť z elektrických vozidiel, ako je znázornené čiarami s dvoma šípkami na obrázku. V časoch nízkej spotreby sa môžu batérie vozidiel nabíjať a vybíjať podľa potreby.



Obr. 4 Model spolupráce vozidla a siete (V2G) [6]

IV. MODELOVANIE INTELIGENTNEJ SIETE

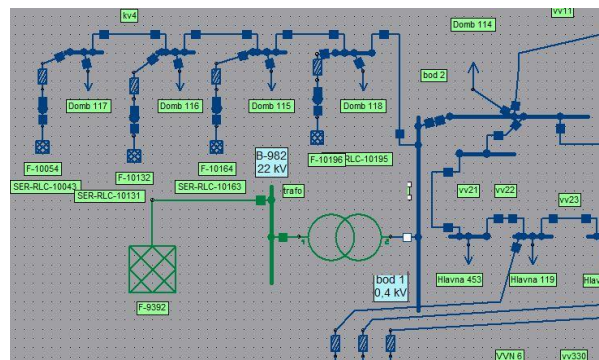
Inteligentné siete majú oproti klasickým sieťam výhody ale hlavne i nejaké odlišnosti. Najvýznamnejším rozdielom je odlišná topológia siete v dôsledku zahrnutia distribúovanej výroby, ktorá spôsobuje rôzne smery toku energie. Zmena nastáva aj vďaka novým technológiám, obojsmernej komunikácii a prítomnosti aktívnych prvkov a senzorov v systéme, samokontrola, ako aj rýchlej detekcii a lokalizácii porúch.

Vďaka novým technológiám sa očakáva vyššia spoľahlivosť, lepšie zabezpečenie, väčšie pohodlie pre zákazníkov a vyššia účinnosť pri využívaní elektrickej energie. Inteligentné systémy tiež predpokladajú poloautomatickú obnovu a automatickú regeneráciu, ako aj adaptívnu ochranu a izoláciu potenciálneho problému. Zákazníkom sa tak poskytuje integrácia a poskytovanie nových služieb.

Z hľadiska distribúcie ide o použitie centralizovaných zdrojov spolu s decentralizovanými zdrojmi. Decentralizované zdroje malých kapacít rozmiestnené v celej Európe sú v súlade so záväzkom Európskej únie zvýšiť svoj podiel výroby energie z obnoviteľných zdrojov na 20% do roku 2020. Očakáva sa, že vysoký stupeň automatizácie v distribučných a prenosových systémoch zníži straty systému a súvisiace zvýšenie ekologických opatrení, hospodárnosti a prevádzkovej efektívnosti, ako aj podpora rozptýlenej výroby spolu s vývojom a výskumom nových metód riadenia, výsledkov.

A. Model siete z pohľadu vplyvu inteligentných sietí na distribučnú sústavu

Hlavným prvkom použitým na vytvorenie tohto modelu je simulačný program NEPLAN, v ktorom bola sieť modelovaná. Konkrétne ide o sieť, ktorá predstavuje časť dediny z východného Slovenska. V tomto programe boli ako parametre siete použité hodnoty individuálnej spotreby jednotlivých domácností, parametre elektrických vedení a dĺžky medzi odbermi a tiež parametre výkonových transformátorov. Tieto údaje boli statické a tvorili základy, na ktorých bola analýza vykonaná.



Obr. 5 Časť modelu v programe Neplan

Zaťaženie domácností sa pohybovalo od 3 do 10 kW. V rámci simulácie bol použitý FV panel od kanadskej solárnej spoločnosti. Tento panel sa použil v dvoch variantoch, buď ako fotovoltaická elektrárňa pozostávajúca z 11 blokov umiestnených na streche domu alebo ako jedna veľká 0,5 MW elektrárňa umiestnená v teréne alebo na streche priemyselného zariadenia.

Použitie FV panela ako prvku pre výrobu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, bolo motivované najmä dostupnosťou týchto zariadení. Ak by sme chceli porovnať základné obnoviteľné zdroje a ich použitie v domácnosti, vyhrala by to snečná energia. Inštalácia tepelného čerpadla vyžaduje vyššie vstupné náklady; použitie veterných turbín by bolo možné iba v ostrovej prevádzke a bez použitia dotácií. Geotermálna energia sa na Slovensku využíva veľmi málo, nakoľko je tu nevyhnutná potreba geologického prieskumu podložia a vrty do hĺbky niekoľko stoviek metrov.

Pri modelovaní vplyvu inteligentných sietí sa použila aj nabíjačka na elektrické vozidlá s výkonom 11 kW. Predpoklad rastúceho počtu nabíjačiek a ich vplyv na sieť bol spôsobený najmä plánovanými zmenami v právnych predpisoch EÚ. Existuje predpoklad, že pri schválení domu bude jednou z podmienok inštalovať nabíjačku pre elektrické auto. Tieto nariadenia sú konkrétne opísané v európskej smernici 2014/94 / EÚ z 22. októbra 2014 o zavádzaní infraštruktúry alternatívnych palív, ale aj v smernici Európskeho parlamentu a Rady 2009/28 / ES z 23. apríla 2009 o podpore využívania energie z obnoviteľných zdrojov a tiež v smernici Európskeho parlamentu a Rady 2010/31 / EÚ z 19. mája 2010 o energetickej hospodárnosti budov. Na základe týchto nariadení sa vytvárala analýza, či by takáto sieť dokázala čeliť takémuto náporu. Pri simulácii sa predpokladalo, že sieť bude vo veľkom rozsahu zaťažená a že k nabíjaniu automobilov by došlo súčasne.

Tento model porovnáva vplyv elektromobility na mikrosieť, ktorá bola modelovaná na základe reálnych údajov. V modeli bolo navrhnuté použitie obnoviteľných zdrojov elektrickej energie (OZE), konkrétne fotovoltaických panelov, na výrobu elektrickej energie a zároveň na zníženie dodávky energie do siete. V rámci analýzy je možné porovnať dva scenáre, ktoré sú zobrazené v numerickej aj grafickej podobe. Z tohto článku vyplýva, že použitie OZ má významný vplyv na takýto malý systém. Použitie FV panelov výrazne znížilo straty

v sieti bez ohľadu na straty v systéme vysokého napätia a tiež v prenosovej sústave.

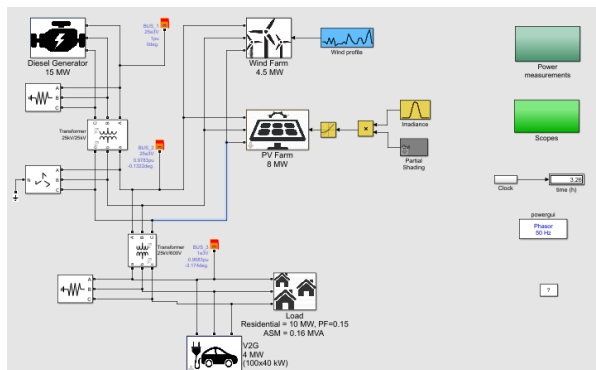
Tento návrh sa môže ďalej vylepšiť, napríklad o pridaním iného obnoviteľného zdroja, ktorý by pomohol pri prevádzke siete, hlavne v čase keď slnečné žiarenie nedopadne na FV panely. Vzniká tiež možnosť zvýšenia výkonu FV farmy prípadne použitie batérií za účelom akumulácie elektrickej energie.

Táto simulácia je iba približná, pretože softvér ponúka iba obmedzené možnosti na simuláciu správania v sieti. Použité hodnoty sú statické a bolo by lepšie použiť časovo premenlivé údaje. Ak by sme chceli byť presnejší, bolo by potrebné simulovať zmenu zaťaženia počas dňa. Bolo by tiež potrebné simulovať priebeh slnečného žiarenia počas dňa v rôznych podmienkach a rôznych ročných obdobiach. Samotné nabíjanie elektrického vozidla by sa potom mohlo rozdeliť na rôzne časti dňa na základe scenárov nabíjania.

B. Model siete z pohľadu spolupráce obnoviteľných zdrojov

Simulink je rozšírenie MATLAB-u na simuláciu a modelovanie dynamických systémov. Poskytuje užívateľovi možnosť rýchlo a ľahko vytvárať dynamické modely systémov vo forme blokových diagramov. Modely sa dajú opísať pomocou rovníc alebo sa dajú zostaviť z blokov predstavujúcich skutočné systémové prvky. Okrem modelov fyzikálnych systémov je možné modelovať aj algoritmy riadiacich systémov vrátane ich automatického ladenia, systémov spracovania signálu, komunikácie a spracovania obrazu.

Tento model ukazuje systém V2G (vehicle to grid) – čiže spoluprácu elektrického vozidla a siete, ktorý môže byť použitý na reguláciu frekvencie v mikrosieti, v prípade keď sa vyskytnú udalosti počas dňa. Fázorový režim Simscape™ Power Systems™ umožňuje rýchlu simuláciu 24-hodinového scenára.



Obr. 6 Model mikrosiete v Matlab – simulink

Mikrosieť je rozdelená do štyroch dôležitých častí: naftový generátor, ktorý pôsobí ako generátor základného výkonu; FV elektrárňou kombinovaná s veternou farmou na výrobu obnoviteľnej energie; systém V2G inštalovaný vedľa poslednej časti topológie, ktorá predstavuje zaťaženie siete. Veľkosť mikrosiete predstavuje približne spoločenstvo tisícok

domácností počas dňa s nízkou spotrebou na jar alebo na jeseň. V základnom modeli je 100 elektrických vozidiel, čo znamená, že medzi automobilmi a domácnosťami je pomer 1:10. Toto je možný scenár v dohľadnej budúcnosti.

Diesellový generátor vyvažuje spotrebu energie a vyrobenú energiu. Frekvenčnú odchýlku mriežky môžeme určiť podľa rýchlosti rotora jeho synchronného stroja. V tejto mikrosieti boli zároveň použité dva zdroje obnoviteľnej energie:

- Fotovoltaická elektrárňou, ktorej výkon je ovplyvňovaný tromi energetickými faktormi: veľkosťou fotovoltaickej elektrárne, účinnosťou solárnych panelov a veľkosťou dopadajúceho slnečného žiarenia.
- Zjednodušený model veternej farmy, ktorý vyrába elektrickú energiu priamo úmerne s rýchlosťou veternej energie. Keď vietor dosiahne nominálnu hodnotu, veterná farma vyrába nominálny výkon. Keď rýchlosť vetra prekročí maximálnu rýchlosť vetra, veterná elektrárňou sa odstavuje zo siete do času, kým sa vietor nevráti na svoju nominálnu hodnotu.

Simulácia trvá 24 hodín. Intenzita slnečného žiarenia je riadená normálnym rozdelením, keď je najvyššia intenzita dosiahnutá na poludnie. Vietor sa počas dňa výrazne mení a má niekoľko vrcholov a miním. Zaťaženie domácností má typický vzorec podobný bežnej spotrebe v domácnosti, počas dňa je nízka, večer sa zvyšuje na vrchol a v noci pomaly klesá. Frekvenciu siete počas dňa ovplyvňujú tri udalosti:

- spustenie asynchrónneho stroja o tretej hodine ráno,
- čiastočné zamračenie na poludnie ovplyvňujúce výrobu slnečnej energie
- a výkon veternej farmy prerušený o 22. hodine, keď vietor prekročí povolenú maximálnu rýchlosť vetra.

Tento model popisuje simuláciu, ktorá zahŕňa zdroje energie (15 MW diesellový generátor, fotovoltaickú a veternú elektrárňou s výkonom 8 a 4,5 MW), spotrebu elektrickej energie (s maximom približne 10 MW) a model nabíjania elektrického vozidla ako spôsob akumulácie elektrickej energie v prípade výpadku alebo prebytku energie v sieti. Systém tiež obsahuje nepredvídateľné zdroje, ktoré v kombinácii s naftovým generátorom a systémom nabíjania elektrických vozidiel udržiavajú sieť v prevádzke.

Vzhľadom na to, že tento model je ostrovej prevádzky (off – grid), nie je teda pripojený k väčšiemu systému a preto jeho prevádzka závisí od spoľahlivej prevádzky najväčšieho zdroja. Týmto základným zdrojom je diesellový generátor, ktorý nie je závislý od veternej a solárnej energie, ale v rámci regulácie poskytuje maximálny priestor pre energiu z obnoviteľných zdrojov energie. V rámci modelu sa vykonalo niekoľko meraní, ktoré preukázali funkčnosť modelu a jeho stabilitu za daných podmienok. Na danom modeli by bolo vhodné monitorovať kvalitu elektrickej energie, najmä

frekvencie, pretože kolísanie frekvencie nie je žiadúci jav v sieti.

V. ZÁVER

Tento článok sa zaoberá vplyvom inteligentných sietí na distribučnú sústavu. V rámci prvých kapitol je v nej opísaný stav vytvárania technológií inteligentných sietí z pohľadu technického ale tiež legislatívneho. Inteligentné siete, ako celok zahŕňajú úzku spoluprácu medzi vývojármi zariadení, prevádzkovateľmi energetických sietí a tiež spotrebiteľmi elektrickej energie. Celý systém siete však musí byť stavaný na základnom princípe energetiky, a to že výroba sa musí rovnať spotrebe.

Trendy vo svete, poukazujú na to, že inteligentná sieť je projekt, ktorý je možné realizovať, a ktorý dokáže úspešne fungovať. Nie je to však jednoduchý proces nakoľko vo väčšine prípadov išlo o realizáciu celých inteligentných miest. Tu vzniká otázka, nakoľko by bola úspešná rekonštrukcia prípadne reorganizácia už existujúcich elektrických sietí. Každopádne je možné konštatovať, že postupnými krokmi, ktoré sa v súčasnosti realizujú naprieč celou Európou a tiež Slovenskom, bude možné vytvoriť inteligentnú sieť aj rekonštrukciou existujúcich zariadení v sieti.

Ďalšia časť je venovaná analýze inteligentných sietí pre vytvorenie modelov, ktoré by vedeli testovať prevádzku nových zariadení v sieti. Princíp budovania vychádza zo štandardov riadenia prepojených sústav a tiež uvažuje s prevádzkou sietí, ktoré by v prípade potreby vedeli tvoriť funkčnú ostrovnú prevádzku. V krátkosti sú tiež skúmané prvky výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, ako fotovoltaiická a veterná energia, energia z biomasy prípadne vodná energia. Príchodom nových technológií je tiež skúmané zapojenie elektrických vozidiel do fungovania sústavy v rámci manažmentu nabíjania. Spolupráca obnoviteľných zdrojov tiež predpokladá používanie vhodných akumuláčnych prvkov v sústave.

Posledná časť opisuje dva typy modelov. Prvý z nich sleduje vplyv nových zariadení na existujúcu sústavu. Výsledky zo simulácií ukazujú, že pripojenie veľkého množstva nových spotrebičov, konkrétne nabíjačiek na autá, by mohlo mať nežiadúci vplyv na fungovanie existujúcich sústav. Riešením je modernizácia elektrických sietí a súčasne aj manažment nabíjania elektromobilov v rámci jednej siete. Druhý model simuluje prevádzku inteligentnej mikrosiete. Mikrosieť je ostrovnej prevádzky a obsahuje jeden diesel agregátor na udržanie prevádzky siete v kombinácii s prvkami ako sú fotovoltaiické panely a veterné turbíny. Model

demonštruje reguláciu parametrov siete, kde na denný diagram zaťaženia vplyvajú prírodné zmeny.

Táto práca reaguje na aktuálne dianie v elektroenergetike. Blížiacim sa rokom 2020 dochádza ku postupnému naplňaniu cieľov Európskej únie na zvýšení podielu výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov a tiež zníženiu uhlíkovej stopy a znižovaniu emisií. Stratégia Európskej únie už aj teraz myslí na ďalšie dekády a pripravuje nové ciele na obdobie do roku 2030. V rámci vytvárania inteligentných sietí je tiež postupne dokončovaná výmena inteligentných elektromerov v domácnostiach aj v podnikoch. Tento nemalý krok prináša už teraz pozitívne výsledky v rámci sledovania spotreby a vytvárania lepšieho pohľadu na spotrebu elektrickej energie zákazníkov.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] SIOSHANSI, F., P. et al. Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy; Academic Press, 2011. 510 s. ISBN 978-0-12-386452-4
- [2] VOLČKO, Vladimír: SmartGrid: Vplyv na prevádzku, bezpečnosť a stabilitu elektrizačnej sústavy, Autoreferát dizertačnej práce, STU FEI Bratislava, online, [cit. 2019-09-02]. Dostupné na internete: <http://www.fei.stuba.sk/docs//2015/autoreferaty/Volcko_autoref.pdf>
- [3] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, First Set of Standards, online [cit. 2019-09-12]. Dostupné na internete: <http://gridscientific.com/images/Smart_Grid_Reference_Artitecture.pdf>
- [4] AT&P journal 4/2010: SCADA systém je viac ako len softvérová aplikácia, 26 s, online, [cit. 2019-09-07]. Dostupné na internete: <http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/casopisy/atp_2010/pdf/atp-2010-04-26.pdf>
- [5] J. A. Momoh, Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis, 1 edition. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2012. 232 p. ISBN-13: 978-0470889398.
- [6] S. Borlase, Ed., Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions, 1 edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. 607 p. ISBN-13: 978-1439829059.
- [7] SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2009/72/ES, online, [cit. 2019-09-28]. Dostupné na internete: <<http://data.europa.eu/eli/dir/2009/72/oj>>
- [8] Smart grid projects map: organisations and implementation sites, online, [cit. 2019-11-15]. Dostupné na internete: <https://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses.jrc.ec.europa.eu/files/u24/sgp_outlook_map/map.html>
- [9] Energy storage association, online, [cit. 2019-11-20]. Dostupné na internete: <<https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/>>
- [10] Panajotovic, B., Jankovic, M. & Odadzic, B. ICT and smart grid. in 2011 10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TESSKS) vol. 1 118–121 (2011).

Hierarchical Text Classification with Convolutional Neural Networks

Milan Krendzelak
Department of Computers and Informatics,
Technical University of Kosice,
Kosice, Slovak Republic
krendzelak.m@google.com

František Jakab
Department of Computers and Informatics,
Technical University of Kosice,
Kosice, Slovak Republic
frantisek.jakab@tuke.sk

Abstract—In this paper, the author presents the experiments and the results achieved for hierarchical text classification using convolutional neural networks with proposed architectural improvements. Specifically, introduction of a hierarchical dense layer implemented according different hierarchical strategies such as global all-in approach and local approaches, which comprises from local per node, local per parent node and local per level. Therefore, 4 different type of experiments were conducted to test and validate the proposal and achieved performance. Hierarchical 20Newsgroup training dataset, comprises of more than 20 labels and 3 hierarchical levels, is used for training proposed models. Multiple variants of hyperparameters setting such as batch size, embedding size and number of available training documents per label were considered during the testing. Evaluation of performance includes hierarchical metrics such as hierarchical F_1 score achieved by proposed hierarchical approaches with Logistic Regression and Support Vector Machine models. Accordingly, author concludes that proposed hierarchical convolutional neural networks using global classification all-in approach achieves the best results and outperforms hierarchical LR and SVM models by 5% and 12% respectively.

Abstrakt—V tomto príspevku autor prezentuje experimenty a výsledky dosiahnuté pre hierarchickú klasifikáciu textu pomocou konvolučných neurónových sietí s navrhovanými architektonickými vylepšeniami. Konkrétne, zavedenie hierarchickej ‘fully-connected’ vrstvy, implementovanej podľa rôznych hierarchických stratégií, ako je ‘global all-in’ prístup a ‘local’ prístupy, ktoré sa skladá z ‘local per node’, ‘local per parent node’ a ‘local per level’. Preto boli uskutočnené 4 rôzne typy experimentov na testovanie a validáciu návrhu a dosiahnutého výkonu. Pre výcvik modelov sa používa hierarchický výcvikový súbor 20Newsgroup, ktorý sa skladá z viac ako 20 kategórií a 3 hierarchických úrovní. Počas testovania sa zvažovalo viac variantov nastavenia hyperparametrov, ako je ‘batch size’, ‘embedding size’ a počet dostupných výcvikových dokumentov pre kategóriu. Vyhodnotenie výkonnosti zahŕňa ploché a hierarchické metriky ako hierarchické F_1 skóre dosiahnuté navrhovanými hierarchickými prístupmi s modelmi Logistic Regression a Support Vector Machine. Autor preto dospel k záveru, že navrhované hierarchické konvolučné neurónové siete využívajúce ‘global all-in’ prístup dosahujú najlepšie výsledky a prekonávajú hierarchické modely LR a SVM o 5% a 12%.

Keywords—convolutional neural network, hierarchical text classification, hierarchical strategy, global all-in, local per node, local per parent node, local per level.

I. INTRODUCTION

Application of the hierarchically organized categories into a taxonomy has become the most frequent way of organizing

large quantities of data. Researchers have shown advantages of using hierarchies for classification that demonstrated high performance [1].

The major difference between these solutions is the way how the training dataset is mapped between the classes and further consumed during the training and/or predicting phases. Currently, beside flat baseline model, there are also well-known hierarchical approaches such as global and local approaches [2], so hierarchical local approach comprises local per node, local per parent node and local per level approaches.

While local approach utilizes a splitting of the hierarchical structure into several smaller structures for training local learning models, global approach consumes the entire hierarchy of classes at once for training global learning model [3].

Moreover, recent research has demonstrated the ability of using convolutional neural networks (CNN) baseline model not only for image classification but for text classification [8], as well. Based on these observations, the author presents a novel solution to tackle hierarchical text classification problem with proposed hierarchical CNN models that reuses features maps and creates additional fully-connected layers hierarchically organized according to the applied hierarchical strategy.

Author conducted multiple experiments with improved CNN baseline models using different hierarchical approaches such as global all-in, local per node, local per parent node and local per level. The results achieved during the tests are aggregated and presented in this paper, in order to evaluate the performance and compare with reported performance achieved by flat baseline and hierarchical LR and SVM models, trained with the same 20Newsgroup dataset.

II. RELATED WORK

There are numerous works that focus on solving hierarchical text classification. As an example, well known top-down level-based SVM classification suggested by Sun and Lim [4]. Following the same path, Sokolov et al. [5] proposed the model for ontology terms forecast by explicitly simulating the construction hierarchy using kernel techniques for structured output. Cerri et al. [6] proposed an approach for hierarchical multi-label text classification that trains a multi-layer perceptron for each level of the classification hierarchy. Predictions created by a neural network in a given level serve as inputs to the neural network responsible for the forecast within the following level. Within the same domain, Kurata et al. [7] proposed a strategy for initializing neural networks hidden output by considering multi-label co-occurrence.

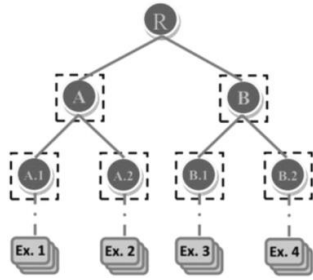


Fig. 2. Local classifier per node (LCN)

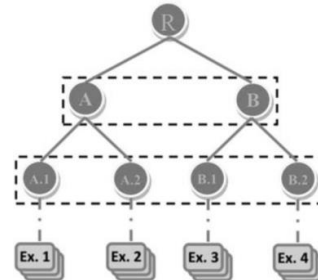


Fig. 1. Local classifier per level (LCL)

III. HIERARCHICAL CLASSIFICATION APPROACHES

Given, a hierarchy H defined over the output (label) space Y and a set of N training examples composed of pairs $D = \{(x(i), y(i))\}_{i=1}^N$, where $(x(i), y(i)) \in X \times Y$, the goal of the hierarchical classification is to learn a mapping function $f: X \in R^d \rightarrow Y$ that maps the inputs in the input space X to outputs in the output space Y , such that the function f is accurately able to predict the output y of an input instance x and generalizes well to data that is not observed during the training [INDIA-9].

A. Local Classification per Node Approach

Local Classification per Node (LCN) approach dictates that a binary classifier ψ_n is learned for each node $n \in \mathbb{N}$ except the root node R , in the hierarchy \mathcal{H} as demonstrated in Fig 1. The dashed squares represent the binary classifiers that are assembled into top-down manner execution.

The way the training of a binary classifier at a node performed is by feeding the model with positive and negative examples. In regards to LCN, all examples belonging to the n -th node itself and its descendants are considered as the positive training examples and those belonging to the n -th node siblings and their descendants as the negative examples.

The binary classifier is formulated in Eq. 1. As trying to minimize weight vectors for each label l , where $\lambda > 0$ is the

$$\sum_{i=1}^N \mathcal{L}(w_l, x(i), y(i)) + \lambda \|w_l\|_2^2 \quad (1)$$

penalty parameter, \mathcal{L} denotes the loss function such as hinge loss or logistic loss and $\|\cdot\|_2^2$ denotes the squared l_2 -norm.

In order to perform the prediction of an unknown test instance, the algorithm usually proceeds in the top-down fashion starting at the root and recursively selecting the best children till it reaches a terminal node that belongs to the set of leaf categories \mathcal{L} , which is the final predicted node.

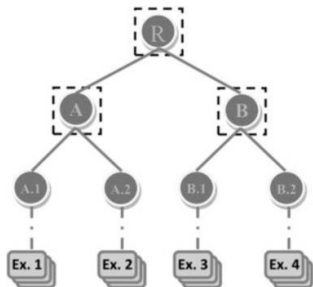


Fig. 3. Local classifier per parent node (LCPN)

B. Local Classification per Parent Node Approach

Local Classification per Parent Node (LCPN) approach dictates that a multi-class classifier is learned for each parent node $p \in \mathbb{N}$ in the hierarchy \mathcal{H} as shown in Fig. 2. The dashed squares in the figure represents multi-class classifiers.

Like local classifier per node approach, the goal of LCPN is to learn classifiers that can effectively discriminate between the siblings.

For training the classifier at each parent node N , we use the examples from its descendants where each of the children categories $C(N)$ of parent node N corresponds to different classes. The multi-class classifier is formulated as trying to minimize the weight vectors, where $\lambda > 0$ is the penalty parameter as formulate in Eq. 2, \mathcal{L} denotes the loss function such as hinge loss or logistic loss, ξ_i denotes the slack variables, and $\|\cdot\|_2^2$ denotes the squared l_2 -norm.

$$\begin{aligned} \text{minimize } & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i + \lambda \sum_{l=1}^L \|w_l\|_2^2 \quad (2) \\ & w_l^T x(i) - w_l^T x(i) \geq 1 - \xi_i, \\ & \forall l \in L - \{l_i\}, \forall i \in [1, 2, \dots, N], \\ & \xi_i \geq 0, \forall i \in [1, 2, \dots, N] \end{aligned}$$

C. Local Classification per Level Approach

Within this strategy, multi-class classifier is learned for every level in the hierarchy as shown at Fig. 3. For training the classifier at each level, the examples from nodes are utilized individually for each level along with its descendants.

Significant to note that the nodes at the identical level do not overlap and correspond to distinct classes. Prediction is performed by simply choosing the best node at each level in the hierarchy.

Since classifiers at each level make independent predictions, there is potential that this approach may result in vertical inconsistency prediction.

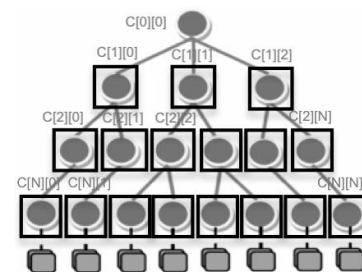


Fig. 4. Global All-In Hierarchical Approach.

D. Global Classification All-In Approach

The global hierarchical classification approach builds a single classification model, as illustrated in Fig. 4, for entire hierarchy as presented in the work of Klingbiel, Luhn, and Dattola [41, 42, 43]. This approach implies that the prediction may be performed at any level of hierarchy.

The main advantage of this approach is that there is no need to train a large number of classifiers and to deal with the inconsistency in the prediction of classes [44]. Its main disadvantage is the increased complexity on developing the global classifier [45].

IV. CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Convolution neural networks (CNN) has been adopted from computer vision field [18] and gained much of the respect among researches for consistent state of the art results, and been proven for its practical application for text classification similar results just with baseline settings of its hyperparameters [12].

Let $x_i \in \mathbb{R}^k$ be the k – dimensional word vector relevant to the i – th word in the sentence. A sentence of length n , maybe be padded if such required, is represented in Eq. 3.

$$x_{1:n} = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n \quad (3)$$

where \oplus is the concatenation operator. Furthermore, let $x_{i:i+j}$ refer to the concatenation of words $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+j}$. By applying a filter $w \in \mathbb{R}^{hk}$ in strides will define a convolution operation, which is applied to selected window of h terms to compute a new feature. Therefore, a feature c_i is produced for each window of words $x_{i:i+h-1}$ as depicted by Eq. 4.

$$c_i = f(w \cdot x_{i:i+h-1} + b) \quad (4)$$

Let $b \in \mathbb{R}$ be a bias and f some non-linear function, for example, the hyperbolic tangent or relu functions. Then a filter is used to stride through each possible window in the given sentence $\{x_{1:h}, x_{2:h+1}, \dots, x_{n-h+1:n}\}$ to create a feature map, such as $c = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_{n-h+1}]$, where $c \in \mathbb{R}^{n-h+1}$. Afterwards, a max-over-time pooling operation is applied over the set of feature map, in order to select a maximum value $C = \max\{c\}$ as the feature. The general idea is to be able to capture the most important set of features for all feature maps [13].

Above process describes how one feature is extracted from one filter. However, the model uses multiple filters, typically with varying window sizes, to extracted multiple features. Therefore, these features form next to the last layer that is directly followed by a fully connected softmax layer whose output is the probability distribution over labels.

A. Feature selection

One of the CNN advantages compared to other neural networks is that it is designed to extract features automatically from the given text corpora [14]. It does so by applying convolutional layers in specific predefined manner as it was described in the previous section. Therefore, such extracted

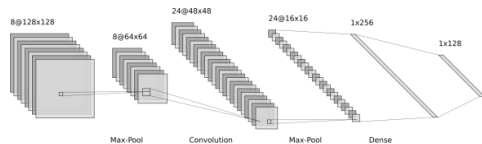


Fig. 6. Convolutional Neural Network Architecture

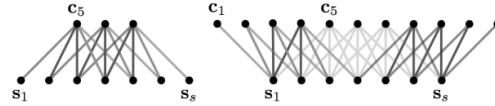


Fig. 5. Wide Convolutional Layers. Filter has size $m = 5$.

feature maps are more efficient than manually constructed, thus these maps are less error prone and assure a high level of the accuracy in capturing the most important details for given examples text data.

Generally speaking, the convolution layers could be considered as a feature extractor, whose output is then fed into a fully connected layer for a purpose of a simple decision making, such as classification or ranking. Because CNN created local features for each word in the sentence, it is possible to combine or stack features up to produce a global feature vector. In order to some major key points of the CNN ability to create and extract text features are:

- Internally creates features that can be extracted and used as input for another custom defined internal layers or external models.
- Automatically creates features that does not rely on handcrafted process. It adapts well to the specifics of the training dataset in supervised manner.

$$c_j = m^T s_{j-m+1:j} \quad (5)$$

- Hierarchy of local features are considering during feature creation; therefore, it captures well the context.

B. Convolution

An 1 – D convolution is an operation between a vector of weights m , there $m \in \mathbb{R}^m$ and a vector of input sequences s , there $s \in \mathbb{R}^s$. The vector m is the filter of the convolution. Considering s as the input sentence and $s_i \in \mathbb{R}$, is a single feature value associated with the i -th word in the sentence, then an 1 – D convolution produces the dot product of the vector m with each m -gram in the sentence s to obtain another sequence c as depicted by Eq. 5, which represents two possible types of convolution, such as narrow and wide, depending on the range of the index j .

The narrow type of convolution requires that $s \geq m$ and yields a sequence $c \in \mathbb{R}^{s-m+1}$ with j ranging from m to s .

The wide type of convolution does not constrain m nor s and yields a sequence $c \in \mathbb{R}^{s+m-1}$ where the index j ranges from 1 to $s + m - 1$. Values of s_j outside of the range are considered to be zero, where $i < 1$ or $i > s$.

The result of the narrow convolution is a subsequence of the result of the wide convolution. The two types of one-dimensional convolution are illustrated in Fig. 6. The trained weights in the filter m correspond to a linguistic feature that learns to recognize a particular class of n -grams. These n -grams have size $n \leq m$, where m is the width of the filter. Applying the weights m in a wide convolution has some advantages over applying them in a narrow one. A wide convolution ensures that all weights in the filter reach the entire sentence, including the words at the margins and paddings.

C. Fully-Connected Layer

Fully-connected (FC) layer contains neurons that have full connections to all activations in the preceding layer, similar to



Fig. 7. 20Newsgroup training dataset taxonomy.

multiple-perceptron. In order to calculate their activations a matrix multiplication with a bias offset is required. The neurons in the CONV layer are connected only to its local regions in the input and usually many of them do share parameters [15] in contrast with FC layer.

The dot products are computed for the neurons in both layers because of the same identity of their functional form. Therefore, FC and CONV layers are fully convertible from one layer to another, under the following conditions:

- FC layers compliments any CONV layer, if both have the same forward function. A large matrix that is contains mostly zeros except only for particular blocks because of the local regions with equal weights for many blocks due parameter sharing represents the weight matrix.
- any FC layer can be converted to a CONV layer, if both have the same filter size that corresponds to the size of the input volume.

V. EXPERIMENTAL SETUP

In this paper, we present results of a novel way of applying CNN model to solve hierarchical text classification task. We conduct experiments that implement hierarchical global all in approach and three hierarchical local approaches such as local classification per node (LCN), local classification per parent node (LCPN) and local classification per level (LCL).

In order to provide comprehensive assessment for application of CNN model for hierarchical text classification using global and local approaches, we conduct four independent experiments to observe, measure and compare recorded performance with existing solutions h-LR and h-SVM using the same training dataset.

A. Training dataset

The collection of News Group data set contains an average of 20,000 e-news from more than twenty different categories hierarchically ordered with three hierarchical levels. The size of the training data is 11314 and listed in Table 1.

B. CNN Variants

In our experiments we use two variants of the CNN baseline model that differ in initialization of embedding:

- CNN-rand – model learns embedding from the scratch.
- CNN-stat – model is initialized with pretrained word2vec.

C. Hyperparameters

- Optimizer – Adam optimizer is initialized with a learning rate of 0.001.

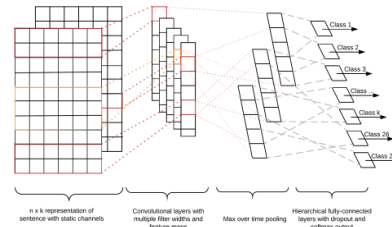


Fig. 8. Hierarchical CNN for Local per Node Classification.

- Batch sizes – 64, 128, 192.
- Embedding sizes – 128 as default, 256 and 300.
- CNN Filters – presented CNN model contains 3 convolutional layers, each layer has 3 different filters, where each filter has a size of 3, 4, 5 respectively.

VI. HIERARCHICAL CNN EXPERIMENTS

A. CNN with Local per Node Approach Experiment

Hierarchical local classification per node approach consists of a binary classifier, each classifier is built independently per each node. In this case, all categories listed in the Table 1, are considered as nodes.

Typically, a CNN is comprised of the multiple convolutional modules stacked on top of each other in order to perform extraction of the features from the text. The module itself is constructed from a convolutional layer followed by a pooling layer. The dense layers follow after the last convolutional module and could contain more dense layers that perform classification.

Therefore, in order to incorporate LCN approach it is required to modify the baseline model architecture to add additional dense layers connected with features maps to represent the rest of binary classifiers.

The model that is constructed to perform hierarchical local per node prediction is comprised of the set of 27 classifiers, trained for each selected node. The conceptual schema of the model is represented in Fig. 8. Furthermore, a binary one-vs-rest classifiers are trained for each node of the tree, which represents the hierarchy, except the root node.

In order to make a prediction, each classifier is called separately but the results are evaluated and processed in top-down ensemble, recursively traversing the hierarchical tree

TABLE I.
20NEWSGROUP TRAINING DATASET FOR LCN APPROACH

Category	Size	Category	Size
comp	2936	alt-atheism	480
comp.graphics	584	soc-religion	599
comp.os	591	sci	2373
comp.windows	593	sci.crypt	595
comp.sys	1168	sci.electronics	591
comp.sys.ibm	590	sci.med	594
comp.sys.mac	578	sci.space	593
rec	2389	talk	1952
rec.autos	594	talk.religion-misc	377
rec.motorcycles	598	talk.politics	1575
rec.sport	1197	talk.politics.guns	546
rec.sport.baseball	597	talk.politics.mideast	564
rec.sport.hockey	600	talk.politics.misc	465
misc-forsale	585	TOTAL	11314

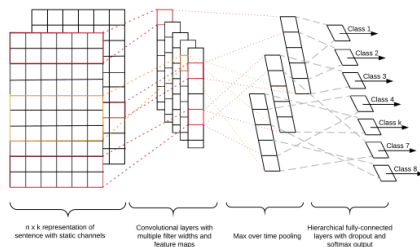


Fig. 10. Hierarchical CNN for Local per Parent Node

nodes, from the root down to the leaf nodes. The same setup is replicated with CNN-rand and CNN-stat variants.

B. CNN with Local per Parent Node Approach Experiment

Hierarchical local classifier per parent node is implemented as multi-class classifier for each parent node in the given taxonomy. Each classifier learns from subset of training data created in such a way that only examples that belong to the parent nodes and their descendant’s child nodes are selected as training examples.

We train eight independent multi-class CNN classifiers; each classifier represents a parent node including the ROOT node.

The final dense layer in CNN baseline contains a single node for each target class in the model. However, in order to represent LCPN approach using CNN baseline it is required to add additional fully-connected layers as part of the dense layer and wire them with the feature’s maps in such way that it would reflect exact hierarchical taxonomy of the training dataset selected for this experiment.

Because new training dataset comes with additional labeling as per LCPN requirement, this extra metadata enables to wire new dense layers with its feature’s maps, in the similar fashion CNN baseline model does it, which has only one dense layer wired to corresponding features maps and labeled training documents.

Original training dataset first needs to be preprocessed and organized in the way it reflects LCPN approach as listed in Table 2. The major key difference is that original training dataset does not contain additional labeling and grouping of documents according to new hierarchical structure which groups documents by parent nodes as defined by LCPN.

C. CNN with Local per Level Approach Experiment

Hierarchical Local Classification per Level (LCL) approach experiment uses CNN with custom classification module which implements several multi-class classifiers, in order to represent

TABLE III.
20NEWSGROUP TRAINING DATASET FOR LCPN APPROACH

Parent Node	Size	Classes
ROOT	11314	comp, rec, sci, talk, misc-forsale, alt-atheism, soc-religion
comp	2936	comp.graphics, comp.os, comp.windows, comp.sys
comp.sys	1168	comp.sys.ibm, comp.sys.mac
rec	2389	rec.autos, rec.motocycles, rec.sport
rec.sport	1197	rec.sport.baseball, rec.sport.hockey
sci	2373	sci.crypt, sci.electronics, sci.med, sci.space
talk	1952	talk.religion-misc, talk.politics
talk.politics	1575	talk.politics.guns, talk.politics.mideast, talk.politics.misc

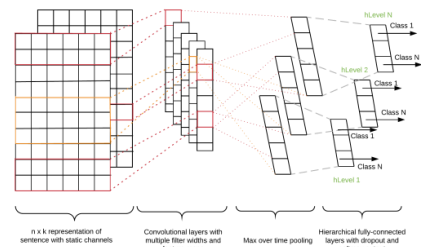


Fig. 9. Hierarchical CNN for Local per Level Classification

hierarchical levels of the training dataset, which categories are outlined in Table 3. The taxonomy of 20Newsgroup training dataset is preprocessed and relabeled in such way that each categorical level of tree contains only nodes belonging to a certain hierarchical level and its descendants.

Conceptual diagram of the hierarchical CNN model for LCL approach is illustrated in Fig. 6. It can be observed that this model implements only 3 multi-class classifiers, each classifier represents exactly one of the hierarchical levels, as listed in Table 3, in such way that that is no overlap among categories and different levels.

The final dense layer in CNN baseline contains a single node for each target class in the model. However, in order to represent LCL approach using CNN baseline model it is required to implement 3 fully-connected.

According to LCL approach the categories are grouped by the levels of the hierarchical. Original 20Newsgroup training dataset is preprocessed in such way that new dataset hierarchy is generated accordingly the Table 3.

The training of the level-based classifier is performed by feeding the model with examples from the descendant’s nodes belonging to its level-based node. A prediction evaluation is performed in top-down fashion, starting from the first level and iterating through the rest of the remaining levels until bottom is reached. Prediction score resulted from traversing each level represents a probability score that evaluated document belongs to one of the classes implemented by the classifier.

D. CNN with Global All-In Approach Experiment

Hierarchical global all-in approach is implemented as multi class classifier that consumes entire taxonomy at once. Because the higher level of the taxonomy represents more generalized levels it is required to preprocess training data in order to relabel existing examples with additional references to the parent

TABLE II.
20NEWSGROUP TRAINING DATASET FOR LCL APPROACH

L	Category	Size	L	Category	Size
1	comp	2936	1	alt-atheism	480
2	comp.graphics	584	1	soc-religion-christian	599
2	comp.os	591	1	sci	2373
2	comp.sys	1168	2	sci.crypt	595
2	comp.windows	593	2	sci.electronics	591
3	comp.sys.ibm	590	2	sci.med	594
3	comp.sys.mac	578	2	sci.space	593
1	rec	2389	1	talk	1952
2	rec.autos	594	2	talk.religion-misc	377
2	rec.motocycles	598	2	talk.politics	1575
2	rec.sport	1197	3	talk.politics.guns	546
3	rec.sport.baseball	597	3	talk.politics.mideast	564
3	rec.sport.hockey	600	3	talk.politics.misc	465
1	misc-forsale	585			

TABLE V.
hF₁ score COMPARISON OF HIERARCHICAL LCN APPROACH
USING CNN-RAND AND CNN-STAT WITH H-LR AND H-SVM.

Dataset Size	h-LR	h-SVM	CNN-rand	CNN-stat
1000	0.659	0.761	0.632	0.733
2000	0.722	0.812	0.635	0.735
3000	0.767	0.826	0.645	0.745
4000	0.772	0.831	0.685	0.755
5000	0.777	0.839	0.693	0.753
6000	0.789	0.845	0.747	0.794
7000	0.793	0.811	0.778	0.799
8000	0.800	0.832	0.798	0.801
9000	0.801	0.844	0.799	0.809
10500	0.811	0.854	0.800	0.811
11314	0.804	0.866	0.801	0.808

nodes.

All the global approaches can directly output a subset of the hierarchy as prediction in the testing phase. Thus, the prediction time of the global approach is smaller than the flat and the top-down approaches. However, a major drawback of the global approach is that it may be difficult to model complicated relations among categories in a single classification model.

We train one multi-class CNN model classifier with preprocessed re-labeled training data. At its core, it resembles CNN baseline model. The dense layer of the convolutional module implements multi-class classifier which perform classification on the features extracted by the convolutional layers and downsampled by the pooling layers. In a dense layer, every node in the layer is connected to every node in the preceding layer. The same dataset

For training CNN Global All-In hierarchical model, original 20Newsgroup training dataset is preprocessed and relabeled. As a key result of this procedure, the dataset category size increases due to newly created labeling for the inner nodes, these are the nodes located between root level and level with leaf nodes. Therefore, the final set of categories model has to learn is 28, these are all LCN labels and root node.

VII. EVALUATION OF EXPERIMENTAL RESULTS

There are four types of conducted experiments, each corresponds to particular hierarchical approach such as LCN, LCPN, LCL and Global. To better understand performance of hierarchical text classification using CNN model, multiple variants of experiments within main four types are performed. Single experiment variant contains unique configuration which represents experiment specific set of control attributes and neural network specific hyper-parameters.

E. CNN with Local per Node Results

The results of hierarchical text classification using hierarchical CNN with LCN approach is presented in Table 4. We observe that different variation of examples with different dataset sizes selection do have direct impact on the accuracy of the binary classifier. It requires some additional effort during pre-processing phase needed for preparing positive and negative training examples arbitrary selected from the dataset. Moreover, orchestrating top-down prediction execution requires evaluation of the final prediction to be proceeded in a node chained manner emulating the path of hierarchical taxonomy.

Based on the outcome of the classification, it is noticeable,

TABLE IV.
hF₁ score COMPARISON OF HIERARCHICAL LCPN APPROACH
USING CNN-RAND AND CNN-STAT WITH H-LR AND H-SVM.

Dataset Size	h-LR	h-SVM	CNN-rand	CNN-stat
1000	0.659	0.761	0.662	0.722
2000	0.722	0.812	0.665	0.736
3000	0.767	0.826	0.665	0.749
4000	0.772	0.831	0.685	0.765
5000	0.777	0.839	0.693	0.803
6000	0.789	0.845	0.787	0.834
7000	0.793	0.811	0.798	0.889
8000	0.800	0.832	0.848	0.899
9000	0.801	0.844	0.879	0.901
10500	0.811	0.854	0.896	0.908
11314	0.804	0.866	0.902	0.905

that smaller size of training dataset result in lower hF1 score. For example, with the training dataset size of 1000 documents, measured performance of CNN-rand is 0.632 and CNN-stat is 0.733. In contrary, the training dataset with maximum available size of 11314 needed to train CNN-rand model in order to achieve the highest possible hF1 0.801 score and for CNN-stat achieves the best performance hF1 0.811 score with slightly less training dataset size of 10500 documents. It is important to mention that CNN-stat performance degrades if model is trained with entire dataset size of 11314 documents, probably due to overfitting.

The best results achieved by h-LR and h-SVM using LCN approach is 0.811 with the training dataset size of 10500 and 0.866 with the size of 11314, respectively. By comparing the performance of proposed CNN-rand and CNN-stat models with h-LR and h-SVM models using hierarchical local classification per node strategy, it is observable that proposed approach underperforms.

F. CNN with Local per Parent Node Results

The results of LCPN approach are listed in Table 5. On comparing the performance of proposed CNN-rand and CNN-stat models with h-LR and h-SVM models, using the same hierarchical local classification per parent node strategy, the former achieves better results than latter.

We find that the best hF1 performance achieved by CNN-stat model is 0.908 and the second best hF1 performance achieved by CNN-rand model is 0.902. The former model is trained with dataset size of 10500 documents and the latter model required slightly larger dataset with size of 11314 documents. The best results achieved by h-LR and h-SVM using LCPN approach is 0.812 trained with dataset size of

TABLE VI.
hF₁ score COMPARISON OF HIERARCHICAL LCL APPROACH
USING CNN-RAND AND CNN-STAT WITH H-LR AND H-SVM.

Dataset Size	h-LR	h-SVM	CNN-rand	CNN-stat
1000	0.659	0.761	0.722	0.725
2000	0.722	0.812	0.732	0.746
3000	0.767	0.826	0.765	0.799
4000	0.772	0.831	0.785	0.805
5000	0.777	0.839	0.793	0.833
6000	0.789	0.845	0.802	0.804
7000	0.793	0.811	0.850	0.880
8000	0.800	0.832	0.876	0.890
9000	0.801	0.844	0.899	0.911
10500	0.811	0.854	0.894	0.910
11314	0.804	0.866	0.901	0.911

TABLE VII.
hF₁ score COMPARISON OF HIERARCHICAL GLOBAL APPROACH USING CNN-RAND AND CNN-STAT WITH h-LR AND h-SVM.

Dataset Size	h-LR	h-SVM	CNN-rand	CNN-stat
1000	0.659	0.761	0.813	0.833
2000	0.722	0.812	0.817	0.835
3000	0.767	0.826	0.801	0.845
4000	0.772	0.831	0.811	0.855
5000	0.777	0.839	0.823	0.853
6000	0.789	0.845	0.802	0.904
7000	0.793	0.811	0.812	0.911
8000	0.800	0.832	0.908	0.917
9000	0.801	0.844	0.911	0.915
10500	0.811	0.854	0.918	0.920
11314	0.804	0.866	0.917	0.921

10500 and 0.869 with the training dataset size of 11314, respectively.

G. CNN with Local per Level Results

The results of hierarchical text classification using LCL approach are listed in Table 6. On comparing the performance of proposed hierarchical CNN with h-LR and h-SVM models implementing local classification per level strategy, the former model achieves better results than two latter models.

We find that the best hF1 performance achieved by CNN-stat model is 0.911 and the second best hF1 performance achieved by CNN-rand model is 0.906, both models are trained with maximum available dataset size of 11314 documents.

The best results achieved by h-LR and h-SVM using LCL approach is only 0.811 trained with dataset size of 10500 and 0.866 with the training dataset size of 11314, respectively.

H. CNN with Global All-In Results

The results of Global approach are listed in Table 7. By comparing the performance of proposed CNN-rand and CNN-stat models with h-LR and h-SVM models, using the same hierarchical global classification strategy, the former achieves better results than latter.

We find that the best performance, measured as hF1 score, achieved by CNN-stat model is 0.921 and the second-best performance is 0.918 achieved by CNN-rand, both models are trained with dataset size of 10500 documents.

The best results achieved by h-LR and h-SVM using global approach measured as hF1 is 0.817 and 0.867, both models trained with the training dataset size of 11314 documents, respectively.

Based on the comparison of the experimental results, the CNN-stat model with pretrained word2vec word embedding using LCPN, LCL and Global approaches achieves better performance than CNN-rand with LCN approach, h-LR and h-SVM using LCPN, LCL and Global approaches.

TABLE VIII.
hF₁ score AND HYPERPARAMETERS SETTING.

Batch Size	LCN CNN-stat	LCPN CNN-stat	LCL CNN-stat	GCA CNN-stat	Embed. Size
64	0.801	0.899	0.890	0.912	256
196	0.809	0.901	0.901	0.904	300
128	0.811	0.908	0.906	0.918	256
128	0.808	0.905	0.911	0.921	128

VIII. CONCLUSION

The author conducted multiple experiments applying local hierarchical classification approaches using top-down prediction ensemble method and global hierarchical classification approach using all-in prediction ensemble method.

Upon the empirical observations of CNN with Global Classification All-In (GCA) approach, it is concluded that this approach achieves the highest results and tends to be the least complex among all other.

When comparing GCA and h-LR and h-SVM, we observe that GCA outperforms h-LR and h-SVM by 12% and 5% as listed in Table 7.

According to the results of the experiments, the CNN GCA outperforms LCN, LCPN, LCL by 14%, 2% and 1% as listed in Table 8.

Empirical observations of the experiments with proposed modifications of CNN baseline model designed to more closely represent structured class hierarchy of a given classification taxonomy. It was demonstrated that such modified CNN architecture obtains an additional ability to perform hierarchical type of classification with high performance.

II. REFERENCES

- [1] A. Zimek, F. Buchwald, E. Frank, S. Kramer, "A study of hierarchical and flat classification of proteins" in *IEEE/ACM Trans Computational Biology and Bioinformatics* 7(3), pp.563-571, 2010.
- [2] R. Babbar, I. Partalas, E. Gaussier, M. Amini, "On flat versus hierarchical classification in large-scale taxonomies" in *NIPS'13 Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 2*, pp.1824-1832, 2013.
- [3] L. Cai, T. Hofmann, "Hierarchical document categorization with support vector machines" in *CIKM04*, pp. 78-87, November 2004.
- [4] A. Sun, E. Lim, W. Ng, "Performance Measurement Framework for Hierarchical Text Classification" in *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 54(11), pp.1014-1028, September 2003.
- [5] A. Sokolov, C. Funk, K. Graim, K. Verspoor, A. Ben-Hur, "Combining heterogeneous data sources for accurate functional annotation of proteins" in *BMC bioinformatics* 14(3): S10, 2013
- [6] R. Cerri, R. C Barros, A. CPLF De Carvalho, "Hierarchical multi-label classification using local neural networks" in *Journal of Computer and System Sciences* 80(1), pp.39-56, 2014.
- [7] G. Kurata, B. Xiang, B. Zhou, "Improved neural network-based multi-label classification with better initialization leveraging label cooccurrence" in *Proceedings of NAACL-HLT*, pp.521-526, 2016.
- [8] Y. Kim, "Convolutional Neural Networks for Sentence Classification" in *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2014.

Analýza vlastností experimentálneho hybridného FSO/RF systému

Michal Márton

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
michal.marton@tuke.sk

Ľuboš Ovseník

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
lubos.ovsenik@tuke.sk

Abstrakt— V súčasnej dobe rastú požiadavky na dostupnosť online služieb v každom čase. Rozvoj v oblasti informačných technológií umožnil digitalizáciu informačného obsahu v širokom rozsahu, čo sa premietlo vo veľkej miere v prenosových systémoch. Potreba dostupnosti vždy aktuálnych informácií v každom čase sa stala realizovateľnou prostredníctvom objavy využitia optického vlákna ako prenosového média. Vysoká rýchlosť prenosu, bezpečnosť a stabilita spojenia za každých podmienok je len pár z mnohých výhod optických vláknových systémov. Myšlienka nahradiť optické vlákno ako prenosové médium za voľné prostredie tu bola už veľmi dávno, avšak len v nedávnej minulosti sa pristúpilo k jej realizácii. Systém využívajúci prenos optických lúčov prostredníctvom voľného prostredia za účelom prenosu informácií sa nazýva FSO (Free Space Optics). Zlé poveternostné podmienky vytvárajú rušenie, ktoré utlmuje prenášaný optický signál. Riešenie ponúka hybridný FSO/RF systém, ktorý kombinuje výhody primárnej optickej linky so záložnou RF (Radio Frequency) linkou.

KLúčové slová— FSO systém, hybridný FSO/RF systém, optický prenosový systém, RF systém

Abstract— The requirements for every time availability of services are still growing. Development in area of information technologies allows digitalization of content in large scope which is significantly affects in transmission systems. Demands placed on availability of information in real time and could be fulfilled through invention of optical fiber as transmission medium. High speed of transmission, security and stability of connection for each time are only several advantages of optical transmission systems. Idea of usage of free space represented by atmospheric channel as transmission medium was known many years ago but the implementation was realized recently. System which transmits optical beams through free space is known as FSO (Free Space Optics). Attenuation of transmission optical signal is caused by bad weather conditions. Solution is offered by hybrid FSO/RF system, which combines primary optical link with backup RF (Radio Frequency) link.

Key words— FSO system, hybrid FSO/RF system, optical fiber system, RF system

I. ÚVOD

V súčasnosti žijeme v digitálnej dobe, kde sa najvyšší dôraz kladie na splnenie neustále narastajúcich požiadaviek používateľov, a to na dostupnosť vysokorýchlostného pripojenia. Nemenej dôležitým faktorom je úroveň

bezpečnosti, ktorá musí byť dosiahnutá. Zamedzeniu vzniku odposluchu komunikácie je veľmi náročné nakoľko signály šírené voľným prostredím môžu byť zachytené, avšak problém je dešifrovanie, ktoré je žiaľ použitím robustných metód možné prelomiť. Riešenie ponúkajú optické prenosové systémy. Optické vláknové prenosové systémy prenášajú optické lúče prostredníctvom optických vlákien. Ak uvažujeme možnosť prípadného odposluchu musí byť optický lúč fyzicky prerušený, pričom dochádza pri jeho opakovanom vyslaní útočníkom oneskorenie, ktoré je detekovateľné. Túto výnimočnú vlastnosť garantujúcu vysokú úroveň bezpečnosti si zachovali aj optické komunikačné systémy bez nutnosti využitia fyzických optických vlákien. Aj napriek značnému počtu výhod (vysoká prenosová rýchlosť, vysoká úroveň bezpečnosti, krátka doba vytvorenia spojenia, ...) optických bezvláknových prenosových systémov majú tieto systémy jednu významnú nevýhodu, ktorú nie je možné ignorovať. Atmosférický prenosový kanál je využívaný na prenos optických lúčov, čo sa nechceme prejaví na útlme na prenosovej trase. Vplyv počasia na prenosové podmienky je nezanedbateľný. Preto je nevyhnutné vytvoriť taký systém, ktorý bude schopný minimalizovať negatívne vlastnosti optimalizovaného systému.

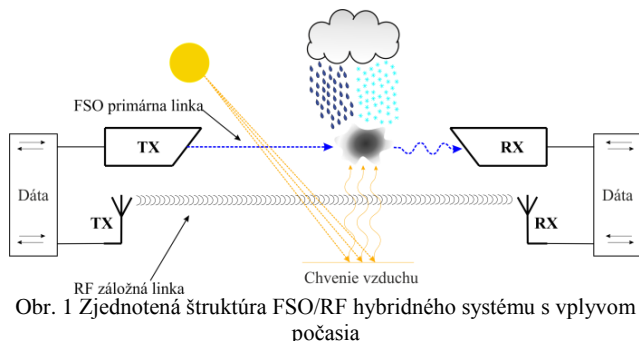
II. FSO/RF HYBRIDNÝ SYSTÉM

FSO/RF hybridný systém je založený na primárnej optickej linke prostredníctvom, ktorej je realizovaný prenos dát. V prípade nedostupnosti primárnej optickej linky zapríčinennej zhoršením poveternostných podmienok dochádza k prepnutiu komunikácie a dáta sú šírené prostredníctvom RF linky. Existujú dve metódy prepínania: mäkké a tvrdé. V prípade využitia mäkkého prepínania sú na prenos využívané ako primárna optická linka, tak ako aj záložná RF linka. Tento systém nie je veľmi efektívny z pohľadu energetickej bilancie spojenia. Tvrdé prepnutie je založené na využití záložnej linky len pre prípad, kedy komunikácia prostredníctvom primárnej optickej linky nie je možná resp. je očakávaný výpadok spojenia na tejto linke v krátkom okamihu. Toto riešenie ponúka vyššiu úroveň bezpečnosti nakoľko sa minimalizuje použitie zraniteľnejšej RF záložnej linky. Metóda tvrdého prepínania pre FSO/RF hybridný systém na základe získaných dát o počasí na ktorých bolo aplikované strojové učenie bolo publikované v [1]. Senzorický systém určený na zber údajov o počasí, na ktoré je aplikované

strojové učenie za účelom nastavenia rozhodovania o tvrdom prepnutí FSO/RF hybridnom systéme bolo publikované v [2].

Pre záložný RF systém boli navrhnuté viaceré typy antén, pričom všetky dosiahnuté výsledky boli prezentované na medzinárodných konferenciách a následne publikované v svetovo významných vedeckých periodikách [3]-[9].

Štruktúra hybridného FSO/RF systému je založená na primárnej optickej prenosovej linke, ktorá je vytvorená prostredníctvom jedného páru optických hlavíc (spojenie typu bod-bod) a záložnej linky tvorenej párom RF antén. Zjednodušená štruktúra (half duplex) FSO/RF hybridného systému so znázornenými vplyvmi počasia je zobrazená na Obr. 1.



Obr. 1 Zjednotená štruktúra FSO/RF hybridného systému s vplyvom počasia

Vplyv počasia na prenosový systém je markantný a bol predmetom mnohých štúdií [10]-[12]. Rôzne prístupy realizovania prepínaní analyzovali pracovné skupiny [13]-[15]. Pokusy o zvýšenie dostupnosti optického bezvláknového prenosového systému boli publikované v [16]-[18].

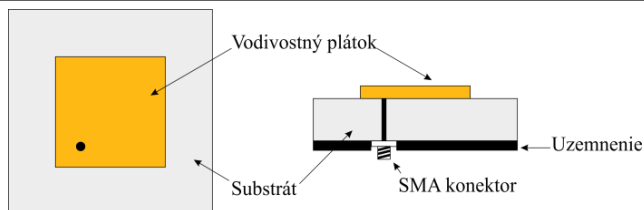
III. MIKROPÁSIKOVÉ ANTÉNY

Za účelom zvýšenia dostupnosti optického prenosového systému prostredníctvom RF záložnej linky boli analyzované viaceré typy antén. Z týchto analýz vyplynul ako najvhodnejší typ mikropáskovej antény, ktorej návrhom bude venovaný tento článok. Medzi rozhodujúce faktory, ktoré rozhodli o zvolení mikropáskových antén sú ich jednoduchá výroba, malá veľkosť, nízka cena, vysoká mieru integrovateľnosti pre aplikácie v mikrovlnových obvodoch, relatívne jednoduché napájanie a nenáročné nasadzovanie antén do sústavy antén tvoriacich anténne polia [19]-[22].

Mikropáskové antény sú charakteristické širokou možnosťou možností napájania. Medzi základné typy možných napájaní patria:

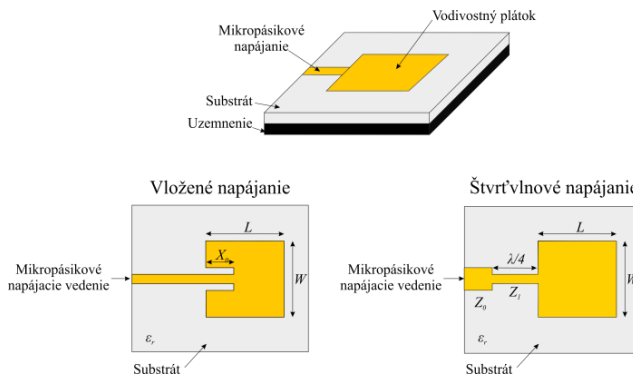
- napájanie prostredníctvom koaxiálneho vedenia,
- napájanie prostredníctvom mikropáskového vedenia,
- štrbinové napájanie,
- napájania realizované prostredníctvom väzby.

Na Obr. 2 sú zobrazené umiestnenie napájacieho portu pre mikropáskovú anténu a použitie SMA (SubMiniature version A) konektora pre umožnenie pripojenia prostredníctvom koaxiálneho vodiča [23].



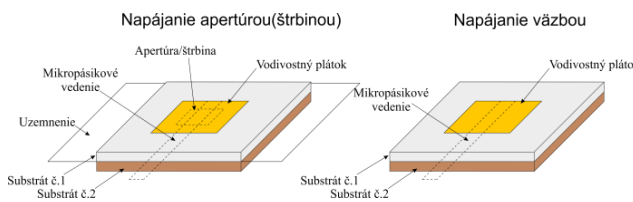
Obr. 2 Umiestnenie napájacieho portu pre mikropáskovú anténu

Na Obr. 3 je znázornené napájanie mikropáskovej antény prostredníctvom mikropáskového vedenia [24].



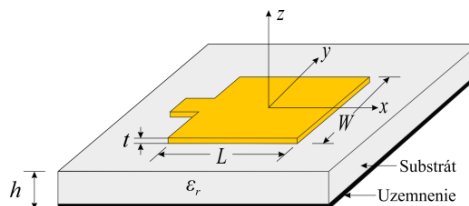
Obr. 3 Napájanie prostredníctvom mikropáskového vedenia

Napájanie realizované prostredníctvom apertúry a väzby je zobrazené na Obr. 4 [25].



Obr. 4 Napájanie mikropáskovej antény prostredníctvom apertúry a väzby

Parametre mikropáskovej antény sú zobrazené na Obr. 5. Premenné označujúce tieto parametre sú definované prostredníctvom Tabuľka 1. Rozhodujúcim parametrom je dielektrická konštanta substrátu, ktorého obe strany obsahujú vodivú plošku. Parametre určujúce impedančné prispôsobenie sú dĺžka a šírka vodivej plôšky [26].

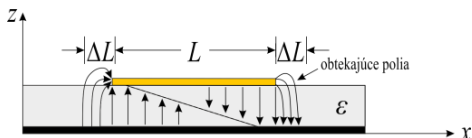


Obr. 5 Parametre mikropáskovej antény

Tabuľka 1 Parametre modelu mikropásikovej antény

Označenie	Parameter
ϵ_r	dielektrická konštanta substrátu
h	výška dielektrického substrátu
t	hrúbka vodivej plôšky
W	šírka vodivej plôšky
L	dĺžka vodivej plôšky
W_g	šírka substrátu a uzemnenia
L_g	dĺžka substrátu a uzemnenia
f_0	pracovná frekvencia

Rozloženie toku energie vyjadrené prostredníctvom siločiar elektrického poľa zobrazených v reze mikropásikovej antény je znázornené na Obr. 6 [27]-[29].



Obr. 6 Rozloženie siločiar elektrického poľa

Pre každý zvolený typ napájania sú definované iné vzťahy prostredníctvom, ktorých je možné určiť výsledné rozmery navrhutej mikropásikovej antény s dosiahnutím požadovaných hodnôt [30]-[32]. Šírku vodivej plôšky (W) je daná ako

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

Efektívnu hodnotu dielektrickej konštanty substrátu ϵ_{reff} definujeme nasledovne:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}, \quad (2)$$

potom efektívnu dĺžku L_{eff} vyjadríme:

$$L_{eff} = \frac{c}{2 f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}}, \quad (3)$$

dĺžku olemovania ΔL následne vyjadríme ako:

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} - 0,8 \right)}. \quad (4)$$

Dĺžka vodivej plôšky L je daná

$$L = L_{eff} - 2\Delta L, \quad (5)$$

následne dĺžku substrátu a uzemňovacej plochy môžeme určiť ako:

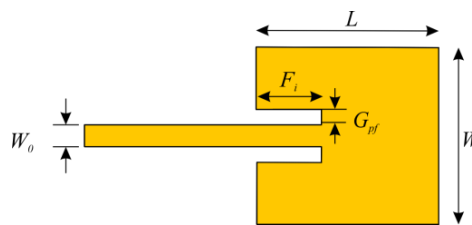
$$L_g = 2L, \quad (6)$$

potom šírka substrátu a uzemňovacej plochy je daná nasledujúcim vzťahom:

$$W_g = 2W. \quad (7)$$

Vzťahy (1) až (7) sú nevyhnutné k získaniu hodnôt parametrov navrhovanej mikropásikovej antény.

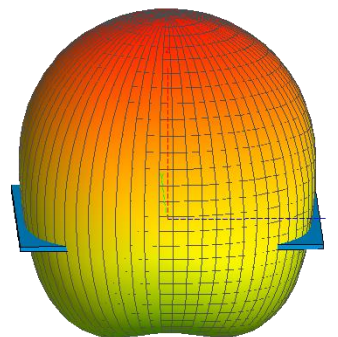
Pri uvažovaní napájania prostredníctvom mikropásikového napájacieho vedenia Z_c a impedančným prispôbením 50Ω je nevyhnutné optimalizovať veľkosť parametra reprezentujúceho šírku vodivej plôšky W. Napájanie realizované prostredníctvom mikropásikového vedenia Z_c je zobrazené na Obr. 7.



Obr. 7 Napájanie vodivej plôšky mikropásikovým vedením

IV. NÁVRH ANTÉNNEHO POĽA MIKROPÁSIKOVÝCH ANTÉN

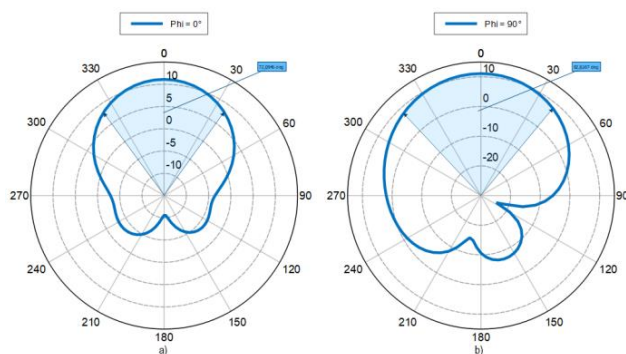
S ohľadom na vyššie uvedené vlastnosti mikropásikových antén a prechádzajúce návrhy rôznych typov antén bol zvolený ako najoptimálnejšie riešenie model anténneho poľa mikropásikových antén, ktorý ponúkne zvýšenie smerových vlastností mikropásikových antén. Najväčšia nevýhoda mikropásikových antén je nízka hodnota zisku, ktorý môže byť navýšený umiestnením viacerých antén do poľa [35][33].



Obr. 8 Vyžarovacia charakteristika navrhnutého poľa

Vyžarovacia charakteristika v 3D zobrazení získaná prostredníctvom simulácie v prostredí FEKO je zobrazená na Obr. 8.

Na Obr. 9 je zobrazená zmena vyžarovacej charakteristiky pri dvoch rôznych rezoch uhla Φ a hodnota vyžarovacieho uhla pri poklese výkonu o -3dB. Časť a) zobrazuje rez vyžarovacou charakteristikou a hodnotu vyžarovacieho uhla pri poklese výkonu o -3dB pri uhle $\Phi = 0^\circ$. Časť b) zobrazuje rez vyžarovacou charakteristikou a hodnotu vyžarovacieho uhla pri poklese výkonu o -3dB pri uhle $\Phi = 90^\circ$.



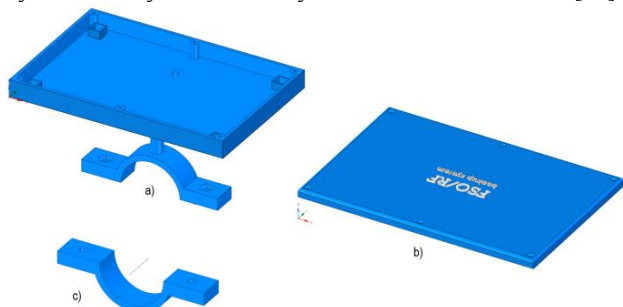
Obr. 9 Zmena vyžarovacej charakteristiky modelu pri dvoch rôznych hodnotách uhla Φ

Hodnoty získané prostredníctvom simulácie navrhnutého anténneho poľa mikropásikových antén sú uvedené v Tabuľka 2.

Tabuľka 2 Hodnoty navrhnutého anténneho poľa získané prostredníctvom simulácie

Zisk (dBi)	Vyžarovací uhol P = -3dB, $\phi = 0^\circ$ (°)	Vyžarovací uhol P = -3dB, $\phi = 90^\circ$ (°)
11,8838	72,0946	82,8107

Aby bolo možné využitie navrhnutého anténneho poľa v exteriéri ako časť záložnej linky musel byť navrhnutý prototyp anténneho boxu, ktorý by zabezpečil maximálne krytie. Tento navrhnutý prototyp bol vytvorený prostredníctvom 3D tlače, pričom materiál bol zvolený s ohľadom na dielektrické vlastnosti materiálov používaných pri 3D tlači tak, aby nedochádzalo k masívnemu tlmeniu vyžiareného výkonu. Hodnoty materiálov boli získané z [34].

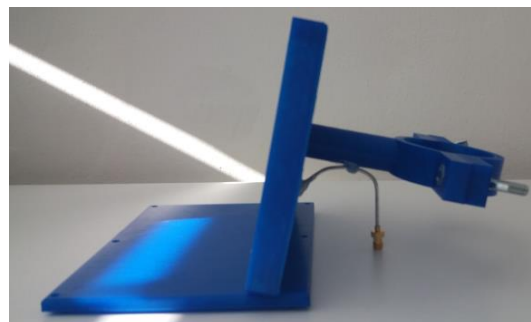


Obr. 10 Rozložený model navrhnutého obalu

Na Obr. 10 je zobrazený prototyp modelu anténneho boxu. Tento model sa skladá z troch častí:

- box pre anténu s integrovaným držiakom,
- kryt boxu pre anténu,
- druhá časť objímky držiaka.

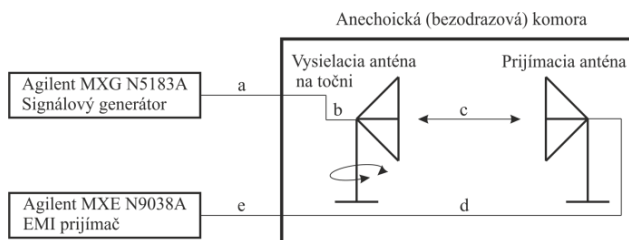
Vytvorené anténne pole mikropásikových antén vo vyrobenom prototypu anténneho boxu zabezpečujúceho maximálne krytie s konektorom typu SMA je zobrazené na Obr. 11.



Obr. 11 Bočný pohľad na anténu umiestnenú v boxe s SMA konektorom

V. MERANIE VYŽAROVACEJ CHARAKTERISTIKY ANTÉNNÉHO POEA MIKROPÁSIKOVÝCH ANTÉN

Meranie vyžarovacej charakteristiky patrí medzi základné metódy získavania poznatkov o smerových vlastnostiach meranej antény. Za účelom dosiahnutia čo najvyššej presnosti meraných výsledkov bolo meranie realizované v anechoickej (bez odrazovej) komore. Meranie prebiehalo podľa navrhnutého zapojenia pre experimentálne meranie zobrazené na Obr. 12.



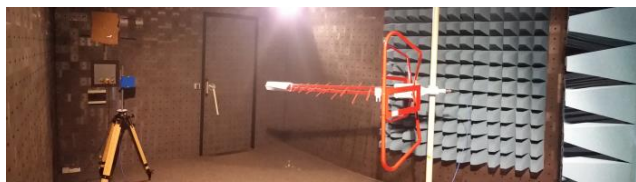
Obr. 12 Schéma zapojenia pre meranie vyžarovacej charakteristiky v anechoickej komore

Prehľad dĺžok jednotlivých použitých prepojovacích vodičov zobrazených na Obr. 12 je uvedený v Tabuľka 3.

Tabuľka 3 Dĺžky použitých vzdialeností podľa schematického zapojenia

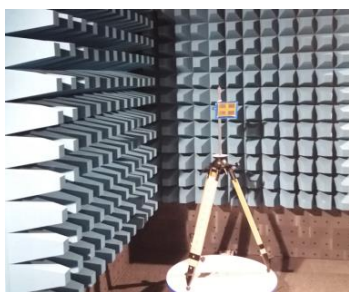
Označenie v schéme	Dĺžka vodiča (m)
a	2,5
b	1,5
c	1,77
d	5
e	3

Experimentálne meranie realizované podľa navrhnutého zapojenia je zobrazené na Obr. 13.



Obr. 13 Zapojenie antén v anechoickej komore za účelom merania vyžarovacej charakteristiky

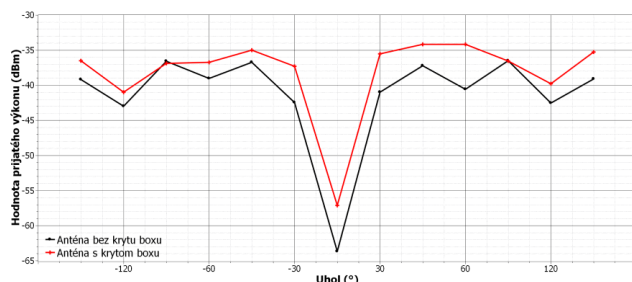
S ohľadom na recipročné vlastnosti antén je možné pozície oboch antén zameniť. Zmena pozície meranej antény je zobrazená na Obr. 14.



Obr. 14 Umiestnenie meranej antény v anechoickej komore

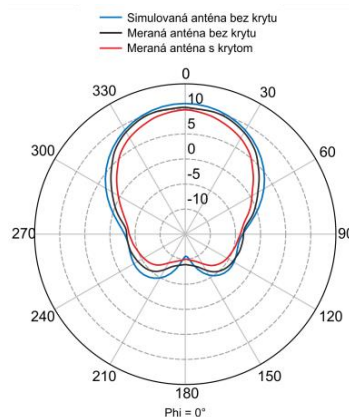
Experimentálne meranie vyžarovacej charakteristiky nebolo založené len na získanie hodnôt maximálneho prijatého výkonu prijímacou anténou, ale aj na skúmanie vplyvu uzatvoreného prototypu anténneho boxu na zmenu vyžiareného výkonu anténou a tým vznik tlmenia anténnym boxom. Prvé meranie bolo realizované bez uzatvorenia anténneho boxu a vysielacia anténa bola otáčaná prostredníctvom otočného stojanu, pričom boli zaznamenané pre každú zvolenú pozíciu uhla natočenia. Druhý scenár mal rovnaký priebeh pre rovnaký rozsah zvolených meraných uhlov, avšak merané anténne pole bolo uzatvorené vo vyrobenom prototypu anténneho boxu.

Na Obr. 15 je možné vidieť porovnanie nameraných hodnôt prijatého výkonu pre oba experimentálne scenáre.



Obr. 15 Porovnanie prijatého výkonu pri použití antény bez a s krytom boxu

Porovnanie vyžarovacích charakteristík získaných prostredníctvom dvoch experimentálnych meraní a simulácie je zobrazené na Obr. 16.



Obr. 16 Porovnanie získaných vyžarovacích charakteristík skúmanej antény

Zobrazenie implementovanej navrhutej antény zapuzdrenej v anténnom boxe do FSO/RF hybridného systému je možné vidieť na Obr. 17.



Obr. 17 Ukážka umiestnenia antény zapuzdrenej v boxe

VI. ZÁVER

Navrhnuté antény pole mikropásikových antén bolo vytvorené za účelom zvýšenia dostupnosti FSO/RF hybridného systému krátkého dosahu (do 200m) ako súčasť záložnej linky. Prepínanie nášho systému je uvažované prostredníctvom metódy tvrdého prepnutia spojenia len v prípade, kedy hrozí výpadok spojenia v krátkom čase. Toto prepnutie je zabezpečené na čo najnižšej vrstve tak, aby nedochádzalo k nežiadúcemu oneskoreniu. Predikcia výpadku je realizovaná prostredníctvom strojového učenia aplikovaného na dáta zozbierané nami navrhnutým senzorickým systémom určeným na monitorovanie parametrov počasia v reálnom čase. Táto implementácia umožní zvýšiť dostupnosť skúmaného systému.

POĎAKOVANIE

Táto publikácia vznikla za podpory projektu APVV-17-0208 – Odolné mobilné siete na doručovanie obsahu.

LITERATÚRA

- [1] J. Tóth, E. Ovseník, J. Turán, L. Michaeli, M. Márton, „Classification prediction analysis of RSSI parameter in hard switching process for FSO/RF systems“ Measurement, vol. 116, pp. 602-610, doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.044
- [2] M. Márton, E. Ovseník, M. Špes, T. Huszaník, „Analysis of possibilities for measurement effect of visibility in experimental FSO system“, Open Computer Science, vol. 8, no. 1, p. 135-141. - ISSN 2299-1093, 2018.
- [3] M. Márton, E. Ovseník, J. Turán, M. Špes, J. Urbanský, „Comparison of Microstrip Patch Antennas with Different Materials Operating on 2.46GHz for FSO/RF Hybrid System“, ICCC 2019 : 20th International Carpathian Control Conference (ICCC). - Danvers (USA) : IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, p. 1-4, ISBN 978-1-7281-0701-1, 2019.
- [4] M. Márton, E. Ovseník, J. Turán, M. Špes, J. Urbanský, „Comparison of helix antennas operated on 2.4,5.2 and 9.2GHz for FSORF hybrid system“, Radioelektronika 2019 : 29th International conference. - Pardubice (Česko) : Univerzita Pardubice, p. 300-303, ISBN 978-1-5386-9321-6, 2019.
- [5] M. Márton, E. Ovseník, J. Turán, M. Špes, J. Urbanský, „Analysis of Helix Turns Impact on Design of Helix Antenna Operated on 2.46GHz Proposed for FSORF Hybrid System“, MIPRO 2019, p. 537-540, ISSN 1847-3946, 2019.
- [6] M. Márton, M. Špes, J. Urbanský, „Analysis of Reflector Size Impact on Modeled Helix Antenna for 5.2 GHz Usable for Experimental FSO/RF Hybrid System“, Poster 2019, České vysoké učení technické v Praze, p. 1-4, ISBN 978-80-01-06581-5, 2019.
- [7] M. Márton, E. Ovseník, J. Turán, M. Špes, J. Vásárhelyi, „Possibility of increasing availability of FSO/RF hybrid system with implementation of helix antenna for 5.2GHz“, ICCC 2018. - Danvers : IEEE, p. 498-501, ISBN 978-1-5386-4761-5, 2018.
- [8] M. Márton, E. Ovseník, J. Turán, M. Špes, „Design of helix antenna for 2.4GHz applicable in FSO/RF hybrid system“, Mipro 2018, p. 469-472. - ISBN 978-953-233-096-0, 2018.
- [9] M. Márton, M. Špes, „Analysis of Properties of Modeled Helix Antenna for 9.2GHz Usable for FSORF System in Program Suite FEKO“, In: Poster 2018, Prague : Czech Technical University, p. 1-5, ISBN 978-80-01-06428-3, 2018.
- [10] S. A. Al-Gailani, A. B. Mohammad, and R. Q. Shaddad, „Enhancement of free space optical link in heavy rain attenuation using multiple beam concept“, Optik, vol. 124, no. 21, pp.4798–4801, 2013
- [11] H. A. Fadhil, A. Amphawan, H. A. B. Shamsuddin et al., „Optimization of free space optics parameters: an optimum solution for bad weather conditions“, Optik, vol. 124, no. 19, pp.3969–3973, 2013.
- [12] K. Rammprasad and S. Prince, „Analyzing the cloud attenuation on the performance of free space optical communication“, in Proceedings of the 2nd International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP '13), pp. 791–794, Melmaruvathur, India, April 2013.
- [13] S. Deng, J. LIAO, Z. Huang, Rena, M. Hella, K. Connor, „Wireless connections of sensor network using RF and free space optical links“ In Proc. SPIE, vol.6773, 2007, pp. 677307-1-677307-11.
- [14] M. Abadi, Z. Ghassemlooy, S. Zvanovec, M. Bhatnagar, Y. Wu, "Hard switching in hybrid FSO/RF link: Investigating data rate and link availability", 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2017.
- [15] K. Anbarasi, C. Hemanth, R. Sangeetha, "A review on channel models in free space optical communication systems", Optics & Laser Technology, vol. 97, pp. 161-171, 2017.
- [16] A. Sousa, I. Alimi, R. Ferreira, A. Shahpari, M. Lima, P. Monteiro, A. Teixeira, "Real-time dual-polarization transmission based on hybrid optical wireless communications", Optical Fiber Technology, vol. 40, pp. 114-117, 2018.
- [17] X. Feng, Z. Wu, T. Wang, P. Zhang, X. Li, H. Jiang, Y. Su, H. He, X. Wang, S. Gao, "Experimental demonstration of bidirectional up to 40 Gbit/s QPSK coherent free-space optical communication link over ~1 km", Optics Communications, vol. 410, pp. 674-679, 2018.
- [18] L. Chen, W. Wang, "Multi-diversity combining and selection for relay-assisted mixed RF/FSO system", Optics Communications, vol. 405, pp. 1-7, 2017.
- [19] S. Yeap and Z. Chen, "Microstrip Patch Antennas With Enhanced Gain by Partial Substrate Removal", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 9, pp. 2811-2816, 2010
- [20] Xue-Xia Yang, Bing-Cheng Shao, Fan Yang, A. Elsherbeni and Bo Gong, "A Polarization Reconfigurable Patch Antenna With Loop Slots on the Ground Plane", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp. 69-72, 2012
- [21] S. J. Orfanidis, „Electromagnetic Waves and Antennas“, Rutgers University, 2008, 1021s., ISBN 978-0130938558.
- [22] L. Blake, M. Long: „Antennas“, Raleigh, NC: SciTech Pub., 2009.
- [23] J. Carr, G. Hippisley, „Practical antenna handbook“. New York: McGraw-Hill, 2014.
- [24] D. M. K., Ah Yo, R. Emrick, „Frequency Bands for Military and Commercial Applications,“vol. 2 in J. L. Volakis (ed.), Antenna Engineering Handbook, 4th ed., McGraw-Hill, 2007.
- [25] O. L. Daniyan, F. E. Opara, B. I. Okere a kol.: Horn Antenna Design: The Concepts and Considerations, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 4, issue 5, pp. 706-708, 2014
- [26] F. Happ, H. Burns, F. Gronwald: Application of Huygens' Principle for the Fast Calculation of Field Penetration Through Aperture Arrays", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 6, pp. 2025-2028, 2018.
- [27] J. Row, Y. Huang, "Dual-band dual-polarized antenna for WLAN applications", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 60, no. 1, pp. 260-265, 2017.
- [28] M. Nanda Kumar, T. Shanmuganatham, "Design of Microstrip Transition to Substrate Integrated Waveguide Fed Slot Antenna for 60 GHz Applications", Proceedings of 2nd International Conference on Micro-Electronics, Electromagnetics and Telecommunications, pp. 547-554, 2017.
- [29] R. Samson Daniel, R. Pandeewari, S. Raghavan, "A compact metamaterial loaded monopole antenna with offset-fed microstrip line for wireless applications", AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 83, pp. 88-94, 2018.
- [30] N. Singh, N. Sharma, Z. Ali, V. Singh, A. Bhoi, "Inset Fed Circular Microstrip Antenna with Defected Ground", Lecture Notes in Electrical Engineering, pp. 605-611, 2017.
- [31] G. Varamini, A. Keshtkar, M. Naser-Moghadasi, "Miniaturization of microstrip loop antenna for wireless applications based on metamaterial metasurface", AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 83, pp. 32-39, 2018.
- [32] P. Rawat, P. Singhal, "Design and Analysis of Broadband Microstrip Antenna Using LTCC for Wireless Applications", Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 265-271, 2017.
- [33] Y. Khraisat, "Design of 4 Elements Rectangular Microstrip Patch Antenna with High Gain for 2.4 GHz applications", Modern Applied Science, vol. 6, no. 1, 2011
- [34] N. Halgurd and R. Mahmud, "New Configuration of Microstrip Patch Antenna Arrays", ZJPAS - ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 31, no.4, pp. 30-33 2019.
- [35] P. Veselý, E. Hornýová, T. Tichý, O. Štefl, „Study of electrical properties of 3D printed objects“, Poster 2018, pp. 1-4, Praha, 2018

Cognitive Healthcare Platform – Case Study based on Quality-Enabled Decentralized IoT Architecture

Jozef Mocnej

Department of Cybernetics and Artificial Intelligence
 Technical University of Košice
 Košice, Slovakia
 Email: jozef.mocnej@tuke.sk

Iveta Zolotová

Department of Cybernetics and Artificial Intelligence
 Technical University of Košice
 Košice, Slovakia
 Email: iveta.zolotova@tuke.sk

Abstract—The Internet of Things (IoT) is a paradigm aimed at connecting everyday objects to the Internet. The ability to monitor and control the physical world using information technology creates many opportunities but also challenges. The exponential growth of connected devices, the heterogeneity of IoT use cases and the diversity of the network technologies yield concerns about IoT sustainability. IoT demands solutions offering interoperability, scalability, and adaptability. This work presents a case study from the healthcare application domain that introduces an innovative IoT platform called CHECKuP aimed at improving the quality of provided care at home environments. The platform utilizes a proposed quality-enabled IoT architecture, which addresses significant challenges related to distributing logic to the edge of the IoT network. The motivation is to provide a practical example of the next-generation IoT platforms based on decentralized IoT architectures.

Index Terms—Internet of Things, Cognitive Healthcare Platform, Decentralized IoT Architecture, Edge Computing, Smart Healthcare.

I. INTRODUCTION

The Internet of Things (IoT) is a paradigm aimed at connecting everyday objects to the Internet. The idea is to extend things with computing power, a connection to the Internet and allow them to sense, compute, communicate and control the surrounding environment. These capabilities are desired in many application use cases due to their potential impact. IoT offers a new point of view on what kind of data should be gathered, how often and from which place, so that it would be possible to get information that was not available before. However, the gained benefits create some challenges as well.

The exponential growth of devices connected to the Internet, the diversity of the IoT paradigm and the variety of IoT technologies yield concerns about IoT sustainability. To create the interoperability between different IoT solutions and to achieve their further adaptability, we need to focus on the integration possibilities proactively. A promising solution lies in IoT integration platforms, which provide a foundation for a unified communication with IoT devices, collecting data from them and processing it in a meaningful way to get the desired output.

The first wave of IoT integration platforms was based on centralized architectures with all logic in the cloud. While this approach is simple and straightforward, it also creates unnecessary overhead. A better approach may be to distribute

logic between the cloud and IoT network and enable making decisions even at the edge of the network. Shifting a part of the decision-making capabilities to edge requires higher initial effort but the advantages are reduction of transferred data, faster response rates, and more efficient resources utilization, among others. The next wave of IoT platforms will be based on decentralized architecture and will be desired especially in complex scenarios.

Creating a suitable decentralized IoT architecture for the next-generation IoT platforms arises several challenges that can generally be summarized by the following questions:

- 1) *What is the desired feature set that a decentralized IoT platform should provide?*
- 2) *How to ensure the expected output quality and avoid unwanted information loss caused by decision-making processes at the edge?*
- 3) *What is the architecture of a decentralized IoT platform suitable for the defined complex scenario?*

Each of the questions mentioned above encompasses a subset of problems that make the adoption of decentralized IoT platforms more difficult. Therefore, we have decided to analyze all three questions during our research and provide the answers to them. As a result, we discussed the impact of the edge computing paradigm on IoT in [6], identified the desired feature set of decentralized IoT platforms in [7] and proposed a quality-enabled decentralized IoT architecture in [5].

This paper utilizes the gained knowledge and presents a case study from the healthcare domain that illustrates the usage of the proposed quality-enabled decentralized IoT architecture in the real environment. The case study introduces an innovative platform called CHECKuP that is aimed at improving the quality of provided healthcare. The main contribution is in the practical example of the real use case can benefit from the presented ideas and how the next-generation IoT platforms can look like.

The rest of the paper is structured as follows: Section II presents the case study CHECKuP and goes through all stages of the CHECKuP proposal, including the problem analysis, platform design, implemented proof-of-concept, and discussion. Section III highlights our motivation by summarizing the related work. Finally, Section IV concludes our work in making the IoT paradigm sustainable.



Fig. 1. CHECKuP – Cognitive HEalthCare Platform.

II. CASE STUDY – CHECKUP

This case study summarizes our effort in the smart healthcare application domain and presents a Cognitive HEalthCare Platform called *CHECKuP* (Fig. 1). *CHECKuP* is an innovative concept aimed at improving the quality of home care. The main motivation is to enable health agencies to provide home care more efficiently while ensuring the required quality level of provided services. To achieve this objective, *CHECKuP* is based on the proposed quality-enabled decentralized IoT architecture and utilizes the state-of-the-art in IoT and machine learning to create a solution that acquires information about patients, implements anomaly detection, supports internal processes of health agencies, and improves patients' well-being.

A. Problem Analysis

The world population is aging. A decreasing birth rate and increasing life expectations have a significant impact on society. To make the trend sustainable, we will face a gradual change from hospital-centered to home-centered healthcare. This transformation creates several challenges and if we want to maintain the high levels of support and services, the use of modern technologies is inevitable.

The truth is, however, that smart healthcare is still in its infancy. Agencies providing home care use information and communication technologies to support their work at the management layer, e.g. to create training plans, arrange medical equipment and medicine supply, track various changes, organize events and so on. The operational layer, the healthcare provided by carers at patients' homes, is still mostly without the utilization of modern technologies, though. All the activities done with patients, measurements records, medicine dosage, and other observations are manually written to the paper record books. This creates a considerable room for human error and it is more difficult to analyze the acquired data.

We identify the following typical problems related to home care:

- Carers do not have enough practical experience after the initial course to solve unexpected yet critical situations.
- Carers end up not following the prepared plans during the busy days.
- Carers forget to perform activities at the scheduled time interval.
- Patients are not collaborating and carers do not know how to react.

CHECKuP aims to address the mentioned problems by presenting a platform that monitors the healthcare quality provided by carers at homes and offers tools to help carers act

accordingly should an unusual situation happen. It also focuses on the patients' well-being and adjusts the environment to their satisfaction. We believe solutions like *CHECKuP* can ease the transformation process from hospital-centered to home-centered healthcare and sustain the desired quality level of provided services.

B. Platform Design

Home care is still quite a broad topic and covers various activities. To specify the desired functionalities of the platform more exactly, we focused on the users that would benefit from the platform the most. Consequently, we have identified the following three user roles:

- **Carers** – to see the care plans of patients. The platform would replace the paper record books used so far, thus carers would more easily see whether they follow the scheduled plans. In addition, the system would also alert carers about unusual situations and would offer them advice to solve critical events.
- **Family members** – to check whether the care progresses according to the plan. They would be able to show the history and work with the acquired data.
- **Agencies** – to manage information about the patients and carers. They would be able to see the history of the provided care, ensure its quality has been as expected, get in touch with carers in the field, analyze the acquired data and see the progress of the patients.

The identified user roles helped us to comprehend the demands on the platform and its functionality. As a result, we created a set of objectives that should be achieved by *CHECKuP*. The set is as follows:

- **Platform based on the proposed decentralized IoT architecture** – to get all presented benefits, including the multi-network approach, scalable and interoperable implementation, intuitive device and data management, AI at the edge, etc.
- **Environment monitoring** – to acquire information about the environment and evaluate the quality of provided care.
- **Record book replacement** – to transfer all measurement records and observations from the paper to digital form.
- **Data visualization using graphical output** – to maximize user experience and ease the situation comprehension.
- **Anomaly detection** – to notify users about the unexpected situations in near real-time and provide them advice to solve the problem.
- **Capability to work with historical data** – to create the possibility of various data analyses.

Based on the defined objectives and user roles, we present a high-level design overview of the *CHECKuP* platform in Fig. 2. The proposal consists of a set of IoT devices that interact with the patient's room. They generate data about various conditions in the room and send it to the IoT gateway. The communication with the IoT gateway can be realized over different network technologies, including Wi-Fi, Bluetooth,

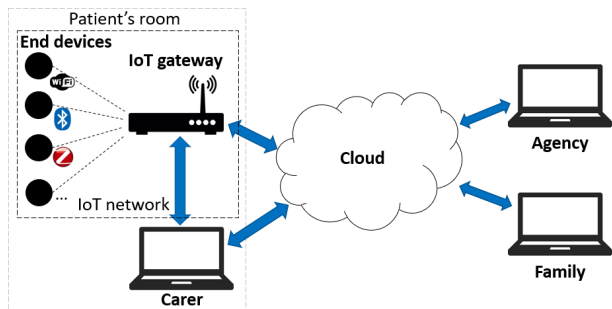


Fig. 2. High-level design overview of the CHECKuP platform.

Ant, and ZigBee. The multi-network approach of the proposed architecture enables seamless integration regardless of the used technology. Besides the connectivity, the IoT gateway also implements stream processing modules that bring AI to the edge. The modules can provide functionalities like anomaly detection, data aggregation, room control, quality assurance, among others. The collected information is regularly sent to the cloud for further processing. The cloud is responsible for storing historical data to the database and hosting a web portal that allows users get to the information and perform their desired tasks, such as data visualization, records management, information filtering, trends analyses, etc. The cloud can also offer other services for advanced machine learning and data mining, as well as for maintaining IoT networks at patients' rooms.

The platform is designed to be scalable enough as the user expectations may evolve over time. Our primary goal is to ensure the desired quality level of the provided home care, albeit we understand the dynamics of the smart healthcare domain and support the system adaptability by design. CHECKuP is meant to be the platform that will assist during the whole gradual transition from the hospital-centered to home-centered healthcare.

C. Proof of Concept

After the analysis and design phases, we have decided to develop a proof of concept. Our motivation was to show the feasibility of the solution and obtain the results of the system for evaluation. The implemented prototype covers the ideas presented in this work and follows the set of objectives specifying the desired functionality. Fig. 3 depicts the general architecture of the developed prototype and highlights the used devices, modules, and services. We are going to describe each of them.

IoT devices monitor and control the patient's room. For the purpose of this proof of concept, we did not focus on replacing certified devices already used to measure vital signs of the patient but rather on extending observations with other attributes to help us correctly detect activities in the room. The following list presents some of the developed prototypes:

- *CHECKuP device* – used to measure motion, temperature, humidity, and light intensity. These standard attributes aimed to detect the human presence and describe the basic

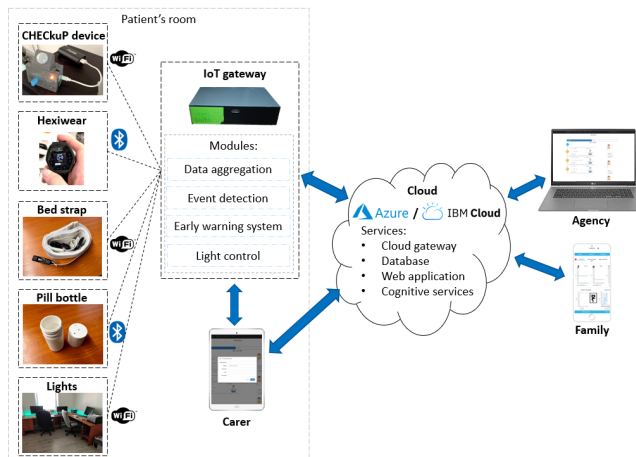


Fig. 3. General architecture of the implemented proof of concept.

conditions in the room. The device was based on the NodeMCU microcontroller and allowed the implementation of Arduino-compatible sensors. CHECKuP device communicated over Wi-Fi and could be mains or battery powered. The data was sent on a regular basis in 5 sec interval.

- *Hexiwear* – represented the wearables category in our proof of concept. Hexiwear is a smartwatch with an open platform that enables custom modifications. We used this device to monitor a patient's heart rate, temperature, mobility, but also to detect falls. Hexiwear is battery-powered and the communication was over BLE in regular 10 sec interval.
- *Bed Strap* – developed to detect a patient position in bed and prevent from creating pressure ulcers. Immobilized patients are susceptible to bedsores and need to be repositioned every three hours. The bed strap consisted of the set of gyroscope sensors connected to the NodeMCU development board and was designed to be attached to the bed. When a patient changed the position, the device notified the gateway about the event. The device could be mains or battery powered and the message exchange was event-based via Wi-Fi.
- *Pill bottle* – based on the smart pill cap to monitor continuous pill taking. The pill bottle was designed to remind patients or their carers to take medicine on time. We implemented the pill cap using the NRF51822 BLE module due to its low power consumption and added the infrared proximity and gyroscope sensors to detect the open and closed states of the bottle. The device was powered by 500 mAh battery and communicated irregularly over BLE.
- *Lights* – lightning plays a vital role in human perception of the environment. We proposed a solution that adjusted the light colors according to the patient's mood to improve their psychical well-being. The solution utilized RGB led strips, which were connected to the NodeMCU board and were controlled over Wi-Fi on an irregular

basis.

IoT gateway is the main building block of the proposed decentralized IoT architecture. We chose the Raspberry Pi as the hardware for our software implementation due to its adequate computational resources, affordable price and easy extensibility. The OS on the Raspberry Pi was Raspbian and the functionality was separated to individual containers running in Docker to achieve the desired loosely-coupled system based on microservices. We tested the following four stream processing modules in our proof of concept:

- *Data aggregation* – used to aggregate the acquired information to 1 min intervals that would be sent to the cloud for further processing. The attributes like the room temperature, humidity, patient temperature, heart rate, would be averaged and the outliers (max and min values) would be included, whereas the attributes like the activity in the room would be transformed to the binary yes/no options. The motivation was to reduce the volume of transferred data and cut the costs on the cloud services.
- *Event detection* – created to process irregular events and recognize unusual situations. The module listened to events, such as opening/closing the pill bottle, positioning the patient to avoid decubitus, and was responsible for completing these tasks within the set time limit. It also analyzed data stream whether the measured values were not outside the set boundaries and invoked an alert when such situation happened. In addition, the module detected the critical situations, such as fall of the patient, and executed the prepared flow to solve the issue (e.g. notifying the carer, then agency, etc.).
- *Early warning system* – while the event detection module dealt with the situations that had already happened, the early warning system (EWS) aimed to avoid them. EWS is a tool widely used in hospitals to score the measurements of the patient's vital signs and recognize the early signs of health issues. We implemented this process to the module and was classifying the patient's health condition into one of the four categories scaled from grade 1 (ok) to grade 4 (critical). The classification model used in this module was learned in the cloud and then deployed to the gateway.
- *Light control* – the module controlled RGB led strips to influence patient's psychical well-being with appropriate color lightning. The module was based on the experimental evaluation of how colors impact our perception of well-being in the room. We used a camera to detect the mood of the person from the facial expressions and then set a suitable lightning color. The light color transition was smooth and infrequent in order to avoid unwanted disturbance. The developed solution was more of an experimental prototype but generally obtained positive feedback from participants.

Cloud is the central point of the architecture, which collects data from the IoT network, stores it to the database and enables interaction with the defined user groups. We used

services of two cloud platforms for the proof of concept – Microsoft Azure and IBM Cloud. Both cloud platforms are highly popular, contain all the services we needed and we received subscriptions to test them. Our proof of concept utilized cloud services as follows:

- *Cloud gateway* – represented the entrance gate for data streams collected from the IoT network. Microsoft Azure calls this gateway IoT hub, whereas IBM cloud named it IBM Watson IoT Platform. Nevertheless, both approaches communicated with the IoT network via MQTT and allowed seamless and data acquisition and device management. The pricing was set based on the total number of messages and the volume of transferred data respectively, thus we were sending the aggregated data in 1 min interval to cut the costs.
- *Database* – the essential service for all systems working with data. We were operating with the semi-structured and structured data and tested SQL as well as NoSQL databases. Our findings showed the preference of NoSQL databases due to their better scalability and adaptability. The traditional transactional SQL databases offer the benefits of the clear data structure and the support of complex queries, but CHECKuP is an evolving platform that utilizes the dynamic list of IoT devices generating diverse information, which is more suited for NoSQL databases, such as MongoDB or Cosmos DB.
- *Web application* – developed to allow human interaction with the system. Our application was designed to fulfill the expectations of all three user groups. The application provided the measurement and observation recording for carers in the field, but also notified them about the unexpected situations. The data visualization and filtering options offered agencies the managerial view of the provided home care, while the built-in chat enabled agencies to get in touch with carers more easily. Finally, family members could check the quality of provided care and assure everything is according to their expectations. The web application was developed in ASP.NET Core and was hosted in the cloud.
- *Cognitive services* – besides the core functionality, we also experimented with cognitive services in our proof of concept. For instance, we utilized the IBM services called Speech to Text, Text to Speech, and IBM Watson Assistant to create a cognitive expert advisor that would help carers in the case of emergency. The carer would ask questions either by writing or speaking and the cognitive expert advisor would answer them with advice. We also used learning services to create classification and predictions models that would then be deployed to the edge-enabled IoT gateway. Cloud provides a great opportunity for using cognitive services as the dataset required for AI and machine learning can be obtained from the database.

D. Discussion

CHECKuP is a platform aimed at improving the quality of provided home care and facilitating the transition from hospital-centered to home-centered healthcare. Our motivation was to increase the standard of living even of immobilized people and seniors that are dependent on the care of others. The goal is to give agencies a tool for ensuring that the quality level of their services is as they desire.

The problem analysis helped us to comprehend the most typical problems related to home care. We addressed these problems by proposing a platform architecture that identifies the requirements of three user groups and specifies the desired functionality. The proposed platform was implemented in the proof of concept and then partly tested in the production with one immobilized patient, while the rest of the system was evaluated in the laboratory environment. Our findings show the feasibility of the solution, albeit we see the room for improvements.

The developed IoT devices monitored and controlled various aspect of the environment, which facilitated the activity recognition in the patient's room. The devices were built on the development hardware and using open platforms, which reduced the costs and shortened the implementation time but at the expense of the reliability. For example, the smartwatch Hexiwear was often disconnecting and freezing, and the sensed values were not very accurate either. We had a better experience with the hardware we developed by ourselves, but it still was not production-ready and needed the reboot from time to time. Nevertheless, we consider these issues to be minor and are convinced that slightly more expensive hardware would resolve the described behavior.

The IoT gateway connected IoT devices to the Internet and transferred a part of the decision-making capabilities from the cloud to the edge. Our implementation followed the idea of the edge-enabled IoT gateway and was realized according to our decentralized IoT architecture proposal. The modules implemented in the proof of concept outline the benefits of the quality-enabled decentralized IoT architecture and illustrate the decision-making capabilities of the IoT gateway. Nonetheless, the list of modules can be gradually extended as the demands on the CHECKuP platform evolve.

The cloud platforms used in the proof of concept met our expectations and provided all the services we needed. The main discussion about the cloud platforms came down to the price point. We were granted the Microsoft Azure for Research award and IBM Cloud education subscription to spend the budget on their services, which was enough for the purpose of the proof of concept. However, scaling the CHECKuP project up can cost a considerable amount of money, which is something to keep in mind. Our solution aimed to utilize cloud resources as efficiently as possible, while still getting the desired functionality.

In conclusion, the CHECKuP platform proved the feasibility of the proposed quality-enabled decentralized IoT architecture and outlined how our architecture stack diagrams can be used

as a guideline for the platform development. CHECKuP is a project with a big potential impact on the patients requiring home care, which is the reason that led us to promote the project to a startup. The initial proof of concept is still far from the production system, but we are continuously working toward it. So far, we have already managed to win several start-up competitions and get a few project grants that have supported us to fund the research. In the future, we would like to extend the functionalities of CHECKuP and obtain more test results from the production environment, which would help us to eventually develop the production-ready platform.

III. RELATED WORK AND MOTIVATION

This section highlights our motivation toward proposing a quality-enabled decentralized IoT architecture. IoT platforms provide a promising solution to several IoT challenges, including the interoperability, adaptability, and scalability. The potential benefits have caught the attention of many researchers who invested their time to enhance the global wisdom about the current capabilities. We summarize the most related work to the stated questions.

Lazarescu [3] proposed a design of a WSN platform for IoT applications requiring long-term environmental monitoring. His approach was explicitly aimed at low-cost IoT devices with limited computational capabilities and energy resources. The primary objective was to acquire data from the environment while achieving years of maintenance-free service. To do so, however, the author had to do various trade-offs between platform features and specifications. The presented platform is highly suitable for use cases requiring basic data acquisition but lacks functionalities when decentralized decision-making is needed. The paper also does not consider any form of quality measurement concepts to ensure the fulfillment of expectations in changing conditions.

Desai, Sheth, and Anantharam [2] presented a semantic web enabled IoT architecture that provides interoperability between systems by establishing communication and data standards. The main building block was a semantic gateway, which allowed translation between different messaging protocols, such as XMPP, CoAP, and MQTT. In addition to the multi-protocol proxy module, the authors also described the integration of semantic web technologies with existing sensor and services standards to enhance data with semantic annotations. The architecture is suitable even for the complex scenario as we defined it, but no considerations were given into logic distribution, quality measurement concepts and efficient resources utilization.

The logic distribution in the IoT architecture was analyzed by Sarkar et al. [10]. The authors specifically addressed the problems of scalability, interoperability, and heterogeneity of IoT devices by proposing a three-layered architecture responsible for object virtualization, service composition and execution, and service creation and management. Their approach is applicable for multi-application based use cases, but in comparison to our intentions, we missed several characteristics. In particular, the authors distributed logic only in the IoT

network, but we believe the cloud is still an essential part of IoT solutions. In addition, the topic of measuring system quality was not tackled and neither was the energy efficiency.

Ren et al. [9] took the promising benefits of the edge computing paradigm and correlated it with another concept called transparent computing. The transparent computing enables users to select their desired services on-demand, without being concerned with the installation, management, and upgrade of services on their devices. The authors presented transparent computing based IoT architecture, which decouples the software stack from the hardware and makes the details of service provisioning transparent to users. The paper provides a good overview of the edge computing capabilities and its possible correlation with other paradigms, but for the need of this work, we aim at a more in-depth architecture modules explanation, quality measurement concepts, and efficient resources utilization.

Regarding the measurement of quality in a system, Liu et al. [4] presented an efficient energy management framework to control the duty cycles of IoT sensors under Quality of Information (QoI) expectations in a multitask-oriented environment. The paper addresses the objective of efficient resource utilization and uses a measurement concept QoI to define the expectations and capabilities of sensors. The authors focused on finding a critical covering set of sensors that would satisfy the desired QoI of a particular task. The selection of sensors to the critical covering set was executed according to the calculated sensor-to-task relevancy and information fusion. The paper does not exactly target the topic of IoT platforms but provides a good guideline for conserving energy in IoT. However, the algorithm assumed several simplifications and therefore does not cover all characteristics of the defined complex scenario.

The same QoI measurement concept was chosen by Al-Turjman [1] when proposing information-centric sensor networks (ICSN) for cognitive IoT. ICSN is a paradigm of wireless sensor networks that focus on delivering information from the network based on user requirements, rather than serving as a point-to-point data communication network. The author focused on the recommended learning strategies for ICSN while keeping in mind the cost, computation, and operational overhead limitations. The presented conceptual architecture provides only a high-level overview, but the paper outlines the usefulness of QoI in matching the users' expectations with IoT networks' capabilities. Nonetheless, the paper does not tackle the efficient utilization of resources, which is an important characteristic of this work.

CityPulse described by Puiu et al. [8] is another framework using QoI as a collection of key performance indicators to satisfy users' expectations. It is a large multi-institutional project supported by the European Union aimed to create data analytic framework for smart cities. The CityPulse framework supports the integration of different services, integrates uncertain and incomplete data to create reliable information and adapts data processing techniques to meet QoI required by users. The project provides practical examples of how

to shift from vertically isolated applications to horizontally interconnected services, albeit it is tightly focused on the smart city application domain and specifically on stream processing solutions. It also does not deal with logic distribution and efficient resources utilization.

Based on the summarized related work, we can conclude that the topics of IoT integration platforms and the efficient utilization of resources are trending due to their promising benefits. However, even though the challenges have been partially addressed by many researchers, we were unable to find a solution that would answer all of the defined questions. Consequently, this research gap has led us to analyze the major problems and propose a new quality-enabled decentralized IoT architecture that would facilitate the development of the next-generation IoT platforms, such as the presented CHECKuP.

IV. CONCLUSION

IoT is a paradigm aimed at connecting everyday objects to the Internet. The ability to monitor and control the surrounding environment offers many benefits, but the exponential growth of connected devices, the heterogeneity of IoT solutions and the diversity of the used technologies yield concerns about IoT sustainability. A promising solution seems to be IoT integration platforms that provide a foundation for connecting devices to the Internet, acquiring the generated data, and processing it in a meaningful way to get the desired output. The first wave of IoT platforms was based on the centralized architectures due to its simplicity and straightforwardness, yet splitting the logic between the cloud and the edge of the IoT network can bring several benefits. The next wave of IoT platforms will be edge-enabled and based on the decentralized architectures.

Our motivation was to propose a decentralized IoT architecture that would provide an implementation guideline for the IoT platforms of the next generation. The proposed architecture addresses several challenges related to the edge-enabled IoT platforms, including quality assurance, information loss, and energy efficiency, among others. This paper presented the utilization of the proposed IoT architecture in the case study called CHECKuP that is aimed at improving the quality of home care provided by health agencies. The main contribution is in the practical example of how the proposed quality-enabled decentralized IoT architecture can facilitate the development of IoT platforms such as CHECKuP, which decentralize the intelligence and represent the IoT solutions of the next generation.

ACKNOWLEDGMENT

This publication is the result of project VEGA – 1/0663/17, 2017-2020 (100%).

REFERENCES

- [1] F. M. Al-Turjman. "Information-centric sensor networks for cognitive IoT: an overview". In: *Annals of Telecommunications* 72.1-2 (2017), pp. 3–18.

- [2] P. Desai, A. Sheth, and P. Anantharam. “Semantic gateway as a service architecture for iot interoperability”. In: *2015 IEEE International Conference on Mobile Services*. IEEE. 2015, pp. 313–319.
- [3] M. T. Lazarescu. “Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications”. In: *IEEE Journal on emerging and selected topics in circuits and systems* 3.1 (2013), pp. 45–54.
- [4] C. H. Liu et al. “Toward qoi and energy-efficiency in internet-of-things sensory environments”. In: *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 2.4 (2014), pp. 473–487.
- [5] J. Mocnej et al. “Decentralised IoT architecture for efficient resources utilisation”. In: *IFAC-PapersOnLine* 51.6 (2018), pp. 168–173.
- [6] J. Mocnej et al. “Impact of Edge Computing Paradigm on Energy Consumption in IoT”. In: *IFAC-PapersOnLine* 51.6 (2018), pp. 162–167.
- [7] J. Mocnej et al. *Network Traffic Characteristics of the IoT Application Use Cases*.
- [8] D. Puiu et al. “Citypulse: Large scale data analytics framework for smart cities”. In: *IEEE Access* 4 (2016), pp. 1086–1108.
- [9] J. Ren et al. “Serving at the edge: A scalable iot architecture based on transparent computing”. In: *IEEE Network* 31.5 (2017), pp. 96–105.
- [10] C. Sarkar et al. “A scalable distributed architecture towards unifying IoT applications”. In: *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE. 2014, pp. 508–513.

Modelovanie synchronizačných problémov kompozície komponentov pomocou Petriho sietí a lineárnej logiky

Ján Perháč

Katedra počítačov a informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
Jan.Perhac@tuke.sk

Valerie Novitzká

Katedra počítačov a informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
Valerie.Novitzka@tuke.sk

Abstract—Komponentové programovanie sa v poslednom období stalo populárnou a často využívanou metódou vývoja softvéru. Takýto softvér je vyvinutý prostredníctvom nezávislých komponentov, ich následnou kompozíciou. V našom článku prezentujeme ilustráciu situácie ako pri kompozícii komponentov môžu vzniknúť nové problémy, ktoré je nutné vyriešiť tak, aby softvér poskytoval požadované výsledky. Uvádžame metódu transformácie Petriho sietí do dokázateľných kontextov lineárnej logiky a demonštrujeme ako kompozícia jednoduchej Petriho siete spôsobí vznik synchronizačného problému. Následne transformujeme túto Petriho sieť do dokázateľného sekventu lineárnej logiky.

Index Terms—Lineárna logika, Petriho siete, Kompozícia komponentov, Synchronizačné problémy

I. ÚVOD

Vývoj softvéru prostredníctvom komponentových systémov je relatívne novým prístupom softvérového inžinierstva [1]. Tento prístup je založený na vývoji programových systémov z už existujúcich komponentov prostredníctvom ich kompozície [2], pričom jednotlivé komponenty môžu spolupracovať v značne rozdielnych programových systémoch. Inými slovami, je to spôsob vývoja softvéru, ktorý je založený na znovu-použitelnosti už existujúceho softvéru namiesto vývoja celého programového systému [3]. Medzi základné vlastnosti komponentov je ich *nezávislosť* t.j. môžu byť nezávislé spustiteľné, môžu byť *znovu-použitelné* a musia spĺňať podmienky ich kompozície (*závislosti*) tak, aby celý systém prinášal korektné výsledky. Avšak kompozíciou určitých komponentov môžu vzniknúť rôzne synchronizačné problémy.

V našom prístupe ilustrujeme známe synchronizačné problémy pomocou vhodných formálnych metód, konkrétne: *Petriho siete* [4] a *lineárna logika* [5]. Lineárna logika je nový logický systém založený na zdrojovo-orientovanom prístupe pri narábaní s formulami [5]. Zavádza nové logické spojky [6], ktoré poskytujú silnú vyjadrovaciu schopnosť pri opise reálnych procesov, ako napríklad kauzalita, pleonazmus, polemika, paralelizmus atď. Od predstavenia lineárnej logiky bol prevod Petriho sietí do lineárnej logiky predmetom skúmania viacerých autorov [7], [8], [9]. Náš prístup vychádza z týchto

princípov, pričom metódu prevodu Petriho sietí do lineárnej logiky sme modifikovali pre naše potreby.

V tomto článku prezentujeme ako synchronizačný problém vzájomného vylúčenia (*mutex z ang. mutual exclusion*) môže byť formálne špecifikovaný pomocou Petriho sietí a následne prevedený do dokázateľných sekventov lineárnej logiky.

II. LINEÁRNA LOGIKA

Lineárna logika bola formulovaná v roku 1987 francúzskym logikom Jean-Yves Girardom v [5] ako nový logický systém. Zovšeobecňuje výrokovú logiku a intuicionistickú logiku [10]. V porovnaní s inými logickými systémami je hlavným rozdielom ako aj výhodou lineárnej logiky jej zdrojovo-orientovaná povaha narábania so zdrojmi [11]. Zavedením nových logických spojok vznikla rozsiahla vyjadrovacia sila, ktorá dodáva lineárnej logike schopnosti vyjadriť procesy reálneho sveta [12] ako napr. pleonazmus, paralelizmus, polemika, kauzalita t.j. proces akcie a reakcie atď. Táto logika je tiež nazývaná logikou zdrojov, čo znamená, že formula lineárnej logiky vyjadruje *akciu/reakciu* alebo *dostupný zdroj/spotrebovaný zdroj*.

A. Syntax lineárnej logiky

Syntax jazyka lineárnej logiky v Backus-Naurovej forme je definovaná nasledovne:

$$\begin{aligned} \varphi ::= a \mid \mathbf{1} \mid \perp \mid \top \mid \mathbf{0} \mid \varphi \otimes \psi \mid \varphi \& \psi \mid \varphi \oplus \psi \mid \varphi \wp \psi \\ \mid \varphi \multimap \psi \mid \varphi^\perp \mid !\varphi \mid ?\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

pomocou ktorého je možné konštruovať všetky formuly lineárnej logiky.

Neformálny opis jednotlivých logických spojok lineárnej logiky zobrazených v produkčnom pravidle (1) uvádzam nižšie:

- a je elementárna formula.
- $\varphi \otimes \psi$ Multiplikatívna konjunkcia (*z ang. times*) s neutrálnym prvkom $\mathbf{1}$, vyjadruje vlastnosti paralelizmu t.j. vykonanie oboch akcií (φ, ψ) naraz.

- $\varphi \& \psi$ Aditívna konjunkcia (z ang. *with*) s neutrálnym prvkom \top , vyjadruje závislú voľbu resp. externý nedeterminizmus t.j. vykonanie iba jednej akcie z oboch dostupných (φ, ψ), pričom je možné rozhodnúť, ktorá z nich bude vykonaná.
- $\varphi \oplus \psi$ Aditívna disjunkcia (z ang. *plus*) s neutrálnym prvkom $\mathbf{0}$, vyjadruje slobodnú voľbu resp. interný nedeterminizmus t.j. vykonanie iba jednej akcie z oboch dostupných (φ, ψ), na základe vonkajších podmienok.
- $\varphi \wp \psi$ Multiplikatívna disjunkcia (z ang. *par*) s neutrálnym prvkom \perp , vyjadruje vykonanie iba jednej z dostupných akcií (φ, ψ), pričom pokiaľ nebude vykonaná akcia φ , tak bude vykonaná akcia ψ a opačne.
- $\varphi \multimap \psi$ Lineárna implikácia, vyjadruje kauzálny proces reálneho sveta t.j. akcia vyvolá reakciu, kde zdroj (φ) ktorý spustí vykonanie akcie sa stane spotrebovaným zdrojom ($(\varphi)^\perp$).
- Pomocou exponenciálnych operátorov je možné vyjadriť pleonazmus (! φ) (z ang. *of course!*) t.j. nevyčerpatel'nosť zdroja alebo polemiku (? φ) (z ang. *why not?*) t.j. potenciálnu nevyčerpatel'nosť zdroja.
- φ^\perp Lineárna negácia, je podľa Girarda [11] najdôležitejšou logickou spojkou lineárnej logiky. Je involutívna $(\varphi^\perp)^\perp \equiv \varphi$. Vyjadruje kauzalitu zobrazenú v tabuľke (II-A).

TABLE I
KAUZALITA LINEÁRNEJ NEGÁCIE

akcia φ	reakcia φ^\perp
dostupný zdroj	spotrebovaný zdroj
vstup	výstup

B. Dokazovací systém lineárnej logiky

Girard vo svojej publikácii definoval dokazovací systém lineárnej logiky pomocou Gentzenového sekventového kalkulu (GSK). Obojstranný GSK pre lineárnu logiku má nasledujúci tvar:

$$\Gamma \vdash \Delta, \quad (2)$$

kde Γ, Δ sú konečné množiny formúl, pričom

$$\Gamma = \{\varphi_1, \dots, \varphi_n\}, \quad (3)$$

$$\Delta = \{\psi_1, \dots, \psi_m\}. \quad (4)$$

Symbol \vdash nie je logickou spojkou, ale formálny symbol oddeľujúci pravú a ľavú stranu sekventu. Význam zápisu $\Gamma \vdash \Delta$ je:

$$\varphi_1 \otimes \dots \otimes \varphi_n \vdash \psi_1 \& \dots \& \psi_m, \quad (5)$$

ktorý je možné prečítať ako aditívna konjunkcia formúl na pravej strane sekventu je dokázateľná z multiplikatívnej konjunkcie formúl na strane ľavej.

Odvodzovacie pravidlá nadobúdajú nasledujúci tvar:

$$\frac{\text{Predpoklad}_1 \quad \text{Predpoklad}_2}{\text{Záver}}_{(3)}, \quad (6)$$

kde pravidlo bez predpokladov sa nazýva *axióma*.

Dôkaz formuly v GSK je dôkazový strom, kde v koreni je sekvent, v ktorom sa nachádza dokazovaná formula. Každý krok odvodenia (uzol stromu) je vytvorený aplikáciou príslušného odvodzovacieho pravidla, až pokiaľ každá vetva stromu nie je ukončená axiómou. V prípade, že sú všetky tieto podmienky splnené, potom dôkazový strom je konštruovaný korektne a formula je dokázaná.

Odvodzovacie pravidlá sekventového kalkulu lineárnej logiky tvoria:

1.) Axióma *identity* a pravidlo *rezu*: Axióma identity neobsahuje predpoklady a pravidlo rezu rozvetvuje dôkazový strom.

$$\frac{\overline{\varphi \vdash \varphi}^{(id)}}{\Gamma \vdash \varphi \quad \Delta, \varphi \vdash \psi}^{(cut)} \quad \Gamma, \Delta \vdash \psi$$

2.) Štrukturálne pravidlá: *Pravidlá výmeny* vyjadrujú komutatívnosť logiky tým, že umožňujú permutáciu formúl na oboch stranách sekventu.

$$\frac{\Gamma, \varphi, \psi \vdash \Delta}{\Gamma, \psi, \varphi \vdash \Delta}^{(ex_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \psi, \Delta}{\Gamma \vdash \psi, \varphi, \Delta}^{(ex_r)}$$

Na rozdiel od iných logických systémov, zdrojovo-orientovaná povaha lineárnej logiky neumožňuje zaviesť plnohodnotné pravidlá oslabenia a kontrakcie, avšak pri využití exponenciálnych logických spojok je možné zaviesť ich v obmedzenom tvare:

$$\frac{\Gamma, ?\varphi, ?\varphi \vdash \Delta}{\Gamma, ?\varphi \vdash \Delta}^{(?c_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash ?\varphi, ?\varphi, \Delta}{\Gamma \vdash ?\varphi, \Delta}^{(?c_r)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma, ?\varphi \vdash \Delta}^{(?w_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma \vdash ?\varphi, \Delta}^{(?w_r)}$$

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma, ?\varphi \vdash \Delta}^{(?d_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi \Delta}{\Gamma \vdash ?\varphi, \Delta}^{(?d_r)}$$

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma, !\varphi \vdash \Delta}^{(!d_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta}{\Gamma \vdash !\varphi, \Delta}^{(!d_r)}$$

3.) Pravidlá pre konštanty:

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma, \mathbf{1} \vdash \Delta}^{(1_l)}$$

$$\overline{\vdash \mathbf{1}}^{(1_r)}$$

$$\frac{}{\Gamma, \mathbf{0} \vdash \Delta}^{(0_i)}$$

$$\frac{}{\Gamma \vdash \top, \Delta}^{(\top_r)}$$

$$\frac{}{\perp \vdash}^{(\perp_i)}$$

$$\frac{}{\Gamma \vdash \perp, \Delta}^{(\perp_r)}$$

4.) Logické pravidlá: Pravidlá pre multiplikatívnu konjunkciu sú dve, po jednom pre každú stranu sekventu. Pravidlo pre pravú stranu má jeden predpoklad a pravidlo pre ľavú stranu má predpoklady dve.

$$\frac{\Gamma, \varphi, \psi \vdash \Delta}{\Gamma, \varphi \otimes \psi \vdash \Delta}^{(\otimes_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta \quad \Phi \vdash \psi, \Sigma}{\Gamma, \Phi \vdash \varphi \otimes \psi, \Delta, \Sigma}^{(\otimes_r)}$$

Pravidlá pre aditívnu disjunkciu sú po dve pre pravú stranu sekventu obsahujúce po jednom predpoklade a jedno pre ľavú stranu obsahujúce dva predpoklady.

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta \quad \Gamma, \psi \vdash \Delta}{\Gamma, \varphi \oplus \psi, \vdash \Delta}^{(\oplus_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta}{\Gamma \vdash \varphi \oplus \psi, \Delta}^{(\oplus_{r1})}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \psi, \Delta}{\Gamma \vdash \varphi \oplus \psi, \Delta}^{(\oplus_{r2})}$$

Pravidlá pre implikáciu sú po dve. Pravidlo pre ľavú stranu má dva predpoklady a pre pravú stranu obsahuje jeden predpoklad.

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta \quad \Phi, \psi \vdash \Sigma}{\Gamma, \Phi, \varphi \multimap \psi \vdash \Delta, \Sigma}^{(\multimap_l)}$$

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \psi, \Delta}{\Gamma \vdash \varphi \multimap \psi, \Delta}^{(\multimap_r)}$$

Pravidlá pre aditívnu konjunkciu sú dve pre ľavú stranu sekventu obsahujúce po jednom predpoklade a jedno pre stranu pravú obsahujúce dva predpoklady.

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma \varphi \& \psi, \vdash \Delta}^{(\&_{l1})}$$

$$\frac{\Gamma, \psi \vdash \Delta}{\Gamma \varphi \& \psi, \vdash \Delta}^{(\&_{l2})}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta \quad \Gamma \vdash \psi, \Delta}{\Gamma \vdash \varphi \& \psi, \Delta}^{(\&_r)}$$

Pravidlá pre multiplikatívnu disjunkciu sú dve. Pravidlo pre ľavú stranu má dva predpoklady a pre pravú stranu obsahuje jeden predpoklad.

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta \quad \Phi, \psi \vdash \Sigma}{\Gamma, \Phi, \varphi \wp \psi \vdash \Delta, \Sigma}^{(\wp_l)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \psi, \Delta}{\Gamma \vdash \varphi \wp \psi, \Delta}^{(\wp_r)}$$

Pravidlá pre lineárnu negáciu sú dve. Vyjadrujú možnosť premiestnenia formuly z jednej strany sekventu na druhú stranu.

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta}{\Gamma, \varphi^\perp \vdash \Delta}^{((\perp)_l)}$$

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma \vdash \varphi^\perp, \Delta}^{((\perp)_r)}$$

III. PETRIHO SIETE

Petriho sieť (*PN*) je známy formálny nástroj definovaný ako matematický model pre modelovanie správania sa súbežných systémov a stavovo-prechodových systémov [4]. Výhodou oproti iným výpočtovým modelom je možnosť jej prehľadného grafického zobrazenia vo forme bipartitných digrafo, ktoré majú dva typy vrcholov: miesta a prechody. *Miesta* sú zobrazené vo forme kruhov, a *prechody* sú orientované hrany. Pričom miesta vyjadrujú stav systému a prechody vyjadrujú jeho zmenu. Miesta môžu obsahovať špeciálne značenie, nazvané *značka* (z ang. *token*). Miesta môžu obsahovať ľubovoľný počet značiek. Prechod môže byť *odpálený* (z ang. *fired* ak v každom zo vstupných miest je požadovaný počet značiek. Ak je prechod odpálený, odstráni značky z vstupných miest, a vloží daný počet značiek do výstupných miest. Výpočet Petriho siete je *nedeterministický*, pretože ak je povolených viac ako jeden prechod, hociktorý môže byť odpálený. Rozloženie značiek v Petriho sieti, t.j. jej konfigurácia sa nazýva *značenie*.

Formálne, Petriho sieť je usporiadaná trojica:

$$PN = (P, T, m_0), \quad (7)$$

kde:

- $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ je konečná množina miest,
- $T = \{t_1, \dots, t_n\}$ je konečná množina prechodov,
- m_0 je počiatkové značenie.

Značenie miesta je funkcia:

$$m : P \rightarrow \mathbb{N}_0, \quad (8)$$

ktorá pre každé miesto p vráti počet značiek $m(p)$ vyskytujúcich sa v danom mieste p . \mathbb{N}_0 je množina prirodzených čísel s nulou. Značenie celej Petriho siete s miestami p_1, \dots, p_n môže byť označené n-ticou:

$$m = (m(p_1), \dots, m(p_n)). \quad (9)$$

Výpočet Petriho siete je založený na dvoch pravidlách:

- pravidlo *povolenia* (z ang. *enabling rule*) definuje podmienku, na základe ktorej prechod je povolený na odpálenie.
- pravidlo *odpálenia* (z ang. *firing rule*) definuje zmenu značenia spôsobenú odpálením prechodu.

Poznámka 1: Vo všeobecnosti je v definícii Petriho siete uvedená aj dvojica funkcií (*pre*, *post*), ktoré v našom prístupe nevyužívame. Tieto funkcie vrátia pre každé miesto a prechod počet hrán smerujúcich z daného miesta do daného prechodu, respektíve z daného prechodu do daného miesta. \square

IV. TRANSFORMÁCIA PETRIHO SIETÍ NA SEKVENTY LINEÁRNEJ LOGIKY

Na prevod Petriho siete do sekventov lineárnej logiky používame metódu, ktorú sme definovali v publikácii [13]. Miesto p obsahujúce jednu značku t.j. $m(p) = 1$, reprezentuje elementárna formula p lineárnej logiky. Značenie vyjadrujúce, že miesto p_1 obsahuje jednu značku a miesto p_2 obsahuje dve značky, je vyjadrené multiplikatívnou konjunkciou

$$p_1 \otimes p_2 \otimes p_2. \tag{10}$$

Pre reprezentáciu prechodu Petriho siete v lineárnej logike, je použitá lineárna implikácia \multimap , kde pravá strana implikácie vyjadruje značenie, ktoré povoluje odpálenie prechodu t , a ľavá strana reprezentuje značenie po odpálení prechodu t . Lineárna implikácia vyjadruje zmenu stavov spôsobenú odpálením prechodu, spolu so spotrebovaním zdrojov na ľavej strane implikácie, a vytvorené zdroje (nove značenie Petriho siete) na strane pravej. Napríklad, nech prechod t je povolený na odpálenie ak miesta p_1 a p_2 majú po jednej značke. Po odpálení t miesto p_3 získa jednu značku. Takýto prechod môže byť vyjadrený pomocou nasledujúcej formuly:

$$t \equiv p_1 \otimes p_2 \multimap p_3. \tag{11}$$

Na základe uvedeného definujeme transformáciu Petriho siete do sekventu lineárnej logiky v nasledujúcom tvare:

$$m, l \vdash m' \tag{12}$$

kde

- m je značenie pred odpálením prechodu/prechodov,
- l je zoznam prechodov vyjadrených v tvare lineárnych implikácií,
- m' je značenie po odpálení prechodu/prechodov.

Pre ilustráciu metódy transformácie Petriho siete do sekventov lineárnej logiky sme adekvátne zvolili päť triviálnych príkladov.

- *Sekvencia* (Obrázok 1). Prechod t je povolený, ak miesto p_1 ak obsahuje aspoň jednu značku. Po odpálení prechodu t , miesto p_2 získa jednu značku.

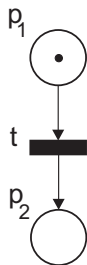


Fig. 1. Petriho sieť - Sekvencia

Táto sieť môže byť prevedená na nasledujúci sekvent lineárnej logiky:

$$p_1, t \vdash p_2, \tag{13}$$

kde $t \equiv p_1 \multimap p_2$. Tento sekvent reprezentuje *kauzálnosť*, pretože p_2 je následkom p_1 .

- *Vetvenie* (Obrázok 2). Prechod t je povolený, ak miesto p_1 ak obsahuje aspoň jednu značku. Po odpálení prechodu t , miesta p_2 a p_3 získajú súčasne po jednej značke.

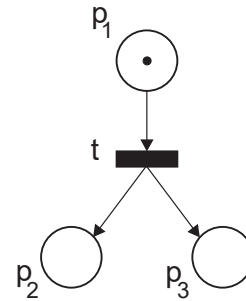


Fig. 2. Petriho sieť - Vetvenie

Táto sieť môže byť prevedená na nasledujúci sekvent lineárnej logiky reprezentujúci *súbežnosť*:

$$p_1, t \vdash p_2 \otimes p_3. \tag{14}$$

- *Stretnutie* (Obrázok 3). Prechod t je povolený, ak miesta p_1 a p_2 ak obsahujú po jednej značke. Po odpálení prechodu t , miesto p_3 získa jednu značku.

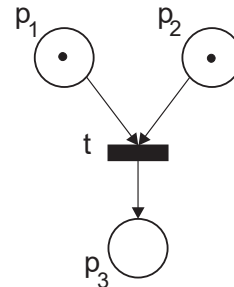


Fig. 3. Petriho sieť - Stretnutie

Táto sieť môže byť prevedená na nasledujúci sekvent lineárnej logiky reprezentujúci *synchronizáciu*:

$$p_1, p_2, t \vdash p_3. \tag{15}$$

- *Slobodná voľba* (Obrázok 4). Vyjadruje nedeterminizmus t.j. buď je povolený prechod t_1 alebo prechod t_2 , avšak nevieme rozhodnúť ktorý.

Túto sieť je možné previesť do sekventu lineárnej logiky využitím logickej spojky aditívnej disjunkcie \oplus na ľavej strane sekventu, medzi formulami vyjadrujúcimi povolené prechody. Vyjadruje *vnútorný nedeterminizmus*. Získanie značky na pravej strane sekventu je vyjadrené pomocou aditívnej konjunkcie $\&$, keďže len jedno miesto (p_1 alebo p_2) môže získať značku, v závislosti od predchádzajúcej udalosti.

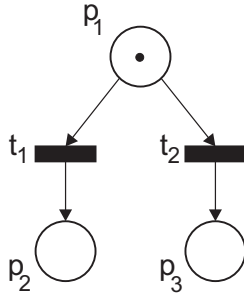


Fig. 4. Petriho sieť - Slobodná voľba

$$p_1, t_1 \oplus t_2 \vdash p_2 \& p_3. \quad (16)$$

- *Závislá voľba* (Obrázok 5). Vyjadruje nedeterminizmus t.j. buď je povolený prechod t_1 alebo prechod t_2 , avšak nevieme rozhodnúť ktorý.

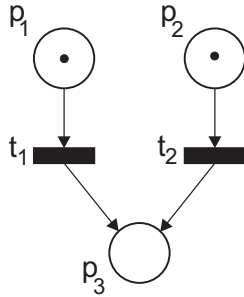


Fig. 5. Petriho sieť - Závislá voľba

Túto sieť je možné previesť do sekventu lineárnej logiky využitím logickej spojky aditívnej konjunkcie & na ľavej strane sekventu. Vyjadruje *vonkajší nedeterminizmus*.

$$p_1 \& p_2, t_1 \& t_2 \vdash p_3. \quad (17)$$

V. MOTIVAČNÝ PRÍKLAD: SYNCHRONIZAČNÝ PRÓBLÉM VZÁJOMNÉHO VYLÚČENIA

Základom nášho motivačného príkladu je známy myšlienkový experiment *problému obedujúcich filozofov* (z ang. *dining philosophers problem*) ktorý, formuloval Dijkstra v [14]. V prvom kroku modelujeme jedného obedujúceho filozofa ako triviálnu deterministickú Petriho sieť (Obrázok 6.), ktorú prevedieme na dokázateľný sekvent lineárnej logiky.

Táto triviálna Petriho sieť obsahuje:

- miesta f_1, f_2 , ktoré reprezentujú lyžice, a p_{1e} reprezentujúce obedujúceho filozofa,
- prechody t_{1e} a t_{1f} ,
- a iníciaľne značenie $m_0 = (1, 0, 1)$.

Správanie sa takejto siete je možné opísať nasledovne. Ak sú obe lyžice f_1 , a f_2 dostupné t.j. obe miesta obsahujú značku, potom prechod t_{1f} je povolený, a po jeho odpálení miesto p_{1e}

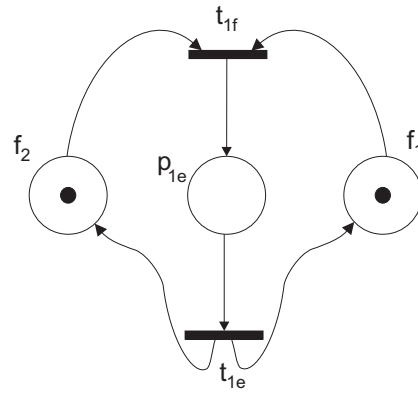


Fig. 6. Obedujúci filozof

získa značku (t.j. filozof obeduje). V tomto stave je prechod t_{1e} povolený, kde po jeho prepálení filozof uvoľní lyžice a začne rozmýšľať.

Petriho sieť je možné previesť pomocou metódy uvedenej v kapitole IV, do nasledujúceho dokázateľného sekventu lineárnej logiky:

$$f_2, f_1, (f_2 \otimes f_1) \multimap p_{1e}, p_{1e} \multimap (f_2 \otimes f_1) \vdash f_2 \otimes f_1, \quad (18)$$

s nasledujúcim dôkazom zobrazeným na obrázku 7.

$$\frac{\frac{\frac{f_2 \vdash f_2}{(id)} \quad \frac{f_1 \vdash f_1}{(\otimes-r)}}{f_2, f_1 \vdash f_2 \otimes f_1} \quad \frac{\frac{p_{1e} \vdash p_{1e}}{(id)} \quad \frac{p_{1e}, p_{1e} \multimap (f_2 \otimes f_1) \vdash f_2 \otimes f_1}{(\multimap-r)}}{p_{1e}, p_{1e} \multimap (f_2 \otimes f_1) \vdash f_2 \otimes f_1}}{f_2, f_1, (f_2 \otimes f_1) \multimap p_{1e}, p_{1e} \multimap (f_2 \otimes f_1) \vdash f_2 \otimes f_1} \quad (\multimap-l)$$

Fig. 7. Dôkaz formuly (18)

Petriho sieť zobrazenú na obrázku 6 považujeme za základný komponent. Pri kompozícii takýchto komponentov môžu vzniknúť rôzne synchronizačné problémy. Kompozíciou dvoch takýchto komponentov (Obrázok 8), vzniká známy problém nazývaný *vzájomné vylúčenie*, taktiež nazývaný aj *Mutex* (z ang. *mutual exclusion*). Interakcia v tejto Petriho sieti je reprezentovaná miestom f_2 . Základným princípom mutex-u je, že iba jeden proces sa môže vykonávať v daný moment, resp. iba jeden proces môže využívať daný zdroj. V pojmoch myšlienkového pochodu dvoch obedujúcich filozofov, ak jeden filozof obeduje (t.j. drží lyžicu), druhý rozmýšľa a vice versa. Nech iníciaľne značenie tejto Petriho siete je

$$m_0 = (1, 0, 1, 0, 1). \quad (19)$$

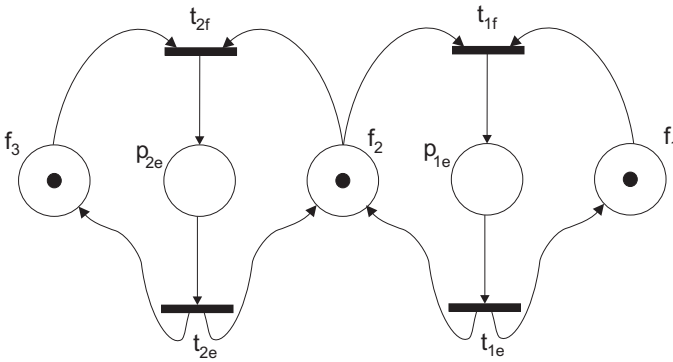


Fig. 8. Vzájomné vylúčenie - *Mutex*

Pričom existujú dve možnosti ako táto Petriho sieť pracuje:

- prechod t_{2f} je odpálený, čo korešponduje nasledujúcemu sekventu lineárnej logiky:

$$f_3, f_2, f_1, (f_3 \otimes f_2) \multimap p_{2e} \vdash p_{2e} \otimes f_1, \quad (20)$$

- prechod t_{1f} je odpálený, čo korešponduje nasledujúcemu sekventu lineárnej logiky:

$$f_3, f_2, f_1, (f_2 \otimes f_1) \multimap p_{1e} \vdash p_{1e} \otimes f_3. \quad (21)$$

Správanie sa *vzájomného vylúčenia* môže byť vyjadrené nasledujúcim dokázateľným sekventom lineárnej logiky:

$$f_3, f_2, f_1, ((f_2 \otimes f_1) \multimap p_{1e}) \oplus ((f_3 \otimes f_2) \multimap p_{2e}) \vdash (p_{1e} \otimes f_3) \& (p_{2e} \otimes f_1). \quad (22)$$

V sekvente (22) používame vnútorný nedeterminizmus na ľavej strane t.j. využitím aditívnej disjunkcie \oplus medzi prechodmi t_{2f} a t_{1f} . Na pravej strane sekventu využívame aditívnu konjunkciu $\&$ medzi značkami, pretože závisia od toho, ktorý prechod (t_{2f} alebo t_{1f}) bol odpálený. Sekvent (22) je dokázateľný. Na obrázku 9 je zobrazená ľavá vetva dôkazového stromu. Pričom pravú vetvu dôkazového stromu je možné skonštruovať analogicky.

V ďalšom kroku sme ilustrovali synchronizačný problém známy ako *deadlock*, ktorý je možné v myšlienkovom pochode obedujúcich filozofov demonštrovať ako kompozíciu *piatich obedujúcich filozofov*. V publikácii [13] sme demonštrovali *deadlock* ako Petriho sieť, ktorú sme previedli do dokázateľných sekventov lineárnej logiky.

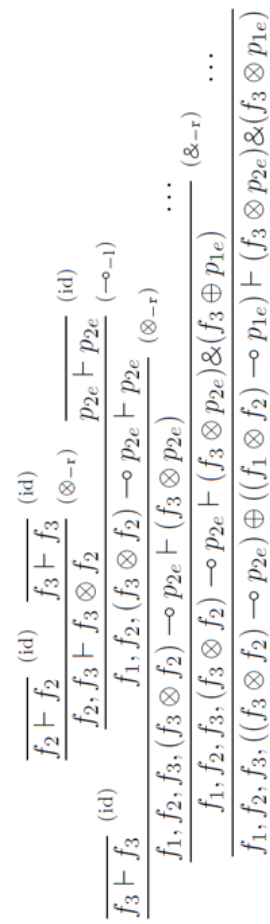


Fig. 9. Dôkaz (22)

VI. ZÁVER

V tomto článku sme ilustrovali metódu transformácie Petriho siete do dokázateľných sekventov lineárnej logiky. Definovali sme jednoduchú Petriho sieť, ktorú sme použili ako základný komponent. Ukázali sme ako kompozíciou takýchto komponentov vznikne synchronizačný problém vzájomného vylúčenia (*mutex*). Demonštrovali sme ako tento synchronizačný problém môže byť formálne špecifikovaný pomocou Petriho sietí a následne prevedený do dokázateľných sekventov lineárnej logiky. Dôkaz konštruovaných sekventov zaručuje korektnosť špecifikácie systému. Hlavným prínosom našej práce je systematicky vypracované riešenie pre praktických programátorov resp. študentov matematických a informatických vied, ako rôzne formálne metódy môžu byť kombinované a dokázané a ilustrovali sme ich na praktickom príklade kompozície komponentov. V budúcnosti plánujeme rozšíriť náš prístup a farbené Petriho siete, definovať metódu ich transformácie do lineárnej logiky.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená nasledujúcimi projektami:

- Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (APVV) prostredníctvom vedeckovýskumného projektu č. SK-AT-

2017-0012: *Sémantické technológie pre výučbu informatiky*,

- Fakultou elektrotechniky a informatiky, Technickej univerzity v Košiciach prostredníctvom vedeckovýskumného projektu č. FEI-2018-59: *Sémantický stroj zdrojovo-orientovanej transparentnej intenzionálnej logiky*.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] C. Szyperski, "Component software: beyond object-oriented programming. 1998," *Harlow, England: Addison-Wesley*, 1995.
- [2] F. Bachmann, L. Bass, C. Buhman, S. Comella-Dorda, F. Long, J. Robert, R. Seacord, and K. Wallnau, *Volume II: Technical concepts of component-based software engineering*. Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute, 2000.
- [3] A. Tripathi *et al.*, "Dependence analysis of software component," *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, vol. 35, no. 4, pp. 1–9, 2010.
- [4] J. L. Peterson, "Petri net theory and the modeling of systems," 1981.
- [5] J.-Y. Girard, "Linear logic," *Theoretical computer science*, vol. 50, no. 1, pp. 1–101, 1987.
- [6] J.-Y. Girard, *The Blind Spot*, ser. Lectures on proof-theory. Institut de Mathématiques de Luminy, Marseille, France, 2011.
- [7] U. Engberg and G. Winskel, "Linear logic on petri nets," in *Workshop/School/Symposium of the REX Project (Research and Education in Concurrent Systems)*. Springer, 1993, pp. 176–229.
- [8] —, "Petri nets as models of linear logic," in *Colloquium on Trees in Algebra and Programming*. Springer, 1990, pp. 147–161.
- [9] N. Martí-Oliet and J. Meseguer, "From petri nets to linear logic," in *Category Theory and Computer Science*. Springer, 1989, pp. 313–340.
- [10] M. Dummett, "The philosophical basis of intuitionistic logic," in *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*. Elsevier, 1975, vol. 80, pp. 5–40.
- [11] J.-Y. Girard, "Locus solum: From the rules of logic to the logic of rules," *Mathematical Structures in Computer Science*, vol. 11, no. 3, pp. 301–506, 2001.
- [12] D. Mihályi and V. Novitzká, "Princípy duality medzi konštruovaním a správaním programov," 2010.
- [13] J. Perháč, D. Mihályi, and V. Novitzká, "Modeling synchronization problems: from composed petri nets to provable linear sequents," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 14, no. 8, pp. 165–182, 2017, (indexované WoS, Scopus, IF: 0.909).
- [14] E. W. Dijkstra, "Hierarchical ordering of sequential processes," in *The origin of concurrent programming*. Springer, 1971, pp. 198–227.

Porovnanie impulzového a M-sekvenčného UWB radaru pre odhad hrúbky steny

Miroslav Repko

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita Košice
Email: miroslav.repko@tuke.sk

Ján Gamec

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita Košice
Email: jan.gamec@tuke.sk

Abstrakt—V našom laboratóriu sme vyvinuli jednoduchú metódu odhadu hrúbky steny pomocou UWB (Ultra Wide-band) radarového systému. Opísaná metóda pracuje v dvoch krokoch. Prvým krokom je odhad relatívnej permitivity steny a druhým krokom je odhad jej hrúbky. Relatívna permitivita steny sa odhaduje pomocou metódy, ktorá bola vyvinutá v našom laboratóriu. Hrúbka steny sa odhaduje z obálky prijatého signálu, pričom obálka prijatého signálu sa ráta pomocou Hilbertovej transformácie. Obe metódy merania boli vyvinuté pre impulzový radar. Teoreticky táto metóda má pracovať aj pre systém pozostávajúci z M-sekvenčného radaru, pretože oba systémy pracujú v časovej oblasti. Tento článok overuje funkčnosť vyvinutej metódy odhadu hrúbky steny na M-sekvenčnom radare a porovnáva výsledky z meraní s výsledkami z impulzového radaru.

Kľúčové slová — odhad permitivity, impulzový radar, M-sekvenčný radar, UWB radar, hrúbka materiálu.

Abstract — In our laboratory, we developed a simple estimation of the wall thickness by the UWB (Ultra Wide-Band) radar system. The described technique measures the wall thickness in the two steps. The first step is a measurement of the wall relative permittivity. The second step is a reflections localisation and estimation of the wall thickness. The borders of the wall could be detected by the envelope of the received signals. The described technique calculates the signal envelope by the Hilbert transform. Moreover, the relative permittivity of the wall is estimated by the technique developed in our department as well. This technique was developed for the impulse radar system. The aim of this article is compare the results from impulse radar system with M-sequence radar system which operates in the time domain as well measuring wall relative permittivity and wall thickness estimation.

Keywords — permittivity estimation, impulse radar, M-Sequence radar, UWB radar, material thickness

I. ÚVOD

Výskum v oblasti lokalizácie pohybujúcich sa objektov za prekážkami je veľmi dôležitý v oblasti bezpečnostných aplikácií. V oblasti výskumu určenej pre policajné, alebo protiteroristické zložky sa vyžaduje lokalizácia osôb za prekážkami, akými sú napríklad steny. V našom laboratóriu sa zaoberáme výskumu UWB (Ultra Wide-band) radarového systému, ktorý je vhodný pre takéto aplikácie. Výhodou tohto systému je fakt, že takýto systém nemusí byť inštalovaný v

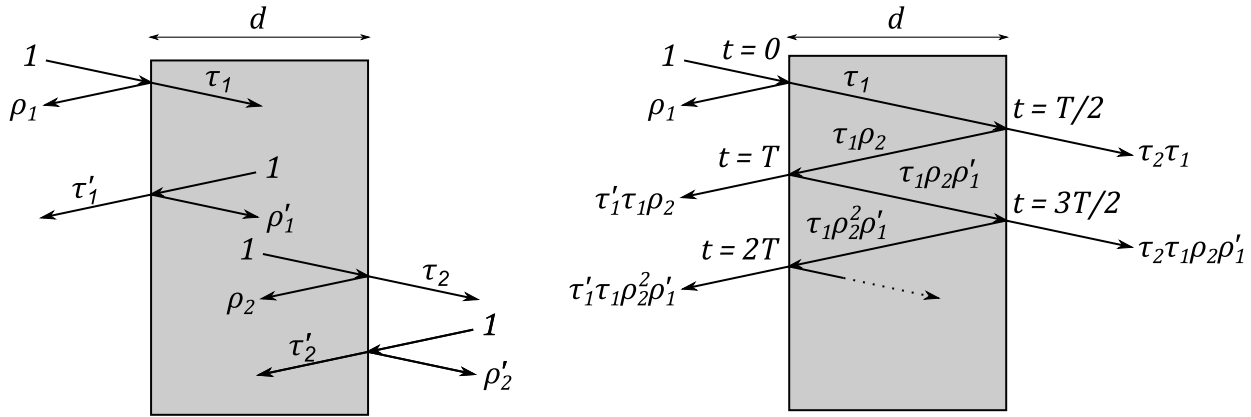
monitorovanom priestore pred tým, než si to okolnosti vyžadujú [1]. V procese lokalizácie osôb za prekážkou je potrebné poznať vlastnosti danej prekážky ako sú jej hrúbka a relatívna permitivita [1]. Najnovší výskum ukazuje, že aj minimálny pohyb akým je dýchanie je dostatočný pre úspešnú a presnú lokalizáciu osoby [2]. Tieto parametre budú následne použité v procese lokalizácie osôb v časti Kompenzácia efektu steny [4]. Z možnej aplikácie bezpečnostnými zložkami vyplývajú nasledujúce podmienky na metódu merania permitivity [3]:

- Meranie musí byť realizované z jedinej strany steny;
- Meranie musí byť nedeštruktívne;
- Meranie musí byť časovo nenáročné;
- Realizácia metódy by mala byť lacná;
- Metóda merania permitivity má byť rozšíriteľná o metódu merania hrúbky materiálu.

V našom laboratóriu bola vyvinutá nová metóda merania permitivity a hrúbky materiálu s použitím impulzového UWB radaru [5]. Táto metóda využíva na meranie permitivity materiálu a jeho hrúbky rovnaké zariadenia ako sú použité pri lokalizácii osôb. Tým sa znížujú náklady na realizáciu samotného merania. Vyvinutá metóda merania využíva na svoje meranie iba odrazené signály, takže je meranie realizované iba z jednej strany meraného objektu. Navyše sa jedná o derivát free-space metódy merania z čoho vyplýva, že meraná metóda je nedeštruktívna. Navrhnutá metóda pre svoju funkčnosť využíva merací systém, v ktorom prebieha meranie v časovej oblasti. Metóda bola vyvinutá pre impulzový radar [6], avšak lokalizácia osôb sa realizuje prevažne pomocou M-sekvenčného radaru z dôvodu jeho kompaktnosti v porovnaní s impulzovým radarom. Preto by bolo vhodné overiť funkčnosť metódy aj na meranie pomocou M-sekvenčného radaru, čomu sa venuje práve tento článok. Výsledky odhadu relatívnej permitivity a hrúbky steny sú porovnané práve medzi týmito dvoma zariadeniami.

Postup merania pre odhad hrúbky materiálu, v tomto prípade steny, je realizovaný v dvoch krokoch. Prvým krokom je meranie relatívnej permitivity steny na základe ktorej je v druhom kroku určená hrúbka steny.

Existuje aj iná metóda merania hrúbky materiálu [7], avšak táto metóda meria hodnotu permitivity s nedostatočnou presnosťou.



Obr. 1. Diagram mnohonásobného odrazu vo vnútri steny.

Ako bolo spomenuté táto metóda bola vyvinutá pre meranie pomocou impulzového radaru. Tento článok sa zaoberá porovnaním výsledkov s výsledkami z M-sekvenčného radaru. Obe radary pracujú v časovej oblasti. Hlavným rozdielom v prípade radarov je ten, že M-sekvenčný radar je v porovnaní s impulzovým radarom kontinuálne vysielajúci. Na druhú stranu, výhodou M-sekvenčného radaru je to, že stredná hodnota vysielanej M-postupnosti je rovná nule.

II. METÓDA OHADU RELATÍVNEJ PERMITIVITY

Permitivita, taktiež nazývaná aj dielektrická konštanta opisuje interakciu materiálu s elektrickým poľom. Je to komplexná a frekvenčne závislá veličina, ktorá je jedinečná pre každý materiál. V praxi sa často stretávame s relatívnou permitivitou namiesto jej celej formy, ktorá sa ráta z pomeru celkovej permitivity a permitivity vákuua. Relatívna permitivita je definovaná ako

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \varepsilon'_r(1 - j \tan \delta_\varepsilon), \quad (1)$$

kde ε je celková hodnota permitivity materiálu (steny) a ε_0 je permitivita vákuua. ε'_r a ε''_r sú reálna a imaginárna hodnota relatívnej permitivity. $\tan \delta_\varepsilon$ predstavuje stratový činiteľ, ktorý sa ráta z pomeru reálnej a imaginárnej časti relatívnej permitivity.

Komplexná relatívna permeabilita μ_r , ktorá opisuje interakciu materiálu na magnetickú zložku EM poľa je definovaná podobne [8]. Z dôvodu aplikácie v bezpečnostných systémoch je vhodnejšie realizovať rýchly odhad parametrov steny než zdĺhavé, veľmi presné meranie. Je nutné čitateľa upozorniť na to, že prezentovaná metóda merania predpokladá, že meranie prebieha na dielektrickom materiáli, pre ktorý je relatívna permeabilita rovná jeden ($\mu_r = 1$). Navyše predpokladáme, že reálna časť relatívnej permitivity je omnoho väčšia v porovnaní s jej stratovým činiteľom ($\varepsilon''_r \gg \tan \delta_\varepsilon$). Potom môžeme napísať, že $\tan \delta_\varepsilon \approx 0$.

Táto metóda je založená na meraní koeficienta odrazu Γ v časovej oblasti. Koeficient odrazu Γ predstavuje sumu elementárnych koeficientov odrazu a prenosu na jednom rozhraní vzduchu a steny, pričom vo vnútri steny vzniká nekonečný rad

odrazov. Problém mnohonásobného odrazu vo vnútri steny je ukázaný na obrázku 1.

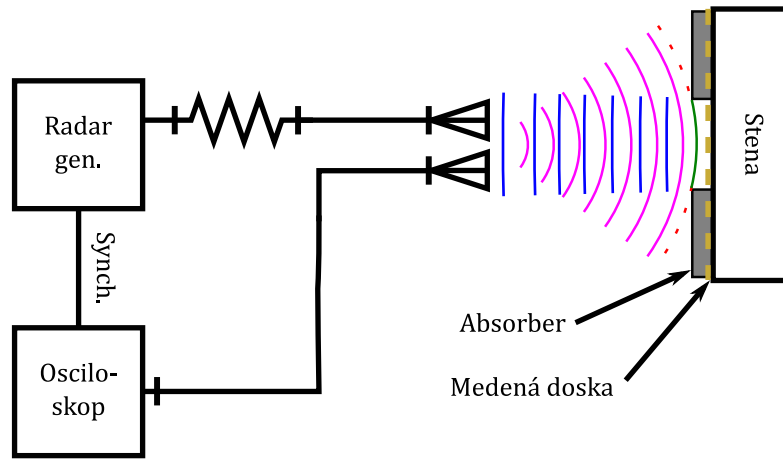
Na obrázku 1 predstavuje ρ elementárny koeficient odrazu a τ predstavuje elementárny koeficient prenosu. Pomocou čísla v indexe pri danom koeficiente je možné určiť na ktorom rozhraní došlo k odrazu, alebo prenosu a pomocou apostrofu sa určuje smer pôvodnej inicializovanej vlny. V prípade obrázku 1 bola intenzita poľa inicializačnej vlny rovná hodnote "1". Potom hodnota intenzity poľa vlny odrazenej, alebo priechodnej sa priamo rovná hodnote koeficienta odrazu, alebo prenosu. T predstavuje čas, ktorý vlna potrebuje pre prejdienie hrúbky materiálu d dva-krát.

Nech je potom v propagačnom materiály typu vzduch inicializovaná vlna typu Dirackovho impulzu $\delta(t)$ s intenzitou poľa rovnou "1", ktorá v čase $t = 0$ dopadá na neznámy materiál o hrúbke d . Časť vlny sa pri dopade odrazí, čo vyjadruje ρ , a časť prejde do neznámeho materiálu, čo vyjadruje τ . V čase $t = T/2$ dochádza k ďalšiemu štiepeniu vlny na druhom rozhraní neznámeho materiálu a vzduchu. Týmto spôsobom vo vnútri steny dochádza k nekonečnému počtu odrazov EM vlny, pričom ich intenzita sa neustále znižuje. Koeficient odrazu Γ sa potom pre tento prípad rovná súčtu všetkých častí pôvodnej vlny cestujúci smerom vľavo od prvého rozhrania materiálu a vzduchu na obrázku 1. Potom je pre Γ množné napísať vzťah [9]

$$\Gamma(t) = \rho_1 \delta(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \tau_1 \tau'_1 (\rho'_1)^{n-1} \rho_2^n \delta(t - nT). \quad (2)$$

V prípade, kedy je hrúbka materiálu nekonečná nedochádza k odrazu od druhého rozhrania steny a vzduchu. Vtedy pracujeme s modelom nekonečného polpriestoru. Keďže v tomto modeli neexistuje odraz od druhého rozhrania steny a vzduchu tak sa koeficient odrazu Γ rovná priamo prvému elementárnemu koeficientu odrazu ρ_1 . To sa dá odvodiť aj zo vzťahu (2), kde sa v limite pre $T \rightarrow \infty$ suma vyšších odrazov rovná nule.

Ako bolo spomenuté, hlavnou podmienkou pre systém pracujúci s touto metódou je, že meranie musí prebiehať v časovej



Obr. 2. Schéma merania.

oblasti. Impulzový aj M-sekvenčný radar pracujú práve v časovej oblasti. Na signály v časovej oblasti sa dá aplikovať oknovacia funkcia. Táto oknovacia funkcia slúži na výber časti signálu, ktorý zodpovedá prvému odrazu od prvého rozhrania steny a vzduchu. Oknovacia funkcia musí končiť ešte pred časom $t = T$, kedy sú zaznamenané vzorky signálu odrazeného od druhého rozhrania steny a vzduchu. Pre takto vybranú časť signálu, v ktorej sa nachádzajú vzorky zodpovedajúce iba elementárnemu odrazu od prvého rozhrania, sa dá povedať, že táto časť bola odobraná od modelu steny s nekonečným polpriestorom. Potom pre tento prípad platí, že koeficient odrazu Γ sa rovná elementárnemu koeficientu odrazu ρ_1 , ktorý závisí od intrinzičných vlastností neznámeho materiálu. Potom sa dá napísať vzťah

$$\Gamma = \rho = \frac{\sqrt{\frac{\mu'_r(1-j \tan \delta_\mu)}{\varepsilon'_r(1-j \tan \delta_\varepsilon)} - 1}}{\sqrt{\frac{\mu'_r(1-j \tan \delta_\mu)}{\varepsilon'_r(1-j \tan \delta_\varepsilon)} + 1}}. \quad (3)$$

Ako bolo spomenuté vyššie, ak sa meranie vykonáva na dielektrickom materiály, tak je možné zanedbať relatívnu permeabilitu ($\mu'_r = 1, \tan \delta_\mu = 0$). Navyše ak platí, že reálna časť relatívnej permitivity je omnoho väčšia ako jej stratový činiteľ, tak aj ten sa dá považovať za zanedbateľne malý ($\tan \delta_\varepsilon \approx 0$). Potom sa dá vzťah (3) upraviť do podoby

$$\varepsilon'_r = \left(\frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \right)^2. \quad (4)$$

III. METÓDA ODHADU HRÚBKY STENY

Druhou časťou navrhutej metódy je odhad hrúbky steny. Táto časť merania je realizovaná na obálke signálu odrazeného od steny v časovej oblasti. Obálka signálu je vypočítaná pomocou Hilbertovej transformácie ako absolútna hodnota analytického signálu, ktorý sa skladá z pôvodného signálu a Hilbertovho komponentu. Tento typ transformácie neprekladá signál do inej oblasti, ale ostáva v rovnakom priestore ako pôvodný signál (v tomto prípade časovej oblasti), čo vyplýva aj zo samotnej definície Hilbertovej transformácie. Hilbertová

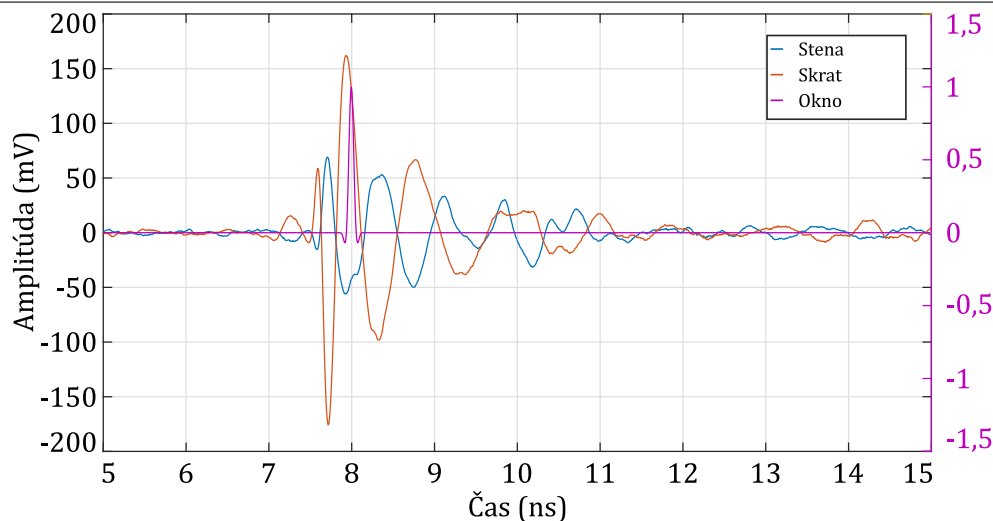
transformácia je definovaná ako konvolúcia pôvodného signálu a Hilbertovho transformátora $1/(\pi t)$. V obálke prijatého signálu sa nachádzajú významné špičky, ktoré nesú informáciu o tom, kedy dochádza k odrazu od rozhrania steny a vzduchu. Nech sa prvá špička nachádza v čase t_1 , ktorý nesie informáciu o čase odrazu signálu od prvého rozhrania steny a vzduchu. t_1 však nie je čas kedy došlo k odrazu, ale kedy bola vzorka signálu nesúca informáciou o tejto udalosti zaznamenaná prijímacou časťou radaru. Podobne to platí pre druhú špičku v čase t_2 , ktorá nesie informáciu o odraze signálu od druhého rozhrania steny a vzduchu. Potom rozdiel týchto časov $\Delta t = t_2 - t_1$ hovorí o čase, ktorý potrebuje signál na prejde hrúbky materiálu d dva-krát. Podľa obrázku 1 zodpovedá čas $\Delta t = T$. Časy t_1 a t_2 sú taktiež dôležité pre prvú časť navrhutej metódy, a to preto, aby bola korektne nastavená poloha oknovacej funkcie. Tá sa musí nachádzať v časovom intervale $\langle t_1, t_2 \rangle$, pretože tento časový úsek zodpovedá elementárnemu odrazu od prvého rozhrania ρ . Z frekvenčnej charakteristiky relatívnej permitivity z predošlej časti merania je možné vypočítať priemernú relatívnu permitivitu $\varepsilon_{r_{so}}$ ako geometrický priemer jej frekvenčnej závislosti. Na základe priemernej hodnoty relatívnej permitivity a Δt je možné následne vypočítať hrúbku steny podľa vzťahu

$$d = \frac{c\Delta t}{2\sqrt{\varepsilon_{r_{so}}}}, \quad (5)$$

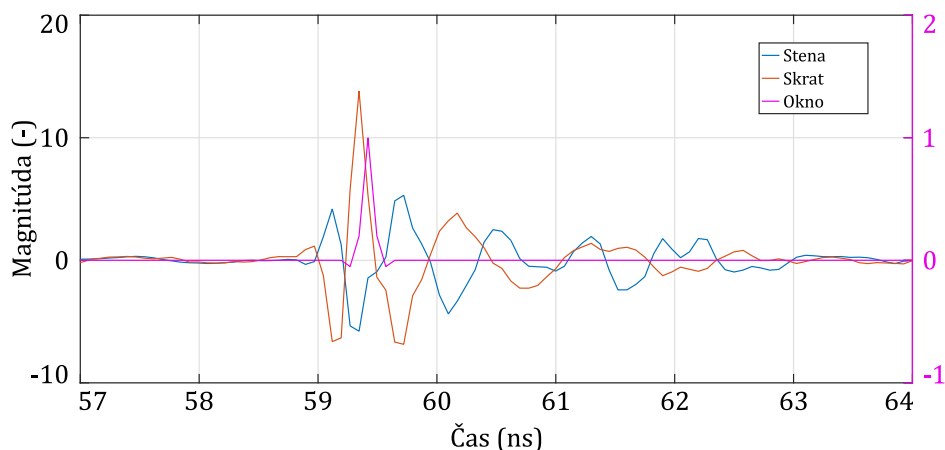
kde c predstavuje rýchlosť svetla. Tento vzťah je možné použiť pre tento prípad pretože Δt predstavuje skupinové oneskorenie signálu a navyše vieme, že rýchlosť šírenia sa signálu v dielektrickom materiáli je nižšia v závislosti od jeho relatívnej permitivity.

IV. MERACÍ SYSTÉM

Na obrázku 2 sa nachádza Diagram merania permitivity a hrúbky steny. Generátor radarového signálu a osciloskop sú súčasťou jedného radarového systému. Bolo vykonaných mnoho meraní, ale v tomto článku sú prezentované iba demoštračné merania. Merania boli realizované pomocou im-



Obr. 3. Namerané priebehy a oknovacia funkcia z impulzového radaru.



Obr. 4. Namerané priebehy a oknovacia funkcia z M-sekvenčného radaru.

pulzového radaru Geozondas (GZ1117DN-50, SD-10806) a M-sekvenčného radaru Imsens (Imsens SH-3100).

Na meranie boli navyše použité lievnikové antény (DRH10 od spoločnosti RF spin), ktoré boli pripojené k radaru pomocou 50Ω koaxiálnych vedení.

Vzťahy opísané v predchádzajúcej kapitole platia iba pre prípad, kedy na stenu dopadá rovinná vlna, teda vlna, ktorej vlnoplocha je paralelná s rovinou steny. To v praxi pri použití lievnikovej antény nie je možné dosiahnuť. Absorbery (ECO-SORB AN-77) sú použité na útlm vlny dopadajúcej na stenu v miestach, v ktorých je možné považovať zakrivenie vlny v porovnaní s rovinnou stenou za značné. V skutočnosti bolo použitých osem absorberov v tvare 3×3 s medzerou uprostred. Na obrázku 2 je vysielaná vlna znázornená ružovou farbou. Červená prerušovaná čiara predstavuje časť dopadajúcej vlny, ktorej zakrivenie je značné a je utlmená pomocou absorberov. Zelená časť dopadajúcej vlny môže byť považovaná za paralelnú s povrchom steny a je následne orazená, čo je znázornené modrou vlnou.

Medená doska je súčasťou kalibračného procesu meranieho

systému s slúži na získanie tvaru dopadajúcej vlny, pretože na rozhraní vzduchu a medenej dosky dochádza k úplnému odrazu vlny. Pre meranie je však potrebný odraz od nekonečne veľkej impedancie. Ten sa dá vypočítať fázovým posunutím signálu odrazeného od medenej dosky o $\pi \text{ rad}$.

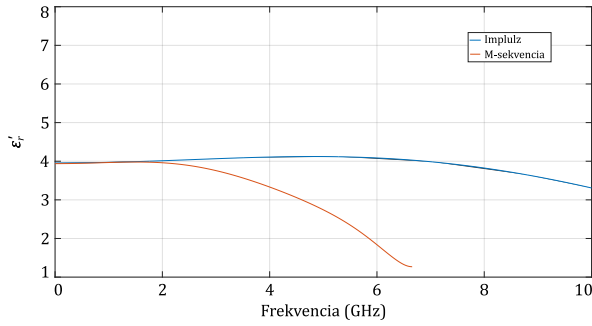
Meranie bolo realizované na $0,17 \text{ m}$ hrubej stene v priestoroch laboratória.

Antény meracieho systému boli umiestnené vo vzdialenosti $1,2 \text{ m}$ od steny, pričom boli v jednej línii so stredom absorberov.

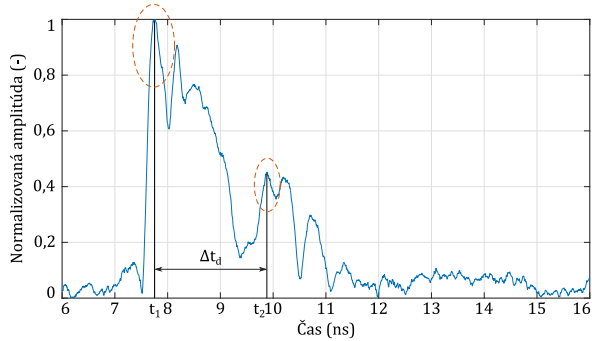
Samotné meranie spolu s meraniami pre kalibračný proces vyžaduje meranie troch impulzových odpovedí:

- $h_w(t)$ - Meranie steny;
- $h_s(t)$ - Meranie medenej dosky;
- $h_f(t)$ - Meranie voľného priestoru.

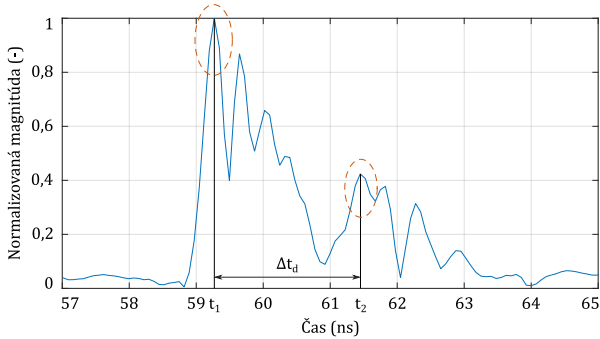
Meranie od medenej dosky slúži na zistenie tvaru vysielanej vlny, pretože na jej rozhraní dochádza k úplnému odrazu. Meranie voľného priestoru predstavuje meranie materiálu v ktorom nevznikne žiaden ďalší odraz. Vzniknuté odrazy v tomto prípade sú spôsobené neprispôbeniami použitého me-



Obr. 5. Vypočítané frekvenčné závislosti relatívnej permitivity.



Obr. 6. Obálka prijatého signálu vypočítaná z priebehu prijatého signálu pre impulzový radar.



Obr. 7. Obálka prijatého signálu vypočítaná z priebehu prijatého signálu pre M-sekvenčný radar.

racieho systému. Týmto spôsobom je možné zmerať vplyv meracieho systému.

Potom je možné vzťah pre výpočet relatívnej permitivity napísať ako

$$\epsilon'_r = \left(\frac{1 + \frac{\mathcal{F}\{[h_w(t) - h_f(t)] \cdot w(t)\}}{\mathcal{F}\{[h_f(t) - h_s(t)] \cdot w(t)\}}}{1 - \frac{\mathcal{F}\{[h_w(t) - h_f(t)] \cdot w(t)\}}{\mathcal{F}\{[h_f(t) - h_s(t)] \cdot w(t)\}}} \right)^2, \quad (6)$$

kde $\mathcal{F}(\cdot)$ predstavuje Fourierovú transformáciu. Oproti vzťahu (4) má tento vzťah prehodené znamienka $+/-$ a to z dôvodu otočenia fázy o π rad pre prípad merania odrazu od referencie typu skrat a nie od nekonečne veľkej impedancie.

V. MERANIE

Ako bolo spomenuté, pre každý merací systém boli vykonané tri merania. Na obrázkoch 3 a 4 sa nachádzajú namerané priebehy už po odčítaní vplyvu meracieho systému $h_w(t) - h_f(t)$ a $h_s(t) - h_f(t)$. Navyše je v týchto priebehoch vidieť použitú Flat-top oknovaciu funkciu.

V oboch meraniach, v obrázkoch 3 a 4, je modrou farbou znázornený priebeh signálu reprezentujúci odraz od steny, oranžovou farbou je znázornený odraz od medenej dosky a ružovou farbou je znázornená použitá oknovacia funkcia.

V prípade impulzového radaru bola šírka Flat-top oknovacej funkcie nastavená tak, aby hodnota -3 dB hlavného laloka pripadala na frekvenciu 6 GHz. Táto hodnota je vybraná zámerné, a to z dôvodu použitých meracích systémov. Celkovo výsledky z merania sú platné v rozsahu $\langle 0, 6 \rangle$ GHz, čo je zapríčinené použitými zosilňovačmi a anténami.

Už na prvý pohľad je z nameraných priebehov v obrázkoch 3 a 4 zjavná odlišnosť v označení osí. Pretože impulzová charakteristika sa v prípade M-sekvenčného radaru ráta z korelácie prijatej a vysielanej M-sekvencie, tak je aj poloha na časovej osi náhodná. Taktiež samotná hodnota je označená ako bezrozmerná magnitúda. Tieto odlišnosti nie sú pre meranie tohto typu dôležité. Dôležité je ich vzájomné rozporenie a pomer hodnôt.

Taktiež je z obrázkov nameraných priebehov viditeľné, že vzorkovacia frekvencia v prípade M-sekvenčného radaru je omnoho nižšia. Pri nastavení šírky oknovacej funkcie tak ako to bolo pre impulzový radar bola šírka okna príliš malá a hodnota relatívnej permitivity sa nedala vypočítať z malého počtu vzoriek. Preto bola šírka aktívnej časti zväčšená, čo však malo za následok zúženie hlavného laloka. V jeho prípade pripadal útlm -3 dB hlavného laloku na frekvenciu 3 GHz. Preto je šírka pásma pre M-sekvenčný radar v akom je uvažované s platnými dátami v rozsahu $\langle 0, 6 \rangle$ GHz.

Pozícia Flat top okna bola nastavená tak, aby špička oknovacej funkcie bola takmer zhodná s najvýraznejšou špičkou nameraného signálu, kde sa nachádza najviac energie prijatého signálu. Zároveň je oknovacia funkcia nastavená tak, aby platila podmienka kedy sa časť oknovacej funkcie s hodnotami nula začínala ešte pred tým, než sú zaznamenané vzorky zodpovedajúce vyšším prvkom koeficienta odrazu. Potom sú v signále zaznamenané vzorky odpovedajúce iba elementárnemu koeficientu odrazu ρ .

Z nameraných priebehov boli pomocou vzťahu (6) vypočítané frekvenčné závislosti relatívnej permitivity. Tieto závislosti sú znázornené na obrázku 5.

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej časti platné výsledky pre impulzový radar sú vo frekvenčnej oblasti $\langle 0, 6 \rangle$ GHz a pre M-sekvenčný radar $\langle 0, 6 \rangle$ GHz. V týchto rozsahoch bola vypočítaná priemerná hodnota relatívnej permitivity pre jednotlivé systémy. Pre impulzový radar bola vypočítaná hodnota permitivity na $\epsilon_{r_{so,Im}} = 3.9837$ a pre M-sekvenčný radar $\epsilon_{r_{so,Ms}} = 3.9697$.

Následne boli pre jednotlivé signály odrazené od steny pre jednotlivé systémy vypočítané obálky za pomoci Hilbertovej

transformácie. Tieto obálky sú zobrazené na obrázkoch 6 a 7. V oboch priebehoch obálok sú zjavné špičky, ktoré nesú informáciu o časoch kedy boli zaznamenané vzorky signálu zodpovedajúce odrazom od rozhraní. Pre signál z impulzového radaru sú $t_1 = 7,723 \text{ ns}$ a $t_2 = 9,982 \text{ ns}$. Potom sa $\Delta t_{Im} = 2,169 \text{ ns}$. Pre M-sekvenčný radar sú hodnoty špičiek zodpovedajúcich odrazom pre $t_1 = 59,268 \text{ ns}$ a $t_2 = 61,4483 \text{ ns}$ z čoho vyplýva $\Delta t_{Ms} = 2,1785 \text{ ns}$.

Z hodnôt priemernej relatívnej permitivity a časov Δt boli vypočítané pomocou vzťahu (5) odhady hrúbok meraného materiálu (steny). Pre meranie pomocou impulzového radaru bola odhadnutá hrúbka steny na $d_{Es,Im} = 162,9 \text{ mm}$ a pre M-sekvenčný radar $d_{Es,Ms} = 163,9 \text{ mm}$. Tieto hodnoty merania steny sa takmer zhodujú a je medzi nimi iba minimálna odchýlka.

Následne bola pomocou laserového merača (Leica Disto D8) odmeraná referenčná hodnota hrúbky steny na $d_M = 173,2 \text{ mm}$. Odchýlka merania v tejto hodnoty hrúbky steny a odhadnutej hodnoty pomocou navrhutej metódy je pre použitie v lokalizácií osôb za prekážkami zanedbateľná.

VI. ZÁVER

Tento článok sa zameriava na novú metódu odhadu hrúbky materiálu. Táto metóda bola pôvodne vyvinutá pre impulzový UWB radar. Keďže aj M-sekvenčný radar rovnako ako impulzový radar pracuje v časovej oblasti, tak bolo vhodné overiť funkčnosť navrhutej metódy aj pre M-sekvenčný radar. V tomto článku je prezentované jedno demonštračné meranie pre každý typ radaru. Presnosť demonštračných meraní je $\Delta d_{Im} = 10,3 \text{ mm}$ a $\Delta d_{Ms} = 9,3 \text{ mm}$. Táto hodnota odchýlky merania je stále dostatočná pre presnú lokalizáciu osôb za prekážkami, akými sú napríklad steny. Odchýlka me-

rania môže byť spôsobená použitými oknovacími funkciami, alebo faktom, že v skutočnosti sa nemusí odraz od rozhrania nachádzať na špičke v prienu obálky, ale niekde na jej nábežnej hrane. To je spôsobené fázovým otáčaním signálu pri prechode z oblasti z nižšej charakteristickej impedancie do vyššej a naopak.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla za podpory agentúry na podporu výskumu a vývoja pod číslom APVV-15-1692. Navyše bola táto práca podporovaná vedeckou grantovou agentúrou pod projektom VEGA 1/0772/17.

LITERATÚRA

- [1] D. Kocur, J. Rovňáková, *Experimental Comparison of Two UWB Radar Systems for the Through-wall Tracking Application*, "Acta Electrotechnica et Informatica", Vol. 16, No. 3, pp. 54-59, 2016.
- [2] D. Novák, J. Schneider, D. Kocur, *Static Person Detection and Localization Based on Their Respiratory Motion Using Various Antenna Types*, "Acta Electrotechnica et Informatica", Vol. 16, No. 3, pp. 54-59, 2016.
- [3] P. Kažimír, D. Kocur, *Simple Method of Uncooperative Human Beings Localisation in 3D Space by UWB Radar*, "Acta Electrotechnica et Informatica", Vol. 14, No. 4, pp. 8-12, 2012.
- [4] J. Rovňáková, D. Kocur, *Compensation of Wall Effect for Through Wall Tracking of Moving Targets*, "Radioengineering", Vol. 18, No. 2, pp. 189-195, 2009.
- [5] M. Repko, J. Gamec, *Simple Permittivity of the Wall Estimation Technique by the UWB Radar System*, "Progress In Electromagnetics Research Symposium 2017", pp. 1703-1708, 2017.
- [6] M. Repko, J. Gamec, *Comparison of Impulse and M-sequence Radar System for Estimation of Relative Permittivity*, "19th International Radar Symposium (IRS)", pp. 1-8, 2018.
- [7] P. Protiva, J. Mrkvica, J. Macháč, *Estimation of Wall Parameters from Time-Delay-Only Through-Wall Radar Measurements*, "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", Vol. 59, No. 11, pp. 4268-4278, 2011.
- [8] J. F. White, *High Frequency techniques: An Introduction to RF and Microwave Design and Computer Simulation*, John Wiley & Sons, 2004.
- [9] S. J. Orfanidis, *Electronic waves and antennas*, Rutgers University, 2016.

Integrovaný UWB radar emitujúci M-postupnosť na báze ASIC obvodov

Stanislav Slovák

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita v Košiciach
Email: stanislav.slovak@tuke.sk

Pavol Galajda

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita v Košiciach
Email: pavol.galajda@tuke.sk

Abstrakt—Článok pojednáva o realizácii, meraniach a testovaní integrovanej hlavice UWB radaru pracujúceho v režime kontinuálne generovaného stimulačného signálu. Pojem UWB je odvodený od použitej šírky frekvenčného pásma. Stimulačný signál je výsledkom modulácie nosného signálu rozprestierajúcou postupnosťou, ktorá má za následok rozprestretie frekvenčného spektra. V praxi sú využívané frekvenčné pásma od DC do 13 GHz. Tento stimulačný signál vďaka svojim parametrom nepredstavuje zdroj rušenia. Ak by sme boli schopní tento signál zachytiť konvenčným zariadením, predstavoval by pre nás len akýsi šum. V kontexte UWB radarov emitujúcich signál s rozprestretým spektrom je často zaužívaný pojem šumový radar. Generovaný rozprestierajúci signál je výsledkom generovania pseudonáhodného šumového modulačného signálu. Princíp generovania ako aj opis vysieláča je podrobnejšie opísaný v tomto článku. Prijem širokopásmových signálov nie je triviálnou záležitosťou. Prijímač UWB radaru je založený na princípe vzorkovania signálu v ekvivalentnom čase. Taktiež sú merané a vyhodnotené ďalšie merania zamerané na kvalitatívne vlastnosti daného UWB radaru, konkrétne zamerané na inovatívny integrovaný front-end. Medzi hlavné testované parametre môžeme zaradiť spoľahlivosť v celom frekvenčnom rozsahu, dynamický rozsah, šumové vlastnosti a taktiež presluchy hlavne čo sa jedná navrhovanej štruktúry.

Kľúčové slová — UWB Radar, ASIC obvody, meranie.

Abstract—This paper deals with the realization, measurements and testing of an integrated UWB radar head operating in the continuously transmitted stimulation signal mode. The term UWB is derived from the exploited system bandwidth. Practically, the frequency bands nearly from DC to 14 GHz or those specified by the Electronic Communication Committee (ECC) or the Federal Communications Commission (FCC) regulations are used. The stimulation signal is generated by modulation of the carrier by a binary sequence which spreads the frequency spectrum of the signal. Thanks to the parameters of the resulting signal, it is not the source of interference for other radio services, but it can be observed only as an increase in noise. In the context of the UWB radars emitting the spread-spectrum signal, the term noise radar is often used, where the generated spreading signal is the result of generation of a pseudorandom noise modulation signal. The principle of generation of such a signal as well as the description of the transmitter is described in this article in more details. The reception of the UWB signals is not a trivial task. Hence in this paper, we deal with the topic of the UWB radar transceiver, relying on the equivalent time sampling approach, with attention to the receiver section. The measurements focused on qualitative parameters of the given UWB radar are evaluated as well,

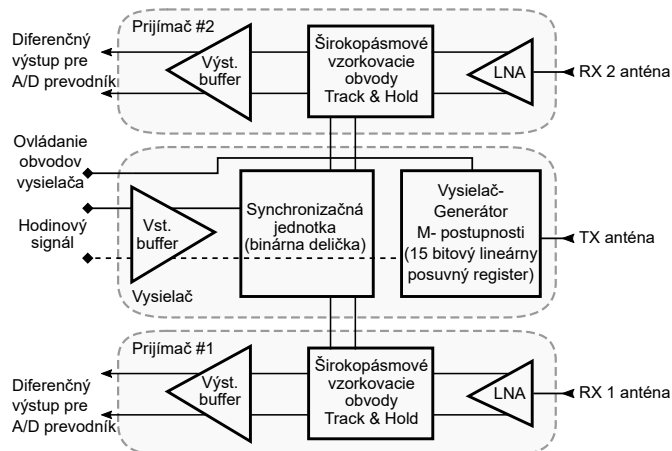
concentrating on the innovative integrated front-end. The main tested parameters include reliability across the whole frequency range, dynamic range, as well as crosstalk in the proposed structure.

Keywords — UWB Radar, ASIC, Measurement.

I. ÚVOD

Pod pojmom UWB radar si môžeme predstaviť moderné, sofistikované a svojim spôsobom výkonné zariadenie určené na nedeštruktívne metódy merania prostredníctvom elektromagnetických vln. Zariadenia tohto typu sú predovšetkým využívané pre krátkodobé tak aj dohľadové dlhodobé merania s využitím metód vzdialeného snímania (remote sensing). UWB radar je možné využiť ako jedno samostatné zariadenie alebo je možné realizovať tzv. UWB senzorové siete. Pred samotným meraním pomocou UWB radaru je potrebné nastavenie určitých parametrov, ktoré významne ovplyvňujú konečný výsledok merania. Je potrebné vedieť minimálne rozmery meraného priestoru, vzdialenosť medzi anténami a tiež parametre samotného UWB radaru [1]. Jednotlivé merania je možné prevádzať ako v interiéri tak aj v externých podmienkach. Pred samotným meraním zostavenie, kalibrácia a následné testovanie či daný setup dáva správne výsledky si občas vyžaduje nemalé úsilie a čas. V tomto článku prezentované riešenie predpokladá využitie integrovaného, hand-held progresívneho riešenia UWB radaru (zariadenia), pomocou ktorého bude merania možné realizovať takmer okamžite a to nielen ako stacionárne, ale aj ako dynamické napr. prostredníctvom dronov, alebo rôznych pohybujúcich sa zariadení. Ako praktický príklad je možné uviesť hľadanie ľudí zasypaných pod lavínou alebo pri rôznych situáciách, kde by iný pohľad na danú situáciu omnoho uľahčilo realizovať dané opatrenia.

Pokiaľ sa jedná o mobilné zariadenie, je potrebné brať v úvahu spotrebu. Koncept integrovaného UWB radaru počíta s napájaním z batérií alebo solárnych článkov. Bližšie je tomuto venovaná kapitola V. Pre tento účel bol realizovaný nový typ vysieláča, ktorý má vyššie rozlíšenie a lepšie dokáže využiť dané frekvenčné spektrum. Toto je však na úkor dosahu daného UWB radaru. Avšak pri porovnaní so staršou verziou je dosah rovnaký. Je to kompenzované práve vyšším rozlíšením, ale nižším vyžiarovým výkonom.



Obr. 1. Bloková schéma konvenčného UWB radru s dvoma prijímačmi

Na obr. 1 je znázornená všeobecná bloková schéma UWB radaru. Štandardne pozostáva z jedného vysielača stimulačného signálu a odpovedajúcich prijímacích obvodov. V závislosti od koncovej aplikácie môžu byť UWB radary vybavené jedným (1Tx 1Rx) – aplikácie s dorazom na spotrebu a cenu, dvoma (1Tx 2Rx) – ťažisko použitia v 2D lokalizácii prípadne „ranging“ (neviem teraz slovensky pojem), alebo v špeciálnych prípadoch aj viacerými prijímacími kanálmi (pseudo MiMo). Dvojkanálová konfigurácia na prijímačej strane je často vhodným kompromisom aj v prípade aplikácii impedančnej spektroskopie kde je jeden kanál spojený s aplikátorom (sondou) ktorá je v kontakte so skúmaným médiom a druhý slúži na zisťovanie potrebných referenčných hodnôt na úpravu kalibračných koeficientov v reálnom čase. Špeciálnu skupinu UWB radarov tvoria aplikácie vyžadujúce niekoľko vysielačov a prijímačov. Napr. 3D lokalizácia a ranging. S pohľadu energetickej efektivity a úspory aktívnej IC plochy sa ukazuje konfigurácia UWB uzla s jedným vysielačom a jedným prijímačom ako zaujímavá alternatíva k systémom s 1Tx2Rx uzlami. Podmienkou použitia UWB uzlov v MIMO konfigurácii je synchronne riadenie nie je len prijímacích ale aj vysielačích obvodov, čo je výzvou z pohľadu návrhu a realizácie obvodov presného časovania, napr. spúšťania merania. Obsah tohto článku je venovaný integrácii HF elektroniky UWB radaru do jednej monolitickéj štruktúry, vychádzajúc z predošlých verzií UWB radarov. Cieľom je rozšíriť existujúcu čipovú sadu a umožniť lepšiu adaptabilitu v praxi. V kapitole 3 je opísaný koncept monolitickéj štruktúry ako aj celkový dizajn a možnosti použitej technológie. Kapitola 4 pojednáva o charakterizácii vyrobených obvodov. V závere sú zhrnuté klady a zápory našich experimentálnych výsledkov.

II. TEORETICKÉ POZNATKY

V nedávnej minulosti sme boli zameraní na problém integrácie jednotlivých blokov analógovej hlavice UWB radaru do jednej integrovanej štruktúry. Takýto proces predstavuje jednu z najnáročnejších hardvérových implementácií vôbec. Bolo tu potrebné riešiť problém integrovania celého

systému (prijímač, vysielač, synchronizačné obvody), impedančné prispôsobenie jednotlivých vstupno-výstupných portov, celkovej spotreby systému, efektívneho rozloženia jednotlivých súčastí na čipe a mnoho ďalších dielčích úloh až po dosiahnutie požadovaných výsledkov.

Integrované, alebo monolitické systémy na jednom čipe (SoC) sú stále často rozoberanou problematikou v mnohých vedeckých príspevkoch. V prípade vývoja hardvéru je to jeden z najnáročnejších procesov. Moderné progresívne nástroje a metódy pre integráciu systémov, alebo realizáciu integrovaných štruktúr- zväčša čo sa týka oblasti zmiešaných analógovo-číslícových obvodov sú stále vylepšované. Jednou z takýchto úloh je aj návrh integrovaného UWB radaru, ktorý tiež predstavuje zmiešanú štruktúru tvoriacu tzv. Application Specific Integrated Circuit- ASIC.

Z vyššie uvedených parametrov UWB radaru je najpoprednejšia jeho pracovná šírka frekvenčného pásma, ktorá je v porovnaní so zariadeniami kontinuálne emitujúcimi el-mag vlnenie veľmi široká. Spravidla sa využíva polovica frekvenčného pásma B, ktoré je dané nosnou frekvenciou f_C :

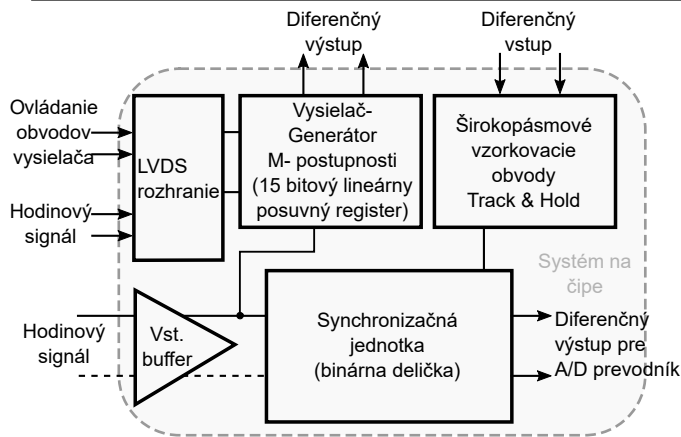
$$B = f_C/2 \quad (1)$$

So zvyšovaním frekvencie môže dojsť k neočakávaným súvislostiam zvlášť u širokopásmových vysokofrekvenčných štruktúr. V oblasti analógových ako aj zmiešaných ASIC obvodov [2], sú tieto často ovplyvňované efektami ako šum, presluchy alebo oneskorenia [3], [4].

Signál, ktorý je modulovaný pseudonáhodnou postupnosťou bitov, aká sa používa práve v tomto type UWB radarov, má významný rozkmit. V procese generovania tohto stimulačného signálu sa často prejavuje tzv. switching noise. Pri návrhu je preto potrebné brať do úvahy metódy redukcie šumu. Techniky pre redukciu šumu môžu byť napr. použitie tzv. balanced current steering topology [5]. Táto metóda je založená na predpoklade použitia diferenčných štruktúr všade kde je to možné. Prezentovaná monolitická štruktúra je plne diferenčná. Vysielač rovnako ako prijímač majú plne diferenčné všetky vstupné a výstupné porty. Či už sa jedná o hodinové, riadiace alebo vysokofrekvenčné signálové porty. V prípade vstupu pre hodinový signál je za vstupným portom pripojený BalUn a ďalej je signál vedený diferenčne. Využívanie diferenčných štruktúr zabezpečuje stabilitu a nižšiu náchylnosť na rušenia všetkých interných blokov vysielača a prijímača. Týmito metódami je taktiež veľmi dobre možné eliminovať intermodulačné skreslenie.

III. ŠTRUKTÚRA INTEGROVANÉHO UWB RADARU

Celková štruktúra integrovanej analógovej hlavice UWB radaru je znázornená prostredníctvom blokovej schémy na obr. 2. Tento navrhnutý a realizovaný koncept predstavuje upravenú zjednodušenú štruktúru konvenčnej verzie UWB radaru vychádzajúc z blokovej schémy na obr. 1. Pri procese integrácie boli inovované obvody vysielača, ktoré boli nahradené najnovšou rodinou 15-bitového generátora M-postupnosti. Blok vysielača bol taktiež doplnený o riadenie hodinového

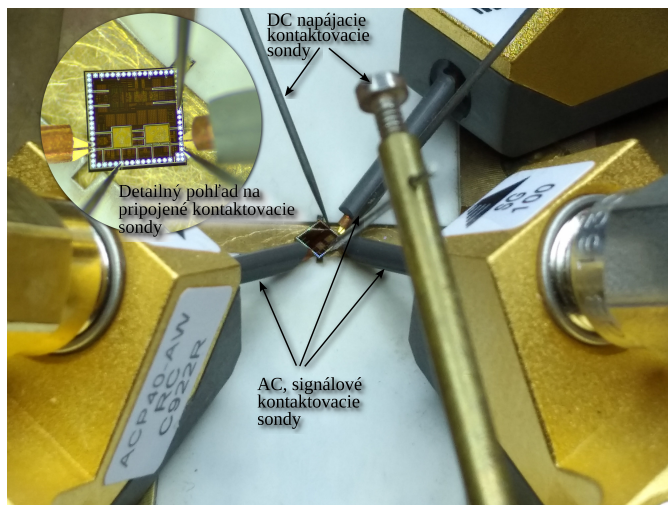


Obr. 2. Bloková schéma integrovanej štruktúry UWB radaru

signálu. Je to hlavne z dôvodu realizácie viacnávových zariadení, alebo prepájania jednotlivých UWB radarov do multi-senzorových sietí v kombinácii s inými senzormi. Príkladom môžu byť aplikácie vyžadujúce funkčne-bezpečné neoptické 3D-snímanie okolia s vysokým rozlíšením pre autonómne mobilné roboty, určené najmä na prevádzku v neznámych prostrediach. Vytvorenie potrebnej hardvérovej bázy prispeje k penetrácii robotiky do nových plne automatizovaných činností a služieb s dôrazom na bezpečnosť okolia. Jadrom myšlienky je fúzia čiastkovo redundantných informácií z rôznych druhov senzorov (ultrazvukové, stereoptické, vysokofrekvenčné, mechanické-dotykové a pod.), s cieľom zabezpečiť najvyššiu možnú bezpečnosť človeka, aj v prípade výpadku informácie od jedného alebo viacerých senzorov iného alebo vlastného druhu v sieti.

Z pohľadu UWB lokalizácie a imagingu je jedným z riešení umiestnenie niekoľkých 1Tx1Rx UWB uzlov na pohybujúcu sa platformu. Tu je z finančného hľadiska nutné obmedziť potrebu inštalácie vysokofrekvenčnej kabeláže na minimum. Z toho vyplýva autonómne napájanie každého uzla vstupnými hodinami a synchronne riadenie generovania stimulačného signálu. Celý proces prebieha pomocou LVDS riadiacich signálov. Toto riešenie bolo zvolené z dôvodu kompatibility s dostupnými riešeniami, napr. pre potreby pripojenia komunikačnej jednotky s v tomto článku predstavovaným integrovaným UWB radarom, ktorý disponuje LVDS rozhraním. Komunikačná jednotka v sebe zahŕňa FPGA modul, ktorý slúži ako komunikačné rozhranie a tiež ako výpočtová jednotka pre rýchle výpočty pre potreby predspracovania primárnych radarových dát.

Monolitická štruktúra ďalej zahŕňa obvody širokopásmového prijímača. Vzhľadom k tomu, že vysielaný signál je špecifického charakteru, digitalizácii predchádza prvotné predspracovanie. V tomto prípade sa využíva vzorkovanie v ekvivalentnom čase. Vzorkovanie realizuje širokopásmový vzorkovací obvod zložený z prijímacích obvodov (LNA cherry hooper zosilňovač), samotného sampling core vstupných a výstupných buffrov pre riadenie



Obr. 3. Detail na mikro testovacie sondy pripojené na kremíkový substrát

a prenos dát medzi prijímačom a digitálnou časťou. Bližší pohľad na princíp vzorkovania je opísaný v kapitole 5.

Prijímač a vysieláč sú medzi sebou prepojené prostredníctvom synchronizačnej jednotky. Jedná sa o veľmi podstatný stavebný prvok, keďže absolútne presná synchronizácia medzi vysielateľom a prijímačom je kľúčový parameter, ktorý zabezpečuje správne spracovanie signálov. Synchronizačná jednotka pozostáva z ultra rýchlej binárnej deličky, ktorej jadrom je posuvný register.

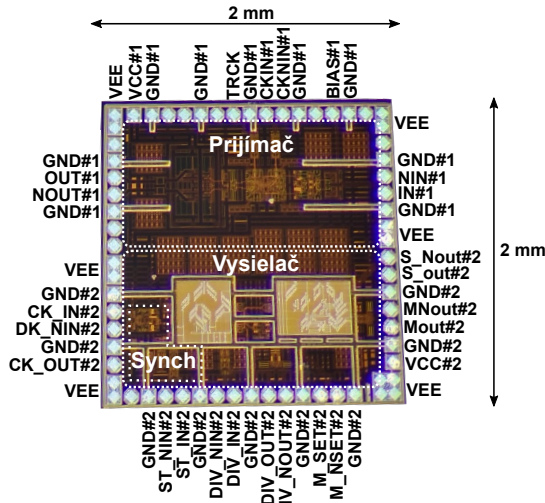
IV. S35D4 VÝROBNÝ PROCES NA PROTOTYPOVANIE ASIC OBVODOV

Všetky obvody používané v rámci analógovej časti UWB radarov, rovnako aj tento koncept sú postavené na ASIC platforme. ASIC služba je poskytovaná daným výrobcom za účelom realizácie podpory pre školy a výskumné inštitúcie. Tento návrh bol realizovaný v technológii 0,35 um SiGe BiCMOS (S35D4) od spoločnosti Austria Micro Systems (AMS). Tento proces umožňuje realizovať zmiešané analógovo-digitálne štruktúry na jednom čipe. Medzi ďalšie popredné parametre patrí tranzitná frekvencia $F_t = 70$ GHz, možnosť využitia až štyroch metalických vrstiev, podpora 3,3 V napájania pre CMOS a HBT bipolárne tranzistory a taktiež možnosť použitia HV 5 V HBT bipolárnych tranzistorov. Šumové vlastnosti sú pre potreby návrhu širokopásmových aplikácií postačujúce.

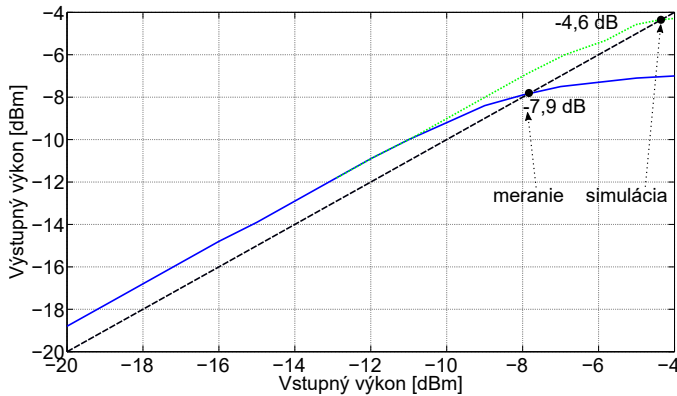
V. PRÍSTUP MERANIA

V tomto prípade, keďže sa jedná o kremíkový substrát v svojej obnaženej forme, pre prvotné merania bol zvolený prístup pomocou Micro Probe Testing Station. Týmto prvotným prístupom je možné overenie základnej funkčnosti a možnosť oživenia jednotlivých súčastí vysielateľa a prijímača. Detailný pohľad na priebeh tohto typu testovania je znázornený na obr. 3.

Samotné meranie je rozdelené do dvoch častí. V prvej časti boli prvotné merania a oživenie samotného čipu realizované



Obr. 4. Obnažený čip integrovanej štruktúry UWB radaru



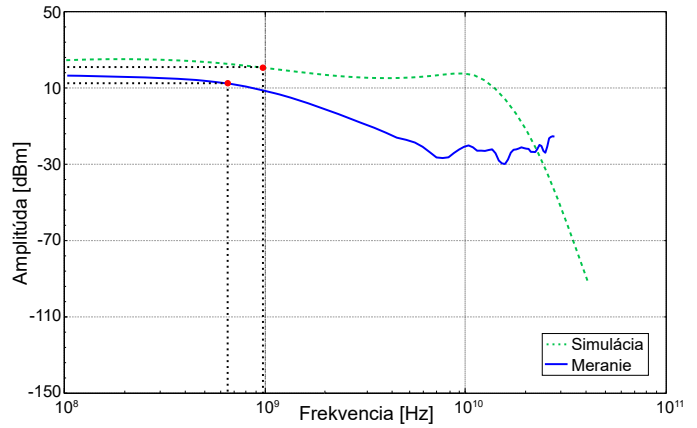
Obr. 5. Porovnanie nameraných a simulovaných hodnôt 1 dB kompresného bodu vzorkovacích obvodov vo vzorkovacom režime

pomocou mikro testovacej stanice. Na obr. 3 je znázornený detail pripojenia mikro testovacích sond k substrátu. Samotný substrát je zobrazený na obr. 4. Pre ďalšie potreby meraní bol navrhnutý a zrealizovaný vývojový kit (obr. 12), ktorý obsahuje daný integrovaný radar rozdelený do dvoch puzdier kde je samostatne osadený vysielač a prijímač.

A. Meranie základných parametrov priamo na monolitickom substráte

Kaskádne zapojené jednotlivé prvky prijímača tvoria v konečnom dôsledku dvojbran s určitými parametrami. Medzi dôležité parametre z pohľadu nelinearity tu môžeme zaradiť kompresiu zisku a intermodulačné skreslenie. Kompresia zisku je daná na základe určenia tzv. 1 dB kompresného bodu.

Na obr. 5 je znázornený výsledok z merania v porovnaní s výsledkom simulácie. Vo výsledku merania je badateľný rozdiel medzi simuláciou a meraním. K zvýšeniu kompresie signálu mohlo dôjsť hneď z niekoľkých dôvodov, počnúc simuláciami a použitými modelmi súčiastok až po samotné vyhotovenie a osadenie obvodu do puzdra a na nosič (PCB).



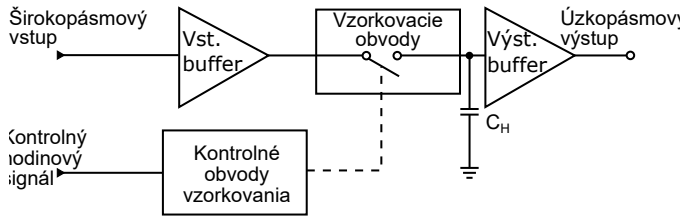
Obr. 6. AC analýza širokopásmových vzorkovacích obvodov prijímača

Tento výsledok je však plne postačujúci pre potreby spracovania prijímaných signálov generovaných UWB radarom, keďže výkonová hustota jednotlivých spektrálnych zložiek ako aj samotného generovaného signálu je na veľmi nízkej úrovni. Energia signálu, ktorý sa odrazí do prijímača sa pohybuje rádovo v $0,35 \mu\text{W}$. Citlivosť prijímača je pre tieto účely postačujúca.

Podstatným parametrom pri zosilňovačoch je ich šírka pásma. V tomto prípade bola simulovaná a meraná šírka pásma prijímača ako celku. Na obr. 6 je znázornený výsledok merania. Tento proces bolo opäť možné realizovať priamo na monolitickej štruktúre, kde odpadá vplyv indukčnosti bondovacích vodičov, ktoré prepájajú samotný čip s puzdrom. Výsledné krivky, ktoré sú zobrazené na obr. 6 predstavujú výsledok AC analýzy. Simulačné dáta naznačujú, že reálna šírka pásma prijímača na jeho výstupe je okolo 1 GHz. Meraním bolo zistené, že pokles signálu o 3 dB nastane medzi $650 \div 700 \text{ MHz}$. Táto hodnota je pre spracovanie radarových signálov postačujúca, keďže podvzorkovaný signál má frekvenciu maximálne 25 MHz, pri doteraz používanej frekvencii stimulačného signálu generovaného vysielačom, čo predstavuje 13,82 GHz. Frekvencia podvzorkovaného signálu je daná deliacim pomerom binárnej deličky, ktorá je obsiahnutá v bloku synchronizačnej jednotky (obr. 2).

Obvody prijímača patria do skupiny obvodov, ktoré transformujú šírku pásma v porovnaní vstupu s výstupom. Vstupný signál s ultra širokým spektrom (rádovo jednotky až desiatky GHz) je transformovaný na signál so šírkou pásma max. od hodnoty niekoľkých desiatok MHz.

Frekvencia signálu na výstupe prijímača závisí od použitej frekvencie (hodinových) kontrolných signálov, na základe ktorých pracujú obvody vzorkovania. Obvod vzorkovania je zosilňovač s vysokým prúdovým ziskom a vysokou vstupnou impedanciou. Je to dôležité hlavne pri procese vzorkovania, kde je nabíjaný hold capacitor, ktorý je potom zdrojom signálu v tzv. hold móde. Princiálna bloková schéma obvodov prijímača je zobrazená na obr. 7. Z princípu činnosti vzorkovacích obvodov prijímača, je jasné že je tu využívaná metóda stroboskopického vzorkovania, alebo vzorkovania v



Obr. 7. Zjednodušená bloková schéma použitej topológie prijímača

ekvivalentnom čase. Priebeh signálu po procese vzorkovania v ekvivalentnom čase, je znázornený na obr. 10. Tento princíp sa aplikuje na signály, ktoré sú periodické. Generovaný stimulačný signál je pseudo náhodne generovaná M-postupnosť. Pri prvom pohľade sa generovaná postupnosť javí ako úplne náhodný signál, no pri komplexnejšej analýze je možné dospieť k výsledku, že má istú periódu, ktorá je daná parametrami vysielča.

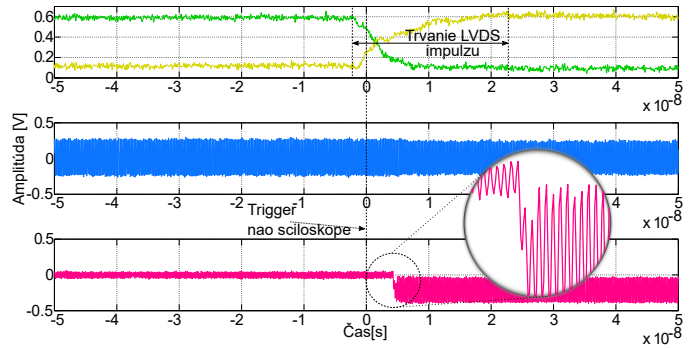
B. Meranie časových priebehov na realizovanom vývojovom module

V nasledovnej kapitole je obsiahnutý opis dynamických parametrov obvodov prijímača a vysielča. V tejto časti boli merania realizované separátne ako na vysieláči tak ja na prijímači, i keď sa jedná o jednu monolitickú štruktúru. Spôsob akým je daná monolitická štruktúra realizovaná nám dovoľuje zvlášť napájať vysieláč a zvlášť prijímač. Je to aj nevyhnutné z dôvodu rozdielnych napájacích napätí. Pre účely testovania bol navrhnutý a osadený modul, na ktorom sú osobitne osadené dva zapuzdrené integrované radary v puzdre QFN32. Vďaka externým vývodom vysielča, prijímača a ich jednotlivých blokov je možné interpretovať správanie sa interných signálov a tak determinovať dynamické správanie sa jednotlivých prvkov.

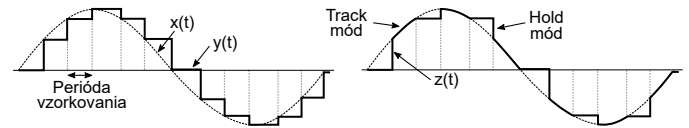
C. Dynamické vlastnosti obvodov vysielča

Okrem toho, že bol do jednej monolitickej štruktúry implementovaný vysieláč UWB radaru, sú v ňom obsiahnuté aj isté inovačné prvky. Môžeme tu zaradiť podporu realizácie senzorových sietí s viacerými UWB radarmi, alebo realizovanie UWB multikanálového senzorového systému, ktorý realizuje generovanie stimulačného signálu (tzv. pseudo MIMO systems) viacerými vysieláčmi v rovnakom čase.

Pre správnu funkčnosť multikanálových systémov je podstatné dodržanie striktnej synchronizácie. Vo všeobecnosti synchronný chod je dosiahnutý presným riadením, avšak samotný HW taktiež môže ovplyvniť spracovanie riadiacich signálov. Pre obmedzenie čo najmenších vplyvov HW na samotné riadenie, bola navrhnutá štruktúra vstupných diferenčných obvodov, ktoré spracovávajú nízkonapäťové diferenčné riadiace signály (LVDS- Low Voltage Differential Signals). Výsledkom tohto snaženia je čo najväčšie obmedzenie zámkitov spôsobených prechodovými dejmi pri preklápaní log. stavov obvodov. Na obr. 8 je znázornený priebeh hodinového signálu na vstupe a výstupe obvodov riadenia. Hodinový signál je privedený na výstup na základe riadiaceho LVDS signálu.



Obr. 8. Časový priebeh reakcie obvodov riadenia spínania hodinového signálu na LVDS riadiaci impulz



Obr. 9. Porovnanie vzorkovacích metód S&H vs. T&H

V detailnom zobrazení je viditeľné zopnutie výstupu obvodov hodinového signálu, kde sú prechodové javy takmer úplne eliminované. Tento fakt podstatne prispieva k zlepšeniu konzistentnosti merania z pohľadu presného spustenia generovania stimulačného signálu jednotlivými UWB radarmi v senzorovej sieti alebo v multikanálovej sústave.

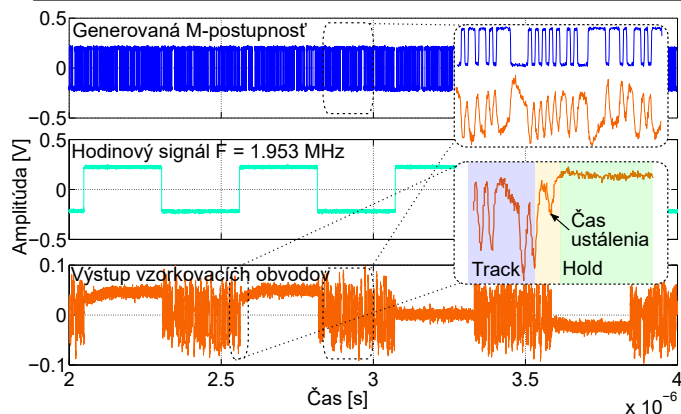
D. Dynamické vlastnosti obvodov prijímača

Pri prijímači boli dynamické vlastnosti merané hlavne v ohľade na funkcionálnu vzorkovacích obvodov. Dôležité sú časové okamihy kedy vznikajú prechodové javy medzi jednotlivými stavmi vzorkovacích T&H (Track and Hold) obvodov.

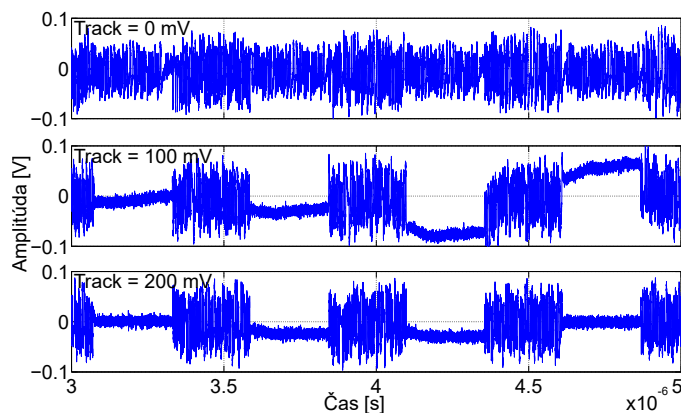
Vo všeobecnosti existujú dva typy vzorkovacích obvodov, T&H obvody a S&H (Sample and Hold) obvody. Rozdiel medzi nimi spočíva v princípe akým sú zo spracovávaného signálu odoberané vzorky, resp. priebeh signálu na výstupe.

Vzorkovacie obvody vzorkujú analógový signál $x(t)$ v ekvivalentnom čase. Pri procese odobratia vzorky sa výsledok uloží do pamäťového modulu (Hold kondenzátora, viď. obr. 7), ktorý je na krátky okamih zdrojom tejto informácie, ktorá je v kontexte UWB radarov ďalej preposielaná na analógovo digitálnu konverziu. V ďalšom procese vzorkovania je capacitor opätovne nabíjaný a následne je opäť zdrojom okamžitej úrovne vzorkovaného signálu. Pri procese vzorkovania s využitím T&H vzorkovacích obvodov je medzi jednotlivými HOLD eventmi výstup pripojený priamo na vstup. Obvody vzorkovania tak iba kopírujú vstupný signál $x(t)$ na výstup $z(t)$. Je to výhodnejšie aj z toho pohľadu, že hold capacitor je zdrojom signálu na kratší čas, ako je to v prípade S&H obvodov, kde na výstupe sú len jednotlivé hodnoty po kvantovaní výstupný signál $y(t)$.

V prijímači integrovaného UWB radaru sa využíva princíp vzorkovania v ekvivalentnom čase s využitím T&H vzorkovacích obvodov. Výsledný priebeh signálu na výstupe



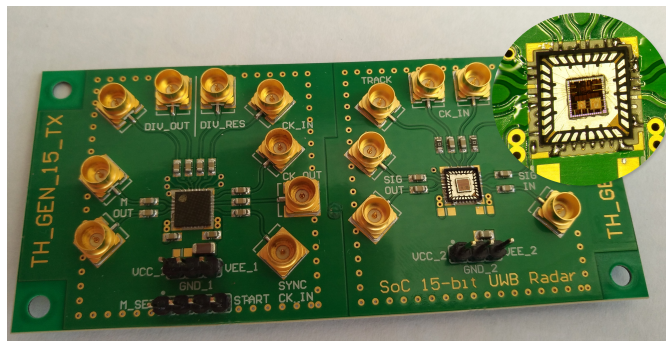
Obr. 10. Priebehy signálov pri procese vzorkovania generovanej M-postupnosti



Obr. 11. Porovnanie kvality vzorkovania pri zmene ofsetového napätia ho dinového synchronizačného signálu

je znázornený na obr. 10. Proces vzorkovania je striktné synchronný na základe hodinových riadiacich impulzov. Na obr. 10 je znázornený priebeh samotného vzorkovania na základe hodinového synchronizačného signálu s frekvenciou 1.953 MHz. Táto hodnota je výsledkom podielu frekvencie hlavného hodinového signálu $F_t = 1$ GHz, ktorý sa realizuje binárnou deličkou v bloku synchronizácie (obr. 7). Vzorkovacie obvody reagujú na riadiaci impulz zmenou svojho režimu z TRACK módu do HOLD módu, alebo opačne. Pri tomto procese nastávajú prechodové deje, ktoré predstavujú jeden zo základných parametrov T&H obvodov, nazývaný tiež ADC delay. Detail takéhoto prechodu z jedného stavu do druhého je znázornený na obr. 10. V koncepte monolitickej štruktúry UWB radaru je taktiež braný dôraz na čo najlepšie potlačenie prechodových dejov, ktoré sa tu prejavujú omnoho menej. Vzorkovacie obvody tak potrebujú kratší časový okamih na regeneráciu oproti predošlým verziám. Tento parameter je podstatný hlavne pre eliminovanie chybovosti pri A/D konverzii signálu.

Ďalším parametrom T&H obvodov je pokles, alebo kolísanie hodnoty napätia signálu pri HOLD móde. Táto vlastnosť je známa pod pojmom pedestal error. Túto



Obr. 12. Zostavený modul s integrovaným UWB radarom- vysielač a prijímač

vlastnosť je možné do istej miery korigovať zvýšením bias-u hodinových riadiacich signálov. Porovnanie vplyvu jednosmernej úrovne hodinových signálov je znázornené na obr. 11. Tiež je možné týmto spôsobom potlačiť presluchy, ktoré vznikajú pri procese vzorkovania. Týmto parametrom je možné prispôsobiť daný prijímač na čo najlepšie vlastnosti.

Tiež je viditeľné, že v HOLD móde je hodnota napätia vzorkovaného signálu ustálená pri dostatočnom ofsetovom napätí. Tento parameter je možné nastaviť presne podľa požiadaviek. Priebeh výstupného signálu, ktorý je znázornený na obr. 11 pri napätí $U_{Track} = 200$ mV predstavuje výstupný formát predvzorkovaný pre A/D prevodník. A/D prevodník je napájaný rovnakým riadiacim signálom ako vzorkovacie obvody a odoberá vždy iba jednu vzorku počas trvania HOLD eventu. Následne na výstupe A/D prevodníka sú raw radar data pred prvotným procesom digitálneho predspracovania. Príklad predspracovania a analýzy raw radar data je opísaný v [1] a [6].

Testovacia doska bola navrhnutá čisto pre účely testovania predkladaného konceptu integrovaného UWB radaru. Pri návrhu bolo potrebné brať v úvahu čo najlepšie prispôbenie vysokofrekvenčných vedení od konektorov k QFN púzdru. Kvôli minimalizovaniu strát bolo pre testovanie zvolené keramické QFN24 puzdro, osadené na sklo keramickom nosiči Rogers RO3210. Vysokofrekvenčný materiál bol hrúbky 1,27 mm s dielektrickou konštantou $\epsilon_r = 10,2$, čo umožňuje realizáciu úzkych vlnododov, ktoré je možné priamo pripojiť k QFN puzdru. Pre potreby implementácie je možné integrovaný UWB radar osadiť obdobným spôsobom, alebo je tu možnosť využitia moderných progresívnych keramických materiálov, napr. LTCC štruktúry, kde je možné priamo implementovať aj vstupné a výstupné filtre, kvôli dodržaniu ECC a FCC štandardov [7], [8].

VI. ZÁVER

Koncepcia realizovanej monolitickej štruktúry prezentovanej v tomto článku predstavuje prvý krok v procese integrácie širokopásmových obvodov pre technológiu UWB. Bola to dlhá cesta od myšlienky k tomuto fungujúcemu zariadeniu realizovanému v procese technológie SiGe BiCMOS 0,35 μm s použitím najnovšej verzie knižníc zo softvéru AMS a Cadence Virtuoso pre ASIC dizajn. Hlavnou myšlienkou tejto

práce bolo vytvoriť testovaciu štruktúru na zber nových informácií o tomto druhu integrovaného radaru UWB. Ako bolo uvedené vyššie, táto štruktúra integruje jeden vysielateľ, generátor M-sekvencie a jeden širokopásmový prijímač na jednom čipe. Topológia subobvodov je prakticky overeným riešením, avšak doteraz nebola nikdy implementovaná do jediného kremíkového substrátu. Okrem toho, vysielateľ, ako aj obvody prijímačov boli inovované implementáciou 15-bitového generátora M-postupnosti a proces vzorkovania sa zlepšil v prijímači. Uvedená technológia pracuje pre záporné napájacie napätie, preto bolo potrebné riešiť problémy integrity signálov medzi analógovými a riadiacimi časťami zariadenia. Na tento účel bolo pridané rozhranie s podporou komunikácie LVDS. Pokiaľ ide o testovanie, boli merané všetky základné parametre (AC, DC, nelineárne a dynamické). Ako ďalšia úloha bude navrhovaná konštrukcia testovaná ako celá 15-bitová UWB radarová jednotka a testy budú zamerané na dlhodobú spoľahlivosť.

LITERATÚRA

- [1] D. NOVÁK, J. SCHNEIDER, and D. KOCUR, "Static person detection and localization based on their respiratory motion using various antenna types," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 16, no. 3, pp. 54–59, 2016.
- [2] A. B. Mehta, "Analog/mixed signal (ams) verification," in *ASIC/SoC Functional Design Verification*. Springer, 2018, pp. 255–271.
- [3] S. Gong, H. Hentzell, S.-T. Persson, H. Hesselbom, B. Lofstedt, and M. Hansen, "Techniques for reducing switching noise in high speed digital systems," in *ASIC Conference and Exhibit, 1995., Proceedings of the Eighth Annual IEEE International*. IEEE, 1995, pp. 21–24.
- [4] G. Fattah and N. Masoumi, "Comprehensive evaluation of crosstalk and delay profiles in vlsi interconnect structures with partially coupled lines," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 14, no. 4, pp. 41–54, 2018.
- [5] M. Kmec, M. Helbig, R. Herrmann, P. Rauschenbach, J. Sachs, and K. Schilling, "M-sequence-based single-chip uwb-radar sensor," in *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 10*. Springer, 2014, pp. 453–461.
- [6] D. Kocur, J. Rovňáková, and M. Švecová, "Through wall tracking of moving targets by m-sequence uwb radar," in *Towards Intelligent Engineering and Information Technology*. Springer, 2009, pp. 349–364.
- [7] A. Pietrikova, K. Ruman, T. Rovensky, and I. Vehec, "Impact analysis of ltcc materials on microstrip filters' behaviour up to 13 ghz," *Microelectronics International*, vol. 32, no. 3, pp. 122–125, 2015.
- [8] S. Slosarčík, I. Vehec, A. Gmitterko, P. Cabúk, and M. Jurčíšin, "Technology and application of 3d shaped ltcc modules for pressure sensors and microsystems," *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, vol. 6, no. 3, pp. 158–163, 2009.

Vývoj pohonu so spínaným reluktančným motorom

Luboš Suchý

Katedra elektrotechniky a mechatniky
Technická univerzita v Košiciach
lubos.suchy@tuke.sk

Želmíra Ferková

Katedra elektrotechniky a mechatniky
Technická univerzita v Košiciach
zelmira.ferkova@tuke.sk

Abstrakt—Príspevok sa zaoberá problematikou pohonu so spínaným reluktančným motorom. Jedná sa o špecifický druh elektrického motora, ktorý vyniká svojou jednoduchosťou, avšak niektoré nežiadúce vlastnosti bránia jeho aplikácii. Hlavným cieľom je priniesť prehľad o doteraz publikovaných riešeniach, vysvetliť základné princípy činnosti, ale tiež popísať možnosti zníženia zvlnenia momentu spínaného reluktančného motora. V článku sú zahrnuté poznatky z vývoja meniča a tiež simulačné a experimentálne výsledky.

I. ÚVOD

Princíp spínaného reluktančného motora (SRM) je známy približne od roku 1838, čo ho historicky radí ešte pred vznik asynchrónneho motora. Keďže však SRM nebolo možné napájať z elektrickej siete či už jednosmernej alebo neskôr striedavej bez použitia meniča, jeho hlavný vývoj začína o viac než storočie neskôr. Dnes sa jedná o pomerne dobre zmapovanú oblasť elektrických strojov a súčasný stav problematiky SRM je možné deliť na niekoľko menších úsekov.

Práca [1] poskytuje všeobecný prehľad, ktorý zahŕňa základne pojmy z konštrukcie, matematického modelu a úvodu do riadenia SRM. Táto literatúra sa zaoberá najmä problematikou konštrukcie a modelovania SRM. Spomínaná problematika návrhu je tiež zahrnutá v [7], [8]. SRM je zaradený medzi elektronicky komutované motory, kde je potrebné riadiť spínanie jednotlivých fáz v statore v závislosti od polohy rotora. Z toho dôvodu je často riešenou problematikou riadenie SRM. Komplexné informácie o riadení je možné nájsť v [5], [9], [10], vrátane pokročilých metód riadenia pre zníženie zvlnenia momentu spôsobeného sekvenčným spínaním fáz. Elektronická komutácia SRM, rovnako ako pri jednosmerných bezkefových motoroch, je závislá od polohy rotora. Informácia o polohe rotora SRM sa získava najčastejšie zo snímača polohy hriadeľa, v súčasnosti sú však vyvinuté metódy bezsnímačového (sensorless) riadenia. Vlastnosti bezsnímačového riadenia sú popísané v [12]. Ako bolo spomenuté, SRM nie je možné napájať priamo z elektrickej siete, ale vyžaduje sa použitie výkonového polovodičového meniča, pričom klesajúca cena polovodičových súčiastok pridáva na popularite SRM. Širokú oblasť polovodičových meničov pre napájanie SRM a rôzne topológie meničov boli publikované v [13], [14]. Problematiku výkonových meničov pre SRM, ale aj ďalšie súčasti pohonu s SRM

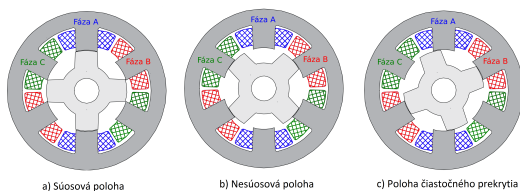
podrobne rozoberá [6]. Rovnako ako iné elektrické motory, aj SRM môže pracovať v generátorickom režime t.j. ako spínaný reluktančný generátor. Generátorickým režimom SRM sa podrobnejšie zaoberá práca [15]. Publikovaných bolo aj niekoľko riešení SR generátora vo veternej elektrárni.[16], [18] V súčasnosti existuje niekoľko štúdií [20], [21], ktoré skúmajú použitie SRM ako pohon pre elektromobil. To potvrdzuje všestranné použitie spínaného reluktančného motora. V roku 2013 na auto-salóne v Ženeve Land Rover predstavil 7 prototypov elektromobilov, ktorých pohonnú jednotku realizoval práve so SRM.[19]

II. KONŠTRUKCIA A PRINCÍP ČINNOSTI

Jednou z hlavných výhod použitia spínaného reluktančného motora je jeho jednoduchá a robustná konštrukcia. SRM sa skladá zo statora a rotora, ktoré majú vyjadrené póly. Počet pólů statora $2p_1$ býva obvykle väčší ako počet pólů rotora $2p_2$, ale v súčasnosti je známych mnoho druhov konštrukcií, ktoré sa vymykajú tomuto pravidlu. Rotor neobsahuje žiadne permanentné magnety ani žiadne ďalšie vinutia, čo umožňuje motor použiť aj pre vyššie rýchlosti a vyššie prevádzkové teploty.

Vinutie statora nie je navinuté v drážkach, čo zjednodušuje jeho výrobu – každý statorový pól má vinutie navinuté priamo na ňom, protiľahlé póly sú spojené do série a dvojica pólů obvyčajne vytvára fáz. Počet fáz môže byť rôzny (2 až 4 príp. aj viac), v zásade platí fakt, že vyšší počet fáz kladne vplyva na zníženie zvlnenia výstupného momentu, avšak väčší počet fáz vyžaduje zložitejšiu elektroniku. Keďže SRM nemá budenie s permanentnými magnetmi, budenie motora je kladené len na statorové vinutia, čo zvyšuje straty v medi. Tento fakt sa prejaví hlavne u motorov malých výkonov. [1] Z názvu SRM vyplýva, že motor pracuje na princípe zmeny reluktancie, teda zmeny magnetického odporu v uzavretom magnetickom obvode. Pre vysvetlenie princípu činnosti je potrebné zaviesť pojmy ako súosová poloha rotora, nesúosová poloha a poloha čiastočného prekrytia. Tieto tri polohy sú zobrazené na Obr. 1. Tieto pojmy sa vzťahujú vždy k budenej fáze.

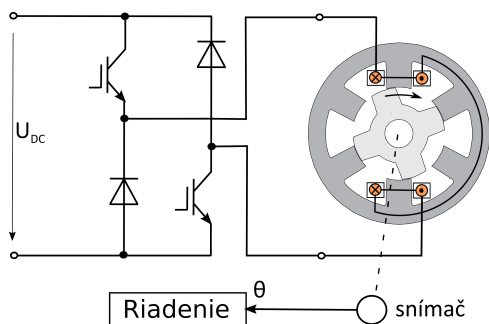
V každej fáze motora existuje poloha, počas ktorej motor nedokáže vytvárať moment. Vhodným usporiadaním statorových a rotorových pólů je možné zabrániť tomu, aby sa motor dostal do stavu, keď nedokáže vyvíjať žiadny moment. Otáčanie rotora sa



Obr. 1. Polohy rotora SRM

dosiahne spínaním jednotlivých fáz v polohe rotora, keď má indukčnosť narastajúci charakter, pričom nezávisí na polarite impulzov.[3]

SRM je typ motora, ktorý nie je možné pripájať priamo na elektrickú sieť, teda je ho možné prevádzkovať len s použitím výkonového meniča. 2-kvadrantovým meničom s reverzáciou napätia vieme dosiahnuť vytvorenie momentu oboch polarít a tým aj prevádzku v 4 kvadrantoch momentovej charakteristiky. Princiipálne zapojenie jednej fázy je znázornené na Obr.2.



Obr. 2. Princiipálne zapojenie jednej fázy SRM[10]

III. NÁHRADNÁ SCHÉMA A MOMENT SRM

Základná náhradná schéma (Obr.3) je odvodená so zanedbaním vzájomných indukčností medzi vinutiami. Napätie na jednej fáze je dané súčtom úbytku napätia na odpore vinutia, úbytkom napätia na indukčnosti a indukovaného napätia: [6]

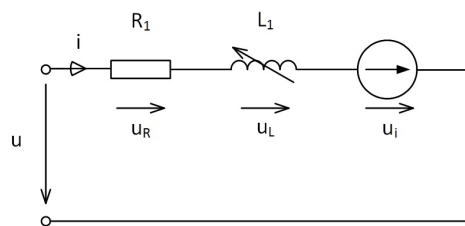
$$u = R \cdot i + \frac{\partial \Psi(L, \theta)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi(L, \theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

Kde R je odpor fázy, Ψ je spriahnutý magnetický tok, ktorý je možné napísať ako:

$$\Psi(i, \theta) = L(i, \theta)i \quad (2)$$

Moment spínaného reluktančného motora je súčtom príspevkov všetkých fáz, pričom moment vytváraný jednou fázou je daný vzťahom:

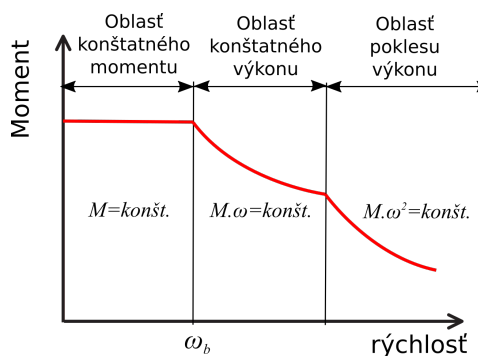
$$M(i, \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\int_0^i \Psi(L, \theta) di \right) \quad (3)$$



Obr. 3. Náhradná schéma jednej fázy SRM

A. Momentová charakteristika

Pri dimenzovaní pohonu je vhodné poznať momentovú charakteristiku stroja (Obr.4), čo je závislosť momentu motora od uhlovej rýchlosti resp. od otáčok. Na základe rôznych rýchlostných rozsahov je možné produkciu momentu rozdeliť na tri časti: oblasť konštantného momentu, oblasť konštantného výkonu a oblasť poklesu výkonu.



Obr. 4. Momentová charakteristika SRM

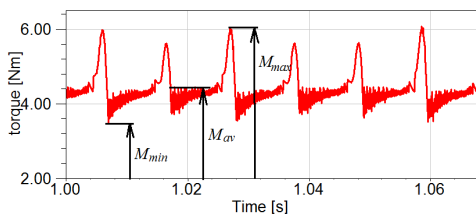
Hranicou oblasti konštantného momentu je rýchlosť ω_b , čo je maximálna rýchlosť, pri ktorej maximálny prúd môže vyvinúť nominálny moment pri pôsobení nominálneho napätia. Pri nižších rýchlostiach fázový prúd rastie takmer okamžite pri zopnutí danej fázy, pretože v tom čase je hodnota indukovaného napätia malá – špičky prúdu pri malej rýchlosti je ťažké obmedziť, preto je vhodné znížiť žiadanú hodnotu prúdu, čím sa zníži aj moment. Zmenou uhla zapnutia je možné meniť účinnosť a redukovat' hluk, či zvlnenie momentu.[5] So zvýšením rýchlosti narastá aj indukované napätie. Zopnutím fázy s tzv. uhlom predstihu je možné dosiahnuť požadovanú hodnotu prúdu ešte predtým, než sa statorové a rotorové póly začnú prekrývať, čím sa udrží moment a zachová sa charakter konštantného výkonu. Žiadaná hodnota prúdu je tiež závislá od úrovne zaťaženia motora. Motor sa dostáva do oblasti poklesu výkonu ak už nie je možné uhol zapnutia zväčšovať. Moment klesá s kvadrátom rýchlosti, preto výkon SRM nemôže byť zachovaný. Tento jav stáva približne pri 2 až 3 násobku ω_b . S narastajúcou rýchlosťou zostatkový prúd pretekajúci cez vinutie spôsobuje produkciu záporného momentu.[5]

B. Redukcia zvlnenia momentu SRM

Všeobecne, elektrické stroje v závislosti od typu motora, nemajú vždy konštantný moment pri konštantnej žiadanej hodnote momentu - tento jav sa nazýva zvlnenie momentu. Obzvlášť u spínaných reluktančných motoroch je možné sa stretnúť s vysokým zvlnením momentu, ktoré je dané tvarom magnetického obvodu v danom stroji. Zvlnenie momentu môžeme posudzovať podľa koeficientu momentu zvlnenia m_{zv} , udávaný v percentách alebo desatinným číslom, ktorý je definovaný ako[28]:

$$m_{zv} = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{av}} \quad (4)$$

kde M_{max} je maximálna hodnota momentu, M_{min} je minimálna hodnota momentu a M_{av} stredná hodnota momentu. Hodnoty sú vyznačené na Obr.5.



Obr. 5. zvlnenie momentu motora

Vychádzajúc z uvedenej literatúry je možné zníženie momentu SRM rozdeliť na 2 väčšie skupiny:

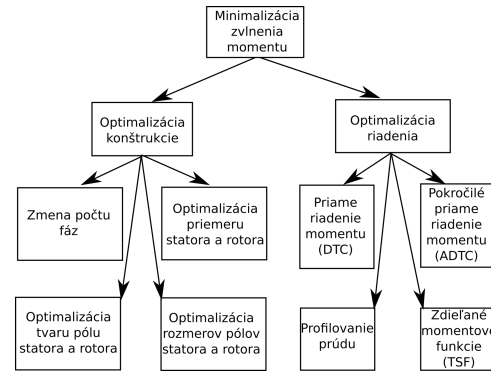
- Optimalizácia konštrukčného usporiadania SRM
- Optimalizácia riadiacich algoritmov SRM

Použitím moderného simulačného softvéru napr. ANSYS Maxwell je možné zostaviť model motora využívajúci metódu konečných prvkov, kde je možné relatívne jednoducho meniť jeho konštrukčné vlastnosti (napr. rozmery alebo tvary pólov) vplyvajúce na výsledný moment motora. Použitie takéhoto softvéru však vyžaduje vysoký výpočtový výkon a predlžuje sa simulačný čas závislý od zvolenej hustoty siete modelu motora.

Ďalšou možnosťou je výber pokročilejšej metódy riadenia. Simulovať rôzne riadiace metódy je možné aj pomocou softvéru ANSYS Simplorer, kde je možné vyskladať resp. navrhnúť rôzne riadiace štruktúry. Výhodnou vlastnosťou je aj možnosť kooperatívneho režimu jednotlivých balíkov softvéru ANSYS, čím je možné sklbiť obe podskupiny optimalizácie. Podrobnejšie rozdelenie redukcie zvlnenia momentu je znázornené na Obr.6.

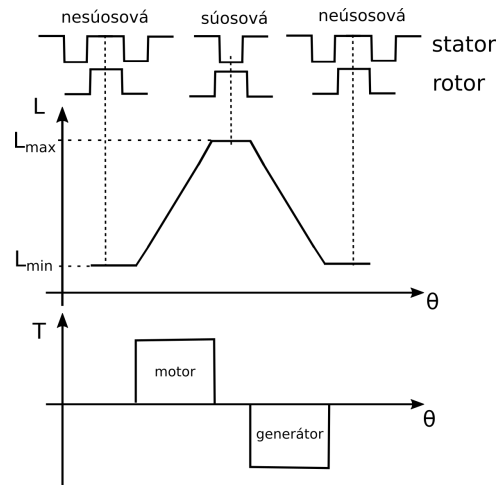
IV. RIADENIE SPÍANÉHO RELUKTANČNÉHO MOTORA

Najjednoduchším princípom riadenia, ktorým sa dosiahne otáčanie rotora SRM, je sekvenčné spínanie jednotlivých fáz v závislosti od polohy rotora. Privedené napätie na danú fázu spôsobí pretekajúce prúdu vinutím a natočenie rotora do súsovej polohy. Zaujímavým faktom je, že nezáleží na polarite prúdu, dôležité je však načasovanie impulzu. Rotor SRM vytvára kladný moment, vtedy keď



Obr. 6. Minimalizácia zvlnenia momentu – rozdelenie metód

vinutím preteká prúd a indukčnosť danej fázy má narastajúci charakter. Po dosiahnutí maxima indukčnosti je potrebné zopnúť ďalšiu fázu. V polohe rotora, keď ma indukčnosť klesajúci charakter, SRM vytvára záporný moment. Ideálny priebeh momentu jednej fázy SRM môžeme vidieť na Obr. 7



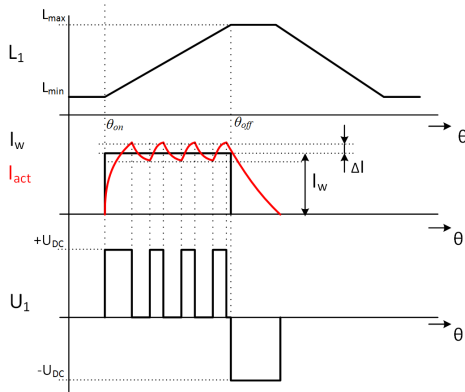
Obr. 7. Moment SRM v závislosti od idnukčnosti resp. polohy rotora

Tento spôsob riadenia je len základný z jeho princípu sú odvodené ďalšie metódy, ktoré už uvažujú aj s reguláciou prúdu, momentu či rýchlosti. Niektoré z nich budú uvedené v ďalších podkapitolách.

A. Hysterézna regulácia prúdu

Jednou z metód, ktoré umožňujú regulovať prúd vo fáze spínaného reluktančného motora je metóda s využitím hysterézneho regulátora prúdu, pričom komutácia fáz je odvodená od polohy rotora θ . Pomocou spínania napätia fázy sa dosiahne regulácia prúdu v rozmedzí $\pm \Delta I$, počas definovaného intervalu $\theta_{off} - \theta_{on}$. Princíp s unipolárnym spínaním napätia je zobrazeny na Obr. 8. Pre rýchlejší zánik prúdu v polohe θ_{off} je privedené záporné napätie $-U_{DC}$. [6]

Hysterézny prúdový regulátor je možné použiť v kaskádnej regulačnej štruktúre pri riadení uhlovej



Obr. 8. Princíp hysteréznej regulácie prúdu

rýchlosti a tiež môže byť kombinovaná s metódou TSF (torque sharing function).[5] Výhodou je, že prúd vo vinutí je obmedzený a neprekmitne nad požadovanú hodnotu. Značnou nevýhodou je veľké zvlnenie momentu motora.

1) *Kompenzácia uhla vypnutia v závislosti od otáčok motora:* Pri tomto type riadenia sa uhol vypnutia mení v závislosti od otáčok motora t.j. s rastúcimi otáčkami sa uhol vedenia prúdu znižuje. To môže byť aplikované podľa nasledujúceho vzťahu:

$$\theta_{off} = \theta_{off} - k.n \tag{5}$$

kde θ_{off} je uhol vypnutia, n sú otáčky motora a k je konštanta kompenzácie otáčok.

2) *Kompenzácia uhla vypnutia v závislosti od otáčok a prúdu motora:* Metóda je principiálne rovnaká ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že sa kompenzuje aj vplyv veľkosti fázového prúdu motora. Vplyv uhla vypnutia bol kompenzovaný podľa vzťahu:

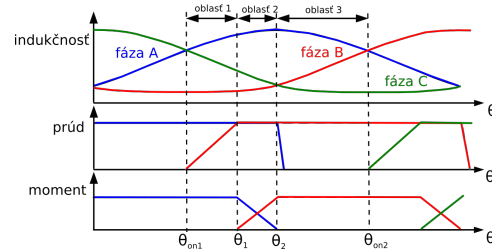
$$\theta_{off} = \theta_{off} - k.n - q.I^2 \tag{6}$$

kde θ_{off} je uhol vypnutia, n sú otáčky motora a k je konštanta kompenzácie otáčok, I je fázový prúd a q je konštanta kompenzácie vplyvu prúdu.

B. Priame riadenie momentu

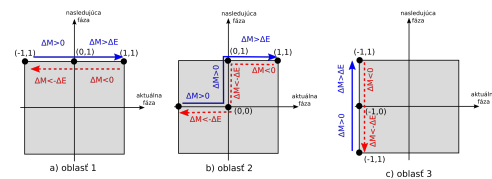
1) *Metóda priameho riadenie momentu - DTC:* Metóda priameho riadenia momentu - DTC (z angl. Direct Torque Control) je založená na riadení okamžitej hodnoty krútiaceho momentu. Okamžitá hodnota momentu je získavaná z meraných prúdov, ktoré sú následne prepočítané na hodnotu momentu motora. Z okamžitej hodnoty momentu je potom možné určiť potrebný akčný zásah taký, aby bola zachovaná konštantná hodnota momentu motora. Priebeh indukčnosti každej fázy stroja je rozdelený na 3 oblasti, pričom je potrebné rozlišovať, ktorá fáza je aktuálna a ktorá nasledujúca. Rozdelenie oblastí môžeme vidieť na Obr.9, kde L_A je aktuálna fáza a L_B nasledujúca fáza. Hranice jednotlivých oblastí sú θ_{on1} , θ_1 ,

θ_2 a θ_{on2} , kde θ_1 je začiatok prekrývania pólov statora a rotora nasledujúcej fázy (nárast indukčnosti L_B) a θ_2 je súosová poloha aktuálnej fázy. [5]



Obr. 9. Rozdelenie oblastí

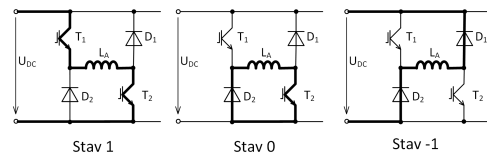
V závislosti od oblasti a okamžitej hodnoty momentu je zvolený stav (1, 0, -1) pre aktuálnu a nasledujúcu fázu. Pravidlá pre presun do jednotlivých stavov sú zobrazené na Obr. 10. Tieto pravidlá môžeme zapísať aj do tabuľky. V Tab. I sú zapísané stavy meniča vždy pre danú fázu, ktoré je možné dosiahnuť kombináciou zopnutia jednotlivých spínacích tranzistorov. Stavy dvojkvadrantového meniča s reverzáciou napätia je možné vidieť na obr. 11.



Obr. 10. Akčné zásahy v jednotlivých oblastiach[5]

Tabuľka I
PRAVIDLÁ DTC

Oblasť	Podmienka ΔM	stav fázy	
		nasledujúca	aktuálna
Oblasť 1	>0	1	0
	$>\Delta E$	1	1
	<0	1	0
	$< -\Delta E$	1	-1
Oblasť 2	>0	0	0
	$>\Delta E$	1	1
	<0	1	0
	$< -\Delta E$	0	-1
Oblasť 3	>0	0	-1
	$>\Delta E$	1	-1
	<0	0	-1
	$< -\Delta E$	-1	-1



Obr. 11. Stavy dvojkvadrantového meniča

Parameter regulátora ΔE je definované pásmo hysterézie. Keďže metóda je založená na priamom riadení

momentu a jej hlavnou výhodou je rýchla odozva momentu motora a nižšie zvlnenie momentu. Medzi nevýhody patrí nutnosť pozorovania momentu a s tým potrebná dôkladná znalosť charakteristík motora.

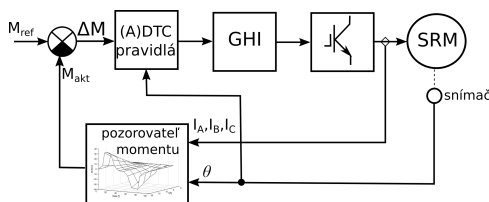
2) *Metóda pokročilého priameho riadenia momentu - ADTC*: Metóda pokročilého priameho riadenie momentu (z angl. Advanced DTC) kombinuje konvenčnú DTC metódou s PWM (šírko impulzná modulácia). Rovnako ako DTC metóda aj ADTC vyžaduje tri stavy meniča, ale prechod do niektorých stavov je vykonávaný pomocou ŠIM, čím sa zabezpečí plynulý prechod z jedného stavu do druhého. Strieda modulácie fázových spínačov je počítaná v závislosti od momentovej regulačnej odchýlky ΔM a definovaného hysterézneho pásma ΔE . Týmto spôsobom ADTC metóda umožní nastaviť aj nižšiu strednú hodnotu napätia na fáze, čo síce zvýši frekvenciu spínania tranzistorov, ale tiež zníži zvlnenie momentu v porovnaní s DTC metódou.[5] Pravidlá pre reguláciu pomocou ADTC metódy sú popísané v Tab.II Stav označovaný ako d je strieda ŠIM a je definovaný ako:

$$d = \frac{|\Delta M|}{\Delta E} \quad (7)$$

Rovnako ako DTC aj ADTC metóda vyžaduje pozorovateľ momentu, preto sa regulačná schéma líši len v bloku pravidiel, ktorý tiež obsahuje PWM generátor. Regulačná schéma pomocou DTC a ADTC metódy je znázornená na Obr.12 Pri oboch metódach je možné použiť nadradenú reguláciu uhlovej rýchlosti.

Tabuľka II
PRAVIDLÁ ADTC

Oblasť	Podmienka ΔM	stav fázy nasledujúca	
		nasledujúca	aktuálna
Oblasť 1	>0	1	d
	$>\Delta E$	1	1
	<0	d	0
	$<-\Delta E$	0	-1
Oblasť 2	>0	d	d
	$>\Delta E$	1	1
	<0	0	0
	$<-\Delta E$	0	-1
Oblasť 3	>0	d	-1
	$>\Delta E$	1	-1
	<0	0	-1
	$<-\Delta E$	0	-1

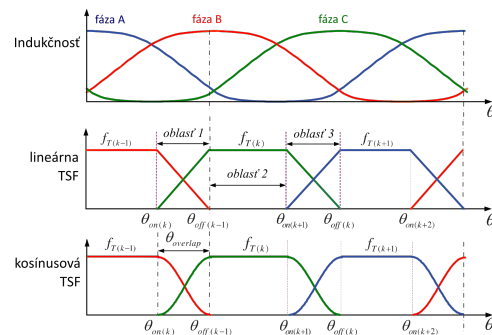


Obr. 12. Regulačná schéma pre DTC a ADTC

C. Metóda spoločných momentových funkcií - TSF

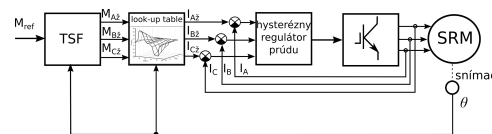
Metóda TSF (z angl. Torque Sharing Function) je ďalšia metóda umožňujúca znížiť zvlnenie momentu SRM. Metóda využíva jednoduché spoločné momentové krivky (žiadané hodnoty momentu) k produkcii konštantného momentu. Pred implementáciou metódy je však potrebné odmerať závislosť $i(M, \theta)$, ktorá sa použije pre výpočet žiadanej hodnoty prúdu. TSF krivky v závislosti od tvaru môžeme rozdeliť na lineárne a nelineárne. Nelineárne krivky ďalej môžeme členiť na kosínusové, exponenciálne a asymetrické. Na Obr. 13 môžeme vidieť lineárne a kosínusové TSF krivky v závislosti od indukčnosti jednotlivých fáz. Vo všeobecnosti TSF funkcia je definovaná ako[11]:

$$f_{TSF(k)} = \begin{cases} 0, & \theta < \theta_{on(k)} \\ f_{up}, & \theta_{on(k)} < \theta < \theta_{off(k-1)} \\ M_{ref}, & \theta_{off(k-1)} < \theta < \theta_{on(k+1)} \\ f_{down}, & \theta_{on(k+1)} < \theta < \theta_{off(k)} \\ 0, & \theta_{off(k)} < \theta < \theta_{on(k)} \end{cases} \quad (8)$$



Obr. 13. Lineárne a kosínusové TSF funkcie

Na základe žiadanej hodnoty momentu a aktuálnej polohy rotora je pomocou TSF vytvorená žiadaná hodnota momentu separátne pre každú fázu. Z nej je potom pomocou nameranej závislosti $i(M, \theta)$ vypočítaná žiadaná hodnota prúdu. V podradenej prúdovej slučke prebieha regulácia prúdu s hysteréznym regulátorom prúdu opísaným v odstavci IV-A. Regulačná schéma metódou TSF je zobrazená na Obr. 14



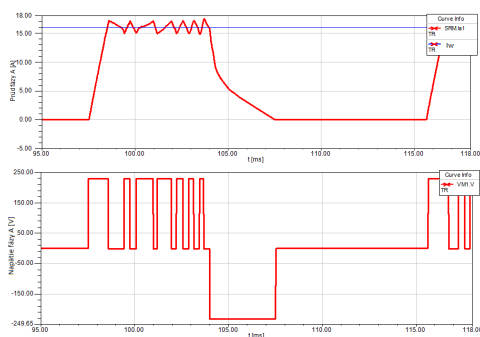
Obr. 14. Regulačná schéma pomocou TSF metódy

D. Simulácia riadenia spínaného reluktančného motora

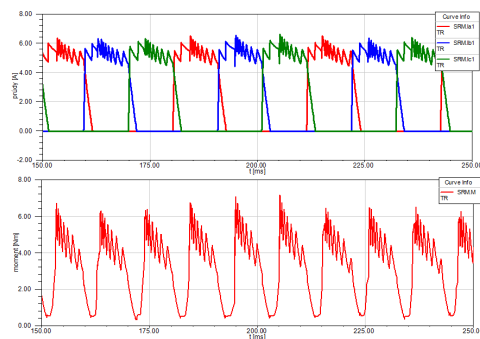
1) *Simulácia riadenia s hysteréznou reguláciou prúdu*: Hysteréznym regulátorom reguluje prúd separátne v každej fáze v intervale $\theta_{off} - \theta_{on}$. Teoretický predpoklad je uvedený na Obr. 8. Na Obr. 15 je znázornené napätie na fáze, ktoré

je spínané tak, aby sa udržala konštantná hodnota 16A s hystereziou prúdu $\Delta I = \pm 1A$

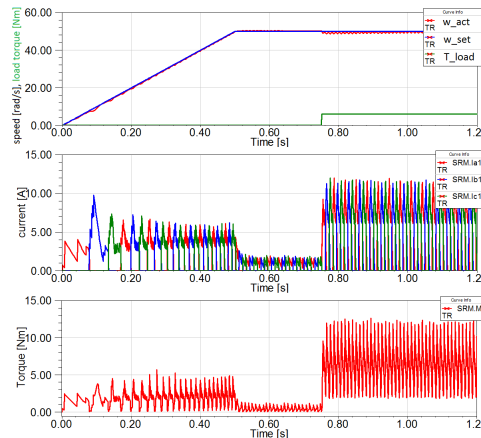
Uvedený typ riadenia bol aplikovaný na SRM s počtom pólov $2p_1/2p_2 = 6/4$, pričom bol nastavený uhol vedenia fázy na 15° Obr. 16 zobrazuje priebeh prúdov a k nim zodpovedajúci moment motora pri žiadanej hodnote prúdu 5A. Na základe priebehu momentu je možné skonštatovať, že použitie metódy s hystereziou regulátorom má v ustálenom stave pomerne vysoké zvlnenie momentu. Zníženie zvlnenia momentu je možné dosiahnuť zväčšením uhla vedenia, tak aby sa jednotlivé fázové prúdy prekrývali. K regulácii prúdu bol pridaný nadradený PI regulátor uhlovej rýchlosti. Rozbeh motora bol simuláčne testovaný ako odozva na rozbehovú rampu, kde počas 0,5s dosiahne uhlovú rýchlosť 50 s^{-1} . V čase 0,75s je motor zaťažovaný momentom 6Nm. Časový priebeh žiadanej a skutočnej uhlovej rýchlosti, jednotlivých prúdov a momentu motora je možné vidieť na Obr. 17.



Obr. 15. Časový priebeh prúdu a napätia jednej fázy

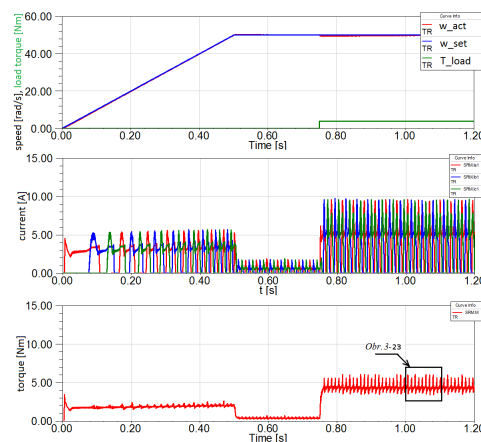


Obr. 16. Časový priebeh prúdov a momentu



Obr. 17. Časový priebeh rýchlostí, prúdov a momentu

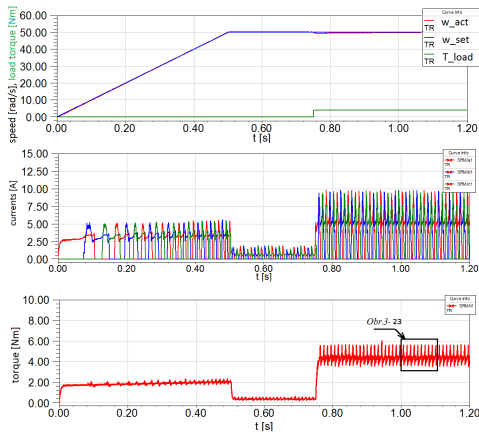
2) *Simulácia priameho momentového riadenia:* Metóda priameho momentového riadenia bola opísaná v odstavci IV-B1. Funkčnosť metódy bola overená na modeli SRM s počtom pólov $2p_1/2p_2 = 6/4$. Rovnako ako pri predchádzajúcej simulácii, k momentovej slučke bola doplnená regulácia rýchlosti a pohon bol testovaný rovnakou rozbehovou rampou (za čas 0,5s dosiahne rýchlosti 50 s^{-1}). V čase 0,75s je zaťažovaný momentom 4Nm. Na Obr. 18 je znázornený priebeh rýchlostí, prúdov a momentu motora. Porovnaním momentu na Obr. 17 a Obr. 18 vidíme, že metóda DTC má podstatne nižšie zvlnenie momentu.



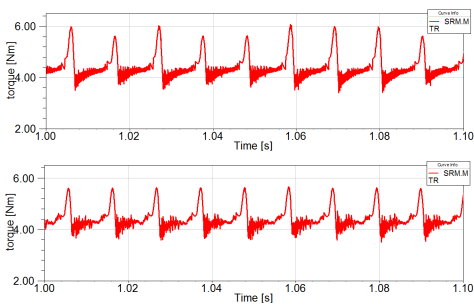
Obr. 18. Časový priebeh rýchlostí, prúdov a momentu

Overovaná bola tiež metóda pokročileho momentového riadenia ADTC z odstavca IV-B2, ktorá sľubuje ešte nižšie zvlnenie momentu motora. Pre metódu boli aplikované rovnaké referenčné hodnoty rýchlosti a momentu ako pri predchádzajúcich simuláciách. Časové priebehy veličín sú zobrazené na Obr. 19. Pri porovnaní momentov metódy DTC na Obr. 18 a ADTC na Obr. 19 nie je vidieť väčšie rozdiely. Detail momentu motora v ustálenom stave metódy DTC a ADTC porovnáva Obr. 20. Na uvedenom

detaily je možné pozorovať nižšie zvlnenie momentu s použitím metódy ADTC, však asi len o 0,25 Nm.



Obr. 19. Časový priebeh rýchlostí, prúdov a momentu



Obr. 20. Časový priebeh momentov motora - DTC(hore), ADTC(dole)

V. REALIZÁCIA POHONU A EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

A. Realizácia meniča pre spínaný reluktančný motor

Cieľom bolo navrhnuť výkonový menič pre zakúpený spínaný reluktančný motor s počtom pólov $2p_1/2p_2 = 12/8$. Rovnako z toho dôvodu sú vykonávané merania realizované na inom type motora ako simulácie. Z dôvodu odlišnosti od bežných meničov pre striedavé pohony, bola vylúčená možnosť použitia už jestvujúcich meničov a bolo potrebné navrhnuť menič od základov. Pri návrhu dôraz bol predovšetkým kladený na možnosti aplikovania pokročilejších riadiacich algoritmov.

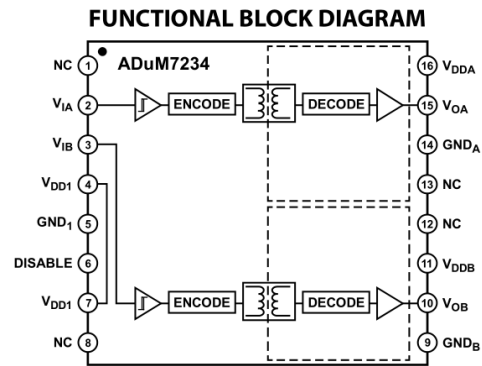
Vhodnou topológiou výkonovej časti je asymetrický mostíkový menič zo skupiny meničov 2N. Pri návrhu sme brali do úvahy, že samotná výkonová časť bude napájaná z jednosmerného zdroja U_{DC} , tým pádom sme sa nezaoberali návrhom usmerňovača.

Výhodným faktorom oproti meničom pre striedavé pohony je, že pri súčasnom zopnutí akýchkoľvek tranzistorov v meniči, nehrozí deštrukcia meniča, a preto nie je potrebné ošetrovať stavy pomocou bezpečnostných medzier či už hardvérovo alebo softvérovo.

Ako spínacie prvky boli zvolené tranzistory MOSFET, ktoré umožňujú spínať vyššie frekvencie a zároveň výkonovo sú dostačujúce. K nim bol vybraný budič v integrovanom púzdre ADuM7234 umožňujúci nezávisle budiť tranzistor hornej aj spodnej vetvy tranzistorov meniča. Výhodou je tiež, že nie je potrebné použitie ďalších obvodov a optočlenov pre oddelenie vstupnej a výstupnej strany budiča. [37] K integrovanému budiču stačilo vybrať zdroje izolovaného napájania budenia tranzistorov. Bloková schéma budiča je zobrazená na obr. 21.

Pre riadenie meniča a motora bola zvolená riadiaca vývojová doska z rady STM Nucleo, k čomu sa prispôbil aj samotný návrh plošného spoja tak, aby tento modul mohol byť do neho vložený. Zároveň sme sa tak vyhli nepríjemnostiam s osadzovaním procesora do dosky plošných spojov a vieme využiť aj ďalšie výhody ako početné voľné svorky a programovací adaptér, ktorý je súčasťou tohto vývojového kitu. Zároveň je možné využívať jeho USB rozhranie aj ako komunikačný nástroj s parametrovacou aplikáciou.

Pri vývoji meniča bolo potrebné vziať do úvahy aj spracovanie signálu o polohe rotora SRM. K rotoru bol upevnený absolútny snímač polohy založený na magnetickom princípe s rozlíšením $0,0879^\circ$. Snímač komunikuje pomocou sériového rozhrania SSI, teda je možné procesorom priamo spracovávať signál o polohe rotora. Potrebné bolo akurát prispôbiť napätovú hladinu snímača pre spracovanie signálu procesorom na úrovni 3,3 V.



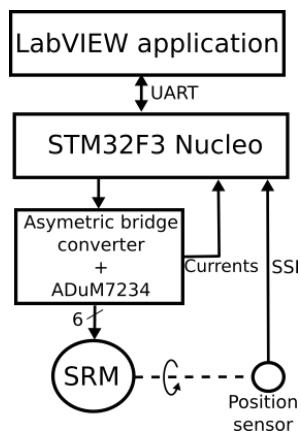
Obr. 21. Bloková schéma budiča

Tabuľka III
PARAMETRE VÝVOJOVÉHO KITU NUCLEO STM32F3

Typ procesora	STM32F303RE
Jadro	ARM® Cortex®-M4 32-bit CPU with FPU
frekvencia procesora	72 MHz
AD prevodníky	4x 12-bit ADC (5 Msps)
Debugger	ST-LINK/V2-1

Na obr.22 je znázornená bloková schéma navrhnutého pohonu so spínaným reluktančný motorom. Fázy motora sú pripojené k meniču jednotlivo pomocou šiestich vodičov. Riadiaci program generuje hradlové impulzy,

ktoré sú privedené cez budič ADuM7234 na hradlá tranzistorov. Riadiaci vývojový kit STM32F3 Nucleo spracováva spätnú väzbu od fázových prúdov meraných v meniči. Rovnako je spracovaný signál o polohe rotora SRM z absolútneho snímača. Pre nahrávanie regulačných parametrov a žiadaných hodnôt regulácie bola vytvorená aplikácia v LabView, ktorá tiež umožňuje zobrazovať merané a vypočítavané veličiny ako napr. prúdy alebo otáčky motora. Aplikácia komunikuje s Nucleo modulom pomocou sériového rozhrania UART.



Obr. 22. Bloková schéma pohonu so SRM

1) *Štruktúra riadiaceho programu:* Daný typ procesora bol zvolený najmä vďaka veľmi rýchlym AD prevodníkom, ktorými disponuje. Tieto prevodníky dokážu zaznamenať $5 \cdot 10^6$ vzoriek za sekundu, čo znamená, že rýchlosť jedného prevodu trvá 200 ns. Navyše daný procesor obsahuje 4 prevodníky to znamená, že dokáže urobiť 4 prevody simultánne. Z týchto prevodníkov sú využité tri, pre konverziu snímaných fázových prúdov.

Prevodníky sa spúšťajú cyklicky na základe prerušenia bežiaceho časovača s periódou $50 \mu s$. V tomto cykle sa vykoná prevod jednotlivých vzoriek fázových prúdov, načítanie polohy rotora a akčný zásah prúdového regulátora. Výsledná vzorka pre fázový prúd je zostavená ako aritmetický priemer 4 po sebe idúcich vzoriek aby sa predišlo náhodným odchýlkam spôsobených rušením.

Pre načítavanie polohy zo snímača polohy je využitá periféria DMA (Direct Memory Access) t.j. priamy prístup do pamäti bez inštrukcii procesora. Jedná sa o spôsob priameho prenosu dát medzi operačnou pamäťou a vstupnou perifériou. Prenášané údaje tak neprechádzajú cez procesor čím ho nezaťažujú a je možné dosiahnuť vyššiu rýchlosť spracovania signálu. Trvanie prúdovej regulačnej slučky je rovný perióde prerušenia časovača TIM4 teda $50 \mu s$.

K prúdovej regulačnej slučke je nadradený regulátor rýchlosti, pričom sa skutočná rýchlosť počíta ako rozdiel dvoch po sebe idúcich polôh rotora za konštantnú časovú jednotku. Regulátor je typu PI a jeho jednotlivé zosilnenia je možné načítať z parametrovej aplikácie v LabView

pomocou sériového rozhrania UART. Toto komunikačné rozhranie zároveň cyklicky odosiela merané a počítané veličiny, ktoré sa zobrazujú ako časový priebeh v aplikácii. Z aplikácie je tiež možné voľiť regulačnú štruktúru a zadávať žiadané hodnoty pre reguláciu SRM.

B. Experimentálne výsledky

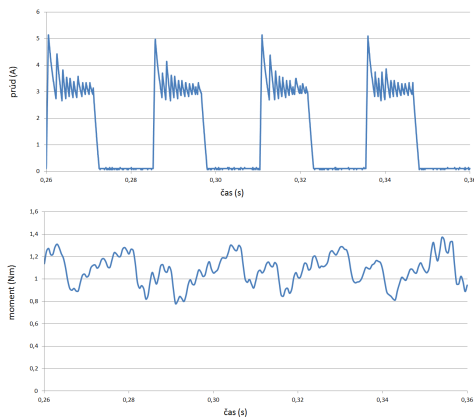
Je nutné podotknúť, že pre testovacie účely bol použitý SRM konštrukcie $2p_1/2p_2 = 12/8$, zatiaľ čo pre simulačné výsledky bol použitý SRM konštrukcie $2p_1/2p_2 = 6/4$. Dôvodom je dostupnosť tohto typu motora, ktorý v prvej fáze vývoja ešte nebol známy. Pre zaťažovanie testovaného SRM bol použitý SMPM motor Siemens, ktorý bol napájaný z frekvenčného meniča SINAMICS S120 používaného v priemysle v spolupráci s parametrovacím nástrojom STARTER. Výhodou použitia tohto systému je možnosť širokého zásahu do regulačných štruktúr, vyčítavania rôznych parametrov a meraných veličín, a tiež vysoká presnosť riadenia momentu.

Ako najväčšiu nevýhodu meracieho standu je nutné spomenúť absenciu vhodného snímača momentu. Pri meraní momentu SRM bolo využité nepriame meranie momentu na základe hodnoty získavanej zo systému Siemens. Na základe [38], je možné konštatovať, že pri dodržaní určitých podmienok by relatívna chyba merania momentu nemala prekročiť 5%. Merania uvedené v [38] naznačujú, že pre minimalizovanie chyby merania je vhodné merať pri najnižších otáčkach motora 300 ot/min a so snímačom rýchlosti motora.

Meranie momentu bolo realizované nasledovným spôsobom: zaťažovací pohon SMPM bežal v rýchlostnej regulačnej slučke a udržoval žiadanú rýchlosť otáčok. Testovaným motorom SRM bol vytváraný záťažný moment, ktorý bol odčítavaný pomocou zaťažovacieho SMPM motora. Keďže motory majú spojené hriadele, odčítavaný moment zodpovedá momentu SRM.

1) *Metóda s hysteréznym riadením prúdu:* Počas merania bol skúmaný vplyv rýchlosti motora a veľkosti žiadanej hodnoty prúdu na moment motora a zvlnenie momentu motora. Meraný bol 4 sekundový časový úsek. Z daného úseku bol vybraný interval 100 ms pre merané prúdy a zosynchronizovaný s meraným momentom. Na obr.23 je zobrazený typický príklad analyzovaného časového priebehu prúdu a k nim zodpovedajúci priebeh momentu.

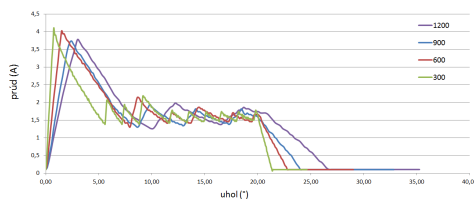
Na uvedené priebehy je možné vidieť, že pri zopnutí danej fázy dochádza rýchlemu nárastu prúdu a prekmitu prúdu nad žiadanú hodnotu, pretože indukčnosť magnetického obvodu je v tejto polohe najnižšia. Naopak pri vypínaní fázy je fázová indukčnosť na najvyššej hodnote a pokles prúdu trvá dlhšiu dobu. V prípade, že prúd nestihne zaniknúť, vytvára záporný moment na danej fáze a výsledný moment motora má väčšie zvlnenie. Z tohto dôvodu, dôležitým faktorom vplyvajúcim na zvlnenie momentu motora je rýchlosť rotora resp. otáčky a preto ďalšie priebehy prúdov je vhodné prepočítať na polohu



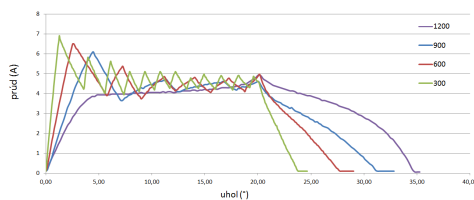
Obr. 23. Časový priebeh prúdu a momentu pred žiadanú hodnotu prúdu 3A pri 300 ot./min

rotora. Na nasledujúcich obr. 24 a 25 sú zobrazené prúdy v závislosti od polohy rotora pre rôzne otáčky.

Porovnaním obr. 24 a obr.25 že pri vyššom prúde oneskoruje uhol vypnutia a dĺžka uhla vedenia má vplyv na zvlnenie momentu. Preto je vhodné porovnať prúdové impulzy pre rôzne žiadané hodnoty prúdu pri rovnakých otáčkach. Vplyv veľkosti prúdu je možné vidieť na obr. 26 a obr.27. Zo závislostí vidíme, že pri otáčkach 1200 ot./min. fázový prúd už nedokáže dosiahnuť žiadanú hodnotu, čo sa prejavilo aj zníženým momentom motora.

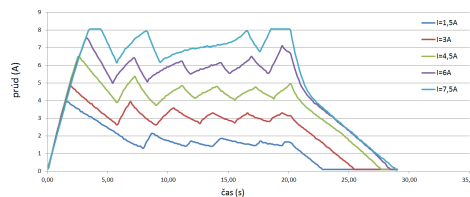


Obr. 24. Závislosť prúdu od polohy rotora, pre žiadanú hodnotu prúdu 1,5A

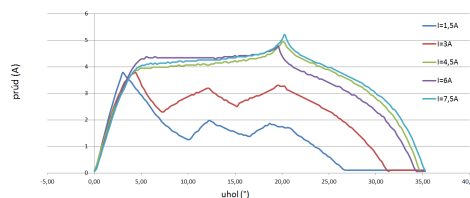


Obr. 25. Závislosť prúdu od polohy rotora, pre žiadanú hodnotu prúdu 4,5A

2) *Metóda s hysteréznym riadením prúdu a kompenzáciou uhla vypnutia:* Na predchádzajúcej podkapitole bolo ukázané, že na oneskorenie poklesu prúdu značne vplývajú hlavne otáčky a veľkosť fázového prúdu motora. Pri oneskorenom vypnutí dochádza k posunu uhlu vypnutia voči optimálnemu stavu a tým dochádza k značnému



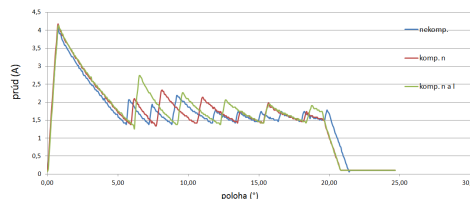
Obr. 26. Závislosť prúdu od polohy rotora, pri otáčkach 600 ot./min



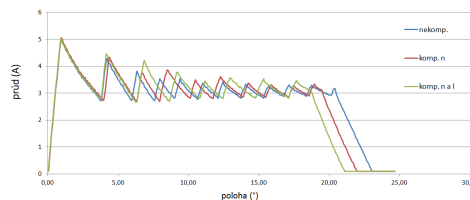
Obr. 27. Závislosť prúdu od polohy rotora, pri otáčkach 1200 ot./min

zvlneniu momentu motora. Z tohto dôvodu je vhodné uhol vypnutia meniť v závislosti od zvolených parametrov. Pre boli aplikované 2 typy kompenzácií uhla vypnutia podľa (5) a (6).

3) *Porovnanie kompenzácií:* Na obr.28 až 31 sú porovnané vplyvy jednotlivých kompenzácií na uhol vypnutia. Modrou čiarou je vyznačený prúdový impulz bez kompenzovania, červenou je kompenzácia vplyvu otáčok a zelenou je čiarou je kompenzácia vplyvu otáčok a prúdu.

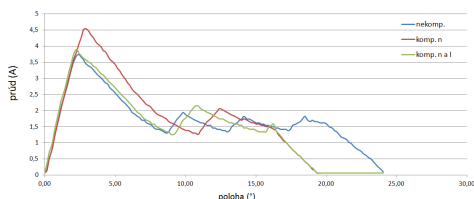


Obr. 28. Závislosť prúdu od polohy rotora, pre žiadanú hodnotu prúdu 1,5A, pri otáčkach 300 ot./min

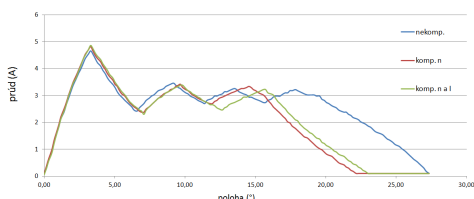


Obr. 29. Závislosť prúdu od polohy rotora, pre žiadanú hodnotu prúdu 3A, pri otáčkach 300 ot./min

Z obr. 28 a obr.30 je možné vidieť, že pri nižších prúdoch, okolo 1,5 A, sa kompenzácia prúdu neprejaví. V porovnaní s nekompenzovaným uhlom (modrá čiara) je však vidieť rozdiel. Pri vyšších prúdoch, okolo 3A, a to konkrétne na obr.29 a obr. 31 už je možné vidieť vplyv kompenzácie prúdu na uhol vypnutia.



Obr. 30. Závislosť prúdu od polohy rotora, pre žiadanú hodnotu prúdu 1,5A, pri otáčkach 900 ot./min

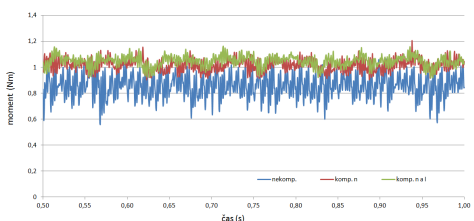


Obr. 31. Závislosť prúdu od polohy rotora, pre žiadanú hodnotu prúdu 3A, pri otáčkach 900 ot./min

4) Porovnanie výsledkov z hľadiska zvlnenia momentu:

Obmedzením vplyvu uhla vypnutia, naznačeným v predchádzajúcej podkapitole, je možné dosiahnuť menšie zvlnenie momentu SRM. Kompenzácia má význam hlavne, keď bude pohon využitý v celom otáčkovom a prúdovom rozsahu, preto je potrebné porovnať zvlnenie momentu pri rôznych prúdoch a otáčkach.

Jednotlivé merania boli porovnávané základe vypočítaného koeficientu zvlnenia podľa (4), pričom koeficient zvlnenia bol vypočítaný vždy za rovnaký časový úsek a to 500ms. Na obr.32 sú porovnané časové priebehy momentov použitím metódy hysterézneho riadenia prúdu, bez použitia kompenzácie - modrá čiara, s kompenzovaním otáčok - červená čiara a s kompenzovaním otáčok a prúdu - zelená čiara pri 900 ot./min. a žiadanom prúde 3A. Znázornený priebeh je typickým príkladom spracovávaných a porovnaných dát. bol nameraný.



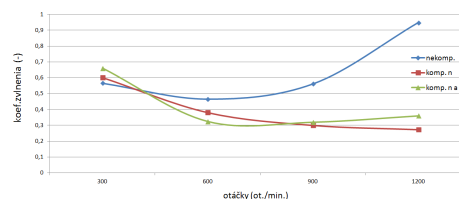
Obr. 32. Porovnanie zvlnenia momentu, pre žiadanú hodnotu prúdu 3A, pri otáčkach 900 ot./min

Podľa definície koeficientu zvlnenia momentu je možné tvrdiť, že čím je koeficient bližší k nule, tým je moment menej zvlnený. Pre lepšie porovnanie je vhodnejšie hodnoty koeficientu zvlnenia momentu zobrazit graficky. Koeficient zvlnenia momentu je možné porovnať dvomi spôsobmi: v závislosti od otáčok motora a v závislosti od prúdu motora. Pre

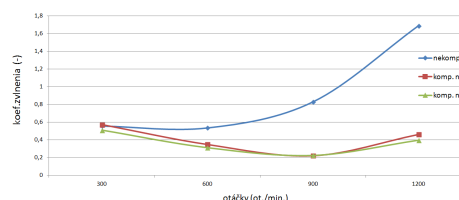
obe porovnania platí, že lepšie výsledky boli dosiahnuté s použitím kompenzácií.

Pri porovnaní zvlnenia z hľadiska rastúcich otáčok je vidieť, že najlepšie výsledky boli dosiahnuté v strednom rozsahu otáčok od 500 do 1000 ot./min. pri použití metód s kompenzáciami uhla vypnutia. Koeficient zvlnenia sa pohyboval maximálne do hodnoty 0,5. Závislosti koeficientu zvlnenia od otáčok pre jednotlivé prúdy sú zobrazené na obr.33 až obr.36

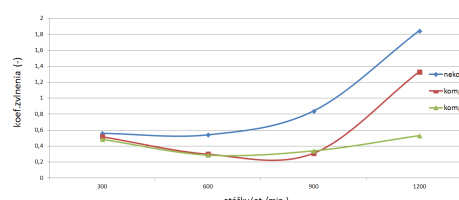
Pri porovnaní koeficientu zvlnenia v závislosti od rastúceho prúdu je možné dosiahnuť nižšie hodnoty zvlnenia v strednom rozsahu prúdov od 3 do 6A. Pri zvyšovaní zaťaženia koeficient opäť vzrastá. Na obr.37 až 40 je zobrazená závislosť koeficientu zvlnenia od prudu motora pre jednotlivé otáčky.



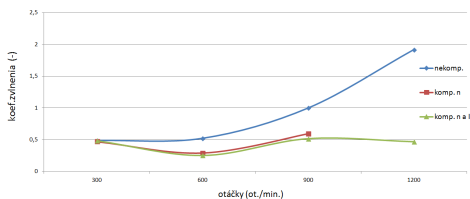
Obr. 33. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od otáčok pre prúd 3A



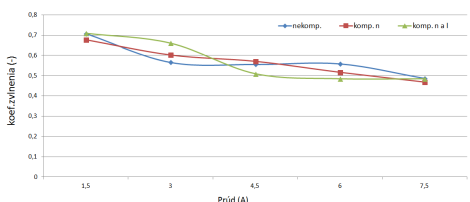
Obr. 34. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od otáčok pre prúd 4,5A



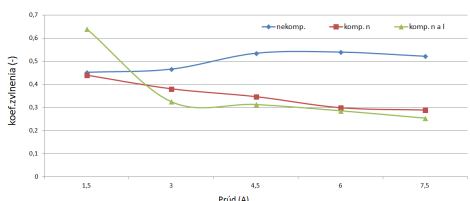
Obr. 35. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od otáčok pre prúd 6A



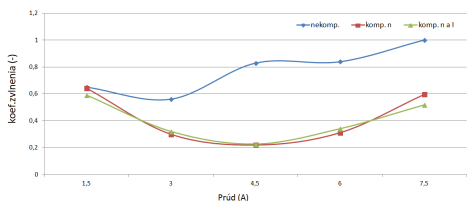
Obr. 36. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od otáčok pre prúd 7,5A



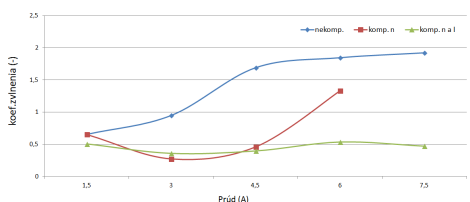
Obr. 37. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od prúdu pre 300ot./min



Obr. 38. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od prúdu pre 600ot./min



Obr. 39. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od prúdu pre 900ot./min



Obr. 40. Závislosť koeficientu zvlnenia momentu od prúdu pre 1200ot./min

VI. CONCLUSION

V rámci tohto príspevku boli prezentované predovšetkým možnosti riadenia spínaného reluktančného motora. V Simulačnej časti bola preukázaná redukcia zvlnenia momentu aplikovaním pokročilých riadiacich

metód. Metódy ako priame riadenie momentu vyžadujú informáciu o aktuálnej hodnote momentu, čo je možné realizovať pomocou snímača alebo pozorovateľa momentu. Aplikáciou pozorovateľa momentu však rastú hardvérové nároky, čo v tomto prípade znemožnilo praktické overenie DTC metódy. Realizovaným riadením pohonu s SRM bola metóda hysterézného riadenia prúdu. Praktickým poznatkom pri testovaní jednotlivých riadiacich algoritmov je hlavne vplyv uhla vedenia na zvlnenie momentu SRM. Experimentálnymi meraniami sa nám podarilo zistiť, že väčší vplyv na zvlnenie má uhol vedenia ako samotný tvar prúdového impulzu. To umožňuje využiť menej komplikované riadiace metódy. Naopak sofistikovanejšie metódy sú viac náročnejšie na výpočtový výkon riadiacej jednotky a negarantujú jednoznačne lepšie výsledky.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol za podpory agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-15-0750

LITERATÚRA

- [1] V. Hrabovcová, L. Janoušek, P. Rafajdus, M. Ličko.: *Moderné elektrické stroje*. Žilinská univerzita, EDIS, ISBN 80-7100-809-5, 2001
- [2] G. Ramasamy, R.V. Rajandran, N.C. Sahoo: 2001. *Modeling of Switched Reluctance Motor Drive using Matlab/Simulink for Performance Analysis of Current Controllers*. In: IEEE Power Electronics and Drive System 2005, Vol. 2 ,Print ISBN: 0-7803-9296-5 , pp. 982-897
- [3] R. Visinka 2005. *3-Phase Switched Reluctance (SR) Sensorless Motor Control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device*. 02/2005
- [4] P. Záskalický 2005. *Elektrické stroje 2015*
- [5] J.-W. Ahn, M.T. Lamchich: *Torque Control: Switched reluctance motor*. ISBN 978-953-307-428-3, 02/2011, Available online, February 2016 in: <http://www.intechopen.com/books/torque-control/switched-reluctance-motor>
- [6] R. Krishnan: *Switched reluctance motor drives: Modeling, simulation, analysis, design and applications*. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., ISBN 0-8493-0838-0, 2001
- [7] Ž. Ferková: *Spínaný reluktančný motor: princíp, konštrukcia, riadenie*. Habilitačná práca, Technická univerzita, Liberec, 2006
- [8] T. Wichert: *Design and construction modifications of switched reluctance machines*. PhD. Thesis, Warsaw university of technology, Warsaw, 2008
- [9] S. K. Sahoo: *High-performance torque control of switched reluctance motor*. PhD. Thesis, National university of Singapore, 2006
- [10] D.-H. Lee: *Advanced Torque Control Scheme for the High Speed Switched Reluctance Motor*. Advances in Motor Torque Control, Dr. Mukhtar Ahmad(Ed.), ISBN: 978-953-307-686-7, 2011, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-motor-torque-control/advanced-torque-control-scheme-for-the-high-speed-switched-reluctance-motor>
- [11] H.-S. Ro, K.-G. Lee, J.-S. Lee, H.-G. Jeong, K.-B. Lee: *Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched reluctance Motor*. Journal of Electrical Engineering & Technology vol.9, ISSN: 1975-0102, 2014
- [12] Ž. Ferková: *Bezsúmačové riadenie spínaného reluktančného motora*. AT&P, 2/004 pp.71-73
- [13] S. Gairola et al.: *A New Power Converter for SRM Drive, Power, Control and Embedded Systems*. (ICPCES) ,IEEE 2010, Print ISBN: 978-1-4244-8543-7
- [14] J.-W. Ahn, J. Liang, D.-H. Lee *Classification and Analysis of Switched Reluctance Converters*. Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 4, pp. 571 579, 2010

- [15] M. Lipták: *Generátorický režim spínaného reluktančného stroja*. Dizertačná práca, Žilinská univerzita v Žiline, August 2007
- [16] T. A. dos S. Barros, A. J. S. Filho, E. R. Filho: *Direct Power Control for Switched Reluctance Generator in Wind Energy, Modeling and Control Aspects of Wind Power Systems*. Prof. S. M. Mueen (Ed.), 2013, ISBN: 978-953-51-1042-2, InTech, DOI: 10.5772/54162. Available online
- [17] J.-W. Ahn: *Torque Control Strategy for High Performance SR Drive*. Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 538-545, 2008
- [18] H.-U. Shin, K. Park, K.-B. Lee: *A Non-Unity Torque Sharing Function for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Generators in Wind Power Systems*. Energies 2015, ISSN 1996-1073, pp. 11685-11701, 2015
- [19] Drives and Controls: *Switched reluctance motors power electric Land Rovers*. April 2013, Available online, February 2016
- [20] A.Y. Anekunu, S.P. Chowdhury, S. Chowdhury: *A Review of Research and Development on Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle*. Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE, ISSN: 1944-9925
- [21] R.H.S. Vrenken, J.L. Duarte, C.G.E. Wijnands, K. Boynov, E. Lomonova., S. Bervotes, S. Faïd: *Switched Reluctance Motor Drive for Full Electric Vehicles - Part I: Analysis* 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2013, Print ISBN: 978-1-4673-5269-7
- [22] S. J. Evangeline, S. S. Kumar: *Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Drives - A Survey*. Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)
- [23] R.H.S. Vrenken, J.L. Duarte, C.G.E. Wijnands, K. Boynov, E. Lomonova., S. Bervotes, S. Faïd: *Switched Reluctance Motor Drive for Full Electric Vehicles - Part II: Practical Implementation* 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2013, Print ISBN: 978-1-4673-5269-7
- [24] J. Castro, P. Andrada, B. Blanqué: *Minimization of torque ripple in switched reluctance motor drives using direct instantaneous torque control* European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Stantiago de Dompostela, Spain, 28-30 March, 2012
- [25] D.A. Shahakar, V.M. Jape: *Direct Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motor* International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol.2, Issue 1, January 2013, ISSN: 2278-8875
- [26] M.T. DiRenzo: *Switched Reluctance Motor Control - Basic Operation and Example Using TMS320F240*. Texas Instruments, Application report, February 2000
- [27] P.J. Lawrenson et. al: *Variable-speed switched reluctance motors*. Proceedings IEE Vol.127, Pt.B 253-265, 1980
- [28] X.Ai-de, H.Kunlun, C.Yuzhao: *Torque Ripple Reduction of SRM using Optimized Voltage Vector in DTC* Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE, 17-20 Oct. 2016, Peking, China, ISBN: 978-1-5090-3529-8
- [29] Y.Weï, M.Qishuang, Z.Poming, G.Yangyang: *Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor using a Novel Torque Sharing Function* International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), 10-12 Oct. 2016, Peking, China, ISBN: 978-1-5090-1087-5
- [30] G.Yangyang, M. Qishuang, Y.Weï: *Comparative Study on Torque Ripple Suppression Method of Three-phase 6/4 Switched Reluctance Motor* International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), 10-12 Oct. 2016, Peking, China, ISBN: 978-1-5090-1087-5
- [31] Z.Q.Zhu, B.Lee, L.Huang, W.Chu: *Contribution of Current Harmonics to Average Torque and Torque Ripple in Switched Reluctance Machines* IEEE Transactions on Magnetics (Volume:PP, Issue:99), IEEE Magnetics Society, Print ISSN: 0018-9464, Online ISSN: 1941-0069
- [32] E.B.Herrera, et. al: *Switched Reluctance Drive Motor Control in Two-Quadrants with Electric Vehicle Applications* World Automation Congress (WAC), 2012, 24-28 June 2012, Print Electronic ISBN: 978-1-889334-47-9
- [33] L.Samani, M.Abdolhamidi, A. Rashidi, S.M.Saghiannezhad: *A design converter for minimizing SRM torque ripple with controlled boost capacitor automatically* Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014, E-ISSN: 1303-6203
- [34] S.Muthulakshmi, R.Dhanasekaran: *A New Front End Capacitive Converter Fed Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Minimization* Scientific Research Publishing: Circuits and Systems, 2016, ISSN Online: 2153-1293
- [35] Diblík, M.; Černošský, J.: *Advanced servo-drive reference model control application*. Carpathian Control Conference (ICCC), 2012 13th International. IEEE, 2012. p. 109-114.
- [36] INFRATEK AG *Single and three phase analyzer - Users manual 106A* 1997, Available online, April 2017, http://www.infratek-ag.com/assets/106_man_e.pdf.
- [37] Analog Devices, Inc *Isolated, Precision Half-Bridge Driver ADuM7234*. 2013, D07990-0-2/13(B), available online in: www.analog.com
- [38] Diblík M., Beran L., Podrapský J.: *On The Accuracy Of Indirect Torque Measurement Using Frequency Converter* 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC). doi:10.1109/carpathiancc.2017.7970366

Riadenie šmyku robotického platformy s využitím kamerových systémov

Róbert Úveges

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Košice, Slovensko
robert.uveges@tuke.sk

František Ďurovský

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Košice, Slovensko
frantisek.durovsky@tuke.sk

Abstrakt— Predmetný príspevok prezentuje princípy riadenia uhlovej a lineárnej rýchlosti šmykom riadeného robotického vozidla. Na šmykom riadenom podvozku je problém dosiahnuť presné riadenie hlavne uhlovej rýchlosti z dôvodu nepredvídateľných podmienok trakcie na povrchu, po ktorom robot jazdí. Prezentované riešenie využíva moderné metódy získavania informácií z optických snímačov ako je stereoskopická kamera a optický gyroskop na získanie lineárnej a uhlovej rýchlosti ako signálu pre regulátor pohybu robota. Regulátor pohybu vozidla následne riadi jednotlivé pohony robota. Optické snímače okrem informácie na riadenie pohybu slúžia aj na tvorbu mapy prostredia, v ktorom robot jazdí.

Kľúčové slová—ROS; V-REP; riadenie šmyku; odometria; robot

Abstrakt— This paper presents principles of angular and linear speed controllers of skidding robotic vehicle. On skidding chassis is difficult to precisely control mainly angular speed, because of uncertain traction conditions of surface. Presented solution is extracting information from modern optic based sensors like stereo camera, and fiber-optic gyroscope to obtain linear and angular speed to feed controllers of robot motion. Robot motion controller commands each drive of the robot using developed two axis frequency inverters. After providing a good trajectory control, mounted optical sensors are used for creating a map of an environment, where is the robot driving.

Keywords—ROS; V-REP, skidding control, odometry, robot

I. ÚVOD

Vo väčšine prípadov sa na pohyb podvozku využíva odvaľovanie kolies. Ak nedôjde k prešmykovaniu kolies, je pohyb robota jednoznačne opisateľný kinematikou podvozku. Alternatívou k tomuto spôsobu ovládania je šmykom riadený podvozok, ktorý je špeciálnym prípadom diferenciálneho podvozku. Smer jazdy sa riadi rozdielom rýchlostí kolies na jednotlivých stranách vozidla. Ak majú rýchlosti rovnaký smer ale rozdielnu veľkosť, vozidlo zatáča. Ak majú rovnakú veľkosť, ale opačný smer, vozidlo sa otáča namiesto okolo zvislej osi. Príkladom použitia tohto typu podvozku sú malé nakladače. Špeciálnym prípadom použitia tohto konceptu sú pásové podvozky. Typickým príkladom je tank s pásovým podvozkom. Pásky zabezpečujú veľkú styčnú plochu s povrchom, čo garantuje stabilitu, ale pre otáčanie je potrebné značné množstvo energie. Hlavnou nevýhodou šmykom

riadeného podvozku je samotné šmykanie, keďže umiestnenie osi otáčania sa ťažko predvída a jej poloha a orientácia závisí od trenia povrchu, po ktorom sa jazdí. Z tohto dôvodu je lokalizácia takéhoto robota na základe odometrických výpočtov nepresná. Na druhej strane však poskytuje jednoduchú a zároveň robustnú konštrukciu, dobrú trakciu na nerovnom, nespevnenom a sypkom povrchu.

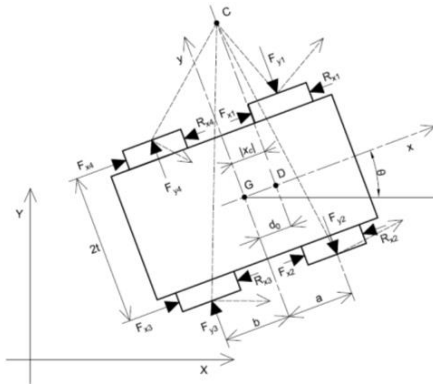
Pri šmykom riadenom podvozku je nutné zabezpečiť, aby všetky kolesá boli v zábere. Vhodným riešením je výkyvný podvozok, kde sa kolesá vykyvujú v rovnakej miere vzhľadom k osi vychýlenia, ktorá je rovnobežná s rovinou podvozku. Vďaka tomu je zaťaženie na jednotlivých kolesách rozdelené rovnomerne.

Presné riadenie takéhoto podvozku primárne nevychádza z kinematiky mechanizmu ale z jeho dynamického modelu, ktorý silne závisí od neurčitých faktorov a to hlavne trenia povrchu, po ktorom jazdí. Získanie spätnej väzby o polohe vozidla je taktiež problematická, keďže akcelerometrické snímače vykazujú drift, ktorý sa časovou integráciou zväčšuje.

Pokroky v oblasti robotiky a strojového videnia za posledné roky umožnili využitie kamerových systémov na lokalizáciu robota. Na základe informácií z kamery je možné identifikovať rýchlosť a polohu robota v prostredí, v ktorom sa pohybuje, a tieto informácie využiť v algoritmoch riadenia šmyku. Zároveň je možné využiť kamerový systém aj na mapovanie okolitého prostredia, čo je základným predpokladom pre autonómnou jazdu robotického vozidla.

II. KINEMATIKA A DYNAMIKA ROBOTICKÉHO VOZIDLA

Pre odvodenie dynamického modelu podľa [4] definujeme stojaci súradnicový systém $F(X,Y)$ a pohyblivý súradnicový systém $f(x,y)$ spojený s ťažiskom podvozku. Ťažisko sa nachádza vo vzdialenosti a od prednej osi kolies a vo vzdialenosti b od zadnej osi. Je umiestnené v pozdĺžnej osi podvozku vo vzdialenosti t k boku podvozku



Obr. 1 Kinematické a dynamické veličiny podvozku

Nech je x^c, y^c, θ^c pozdĺžna, priečna a uhlová rýchlosť podvozku v súradnom systéme $f(x,y)$, potom rýchlosti v absolútnom súradnicovom systéme sú nasledovné: [4].

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \cos(\theta) & -\dot{y} \sin(\theta) \\ \dot{x} \sin(\theta) & \dot{y} \cos(\theta) \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Deriváciou (1) podľa času získavame

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{x} - \dot{y}\dot{\theta} \\ \ddot{y} + \dot{x}\dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

kde a_x a a_y sú celkové zrýchlenia vyjadrené v súradnicovom systéme $f(x,y)$. V okamihu, keď sa vozidlo pohybuje iba otáčaním okolo bodu C, čiže aktuálneho streda otáčania, v ktorom sú komponenty lineárnej rýchlosti nulové, sú súradnice tohto bodu nasledovné:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{y} / \dot{\theta} \\ \dot{x} / \dot{\theta} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Pri priamočiarnom pohybe bude priečna a uhlová rýchlosť podvozku nulová a os otáčania sa blíži limitne k nekonečnu pozdĺž osi y. V prípade pohybu po krivke sa os otáčania posúva o hodnotu $|x_c|$. V prípade, že $y^c=0$, nenastal šmyk v priečnom smere a v prípade, že sa x_c dostane mimo rázvor kolies, vozidlo stráca stabilitu pohybu. Podľa vyššie uvedeného sú pozdĺžne a priečne (šmykové) rýchlosti jednotlivých kolies nasledovné:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_4 = \dot{x} - t\dot{\theta}, \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \dot{x} + t\dot{\theta}, \quad (5)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_2 = \dot{y} + a\dot{\theta}, \quad (6)$$

$$\dot{y}_3 = \dot{y}_4 = \dot{y} - a\dot{\theta}. \quad (7)$$

Sily pôsobiace na vozidlo, ktoré sa otáča okolo bodu C pri znázornených rýchlostiach, sú uvedené na Obr. 1. Pri zatáčaní má vozidlo kladnú pozdĺžnu a uhlovú rýchlosť a naopak zápornú priečnu rýchlosť. Kolesá vyvíjajú trakčné sily F_{xi} a pôsobia na nich odpory R_{yi} . Predpokladajme, že pohony kolies na každej strane vyvíjajú rovnakú silu, aby minimalizovali pozdĺžny šmyk. Priečne sily F_{yi} pôsobia na kolesá v dôsledku

priečného šmyku. Taktiež moment M_r okolo ťažiska je vyvolaný silami F_{yi} a R_{xi}

Pre vozidlo o hmotnosti m a zotrvačnosťou okolo ťažiska J sú pohybové rovnice v súradnicovom systéme $f(x,y)$ nasledovné:

$$ma_x = 2F_{x1} + 2F_{x2} - R_x, \quad (8)$$

$$ma_y = -F_y, \quad (9)$$

$$J\ddot{\theta} = 2t(F_{x1} - F_{x2}) - M_r. \quad (10)$$

Pre vyjadrenie pozdĺžnej odporovej sily R_x , priečnej sily F_y a odporového momentu M_r , treba zväziť rozdelenie gravitačného pôsobenia medzi jednotlivé kolesá a použiť Coulombovský model trenia pre kontakt kolies s povrchom. V tomto prípade platí:

$$F_{z3} = F_{z4} \frac{a}{a+b} \frac{mg}{2}, \quad (11)$$

$$F_{z3} = F_{z4} \frac{a}{a+b} \frac{mg}{2}. \quad (12)$$

Pri uvážení rovného pevného povrchu je styčná plocha medzi kolesom a povrchom v tvare obdĺžnika. V tom prípade je

$$R_{xi} = f_r F_{zi} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i), \quad (13)$$

Zavedením koeficientu priečného trenia μ bude pozdĺžna sila pôsobiaca na každé koleso

$$F_{yi} = \mu F_{zi} \operatorname{sgn}(\dot{y}_i). \quad (14)$$

Z toho vyplývajúca celková pozdĺžna sila

$$F_y = \sum_{i=1}^4 F_{yi} = \mu \frac{mg}{a+b} \left(b \operatorname{sgn}(\dot{y}_1) + a \operatorname{sgn}(\dot{y}_3) \right) \quad (15)$$

a odporový moment:

$$M_r = a(F_{y1} + F_{y2}) - b(F_{y1} + F_{y2}) + t[(R_{x2} + R_{x3}) - (R_{x1} + R_{x4})] \quad (16)$$

$$= \mu \frac{abmg}{a+b} \left(\operatorname{sgn}(\dot{y}_1) - \operatorname{sgn}(\dot{y}_2) \right) + f_r \frac{tmg}{2} \left(\operatorname{sgn}(\dot{x}_2) - \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \right) \quad (17)$$

Rovnice môžeme prepísať do štandardného tvaru v súradnicovom systéme $F(X, Y)$ využitím zovšeobecnených súradníc $q=(X, Y, \theta)$ a maticového zápisu:

$$\mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{c}(q, \dot{q}) = \mathbf{E}(q)\tau, \quad (18)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix}, \mathbf{c}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} R_x \cos \theta - F_y \sin \theta \\ R_x \sin \theta - F_y \cos \theta \\ M_r \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{E}(q) = \begin{bmatrix} \cos(\theta/r) & \cos(\theta/r) \\ \sin(\theta/r) & \sin(\theta/r) \\ t/r & -t/r \end{bmatrix}, \tau_i = 2rF_{xi}, (i=1,2), \quad (20)$$

kde r je polomer kola a τ_1 a τ_2 sú momenty motorov na ľavej a pravej strane podvozku . Z tohto dynamického modelu potom vychádza odvodenie spätnoväzobnej linearizácie riadenia.

III. RIADENIE TRAJEKTÓRIE

Metóda [4] vychádza z predpokladu, že vzdialenosť osi rotácie vozidla od osi x nemôže byť väčšia ako vzdialenosť nápravy a . Keď k tomu dôjde, vozidlo sa šmýka po osi y a stráca riaditeľnosť. Pre zabezpečenie korektného pohybu vozidla treba zabezpečiť, aby platilo:

$$\left| \begin{matrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{matrix} \right| < a \cdot \tag{21}$$

V tom prípade môžeme zaviesť operatívne obmedzenie:

$$\dot{y} + d_0 \dot{\theta} = 0, 0 < d_0 < a. \tag{22}$$

Metódou parciálnej statickej spätnoväzobnej linearizácie [9] získavame explicitné vyjadrenie riadiaceho pravidla (25), potrebného na kinematické riadenie podvozku pri zavedení novej vstupnej veličiny u (28), (29).

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \left(mu_1 + \frac{m}{d_0} \eta_2^2 + R_x \right) - \frac{rd_0}{2t} \left(\left(m + \frac{J}{d_0^2} \right) u_2 - \frac{m}{d_0} \eta_1 \eta_2 + F_y - \frac{M_r}{d_0} \right) \\ \frac{r}{2} \left(mu_1 + \frac{m}{d_0} \eta_2^2 + R_x \right) + \frac{rd_0}{2t} \left(\left(m + \frac{J}{d_0^2} \right) u_2 - \frac{m}{d_0} \eta_1 \eta_2 + F_y - \frac{M_r}{d_0} \right) \end{bmatrix} \tag{23}$$

Pre úplnú vstupno-výstupnú linearizáciu systému využijeme bod D , umiestnený na osi x vo vzdialenosti d_0 od referenčného súradnicového systému vozidla

$$z = \begin{bmatrix} X + d_0 \cos \theta \\ Y + d_0 \sin \theta \end{bmatrix}. \tag{24}$$

Volíme akčné veličiny u_1, u_2 a pomocný integrál, pomocou ktorého získame vzťahy pre dynamickú spätnoväzobnú linearizáciu:

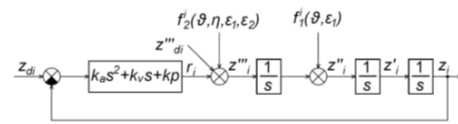
$$\dot{\xi} = \cos \theta_1 + \sin \theta_2 + \frac{1}{d_0^2} \eta_1 \eta_2^2, \tag{25}$$

$$u_2 = \frac{d_0}{\eta_1} (\sin \theta_1 - \cos \theta_2) - \frac{2}{\eta_1} \xi \eta_2, \tag{26}$$

kde $\eta_1 \eta_2$ sú pseudorýchlosti a r_1, r_2 je referencia ryvu trajektórie z''' v súradnom systéme $f(x, y)$. Regulátor navrhujeme ako polynóm:

$$r_i = \ddot{z}_{di} + k_{ai} (\ddot{z}_{di} - \ddot{z}_i) + k_{vi} (\dot{z}_{di} - \dot{z}_i) + k_{pi} (z_{di} - z_i), i = 1, 2 \tag{27}$$

kde z_{di} je hladká referenčná trajektória, z', z'' sú jej derivácie a z''' je predpisovaná veličina vo feedforward štruktúre. Výsledný blokový diagram odvodennej regulačnej štruktúry (30) je uvedený na **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**



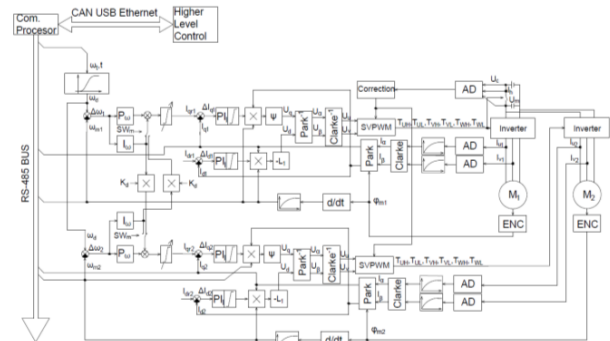
Obr. 2 Blokový diagram linearizovaného systému

Takáto koncepcia kompenzuje neželaný priečný šmyk posunutím okamžitej osi otáčania podvozku. Regulátor taktiež dokáže pracovať s neznámymi parametrami povrchu

IV. REGULAČNÁ ŠTRUKTÚRA POHONOV

Pre pohon robotického vozidla určeného pre experimenty slúžia elektrické pohony priamo zabudované v každom kolese – takzvané Hub motory. Principiálne sú to elektronicky komutované BLDC alebo SMPM motory, so statorom vo vnútornej časti kola a permanentnými magnetmi nalepenými na vonkajšiu rotujúcu časť. Pre reguláciu takýchto motorov boli vyvinuté meniče, ktoré sú priamo zabudovateľné do šasi podvozku a splňajú výkonové a regulačné kritériá na pohon šmykom riadeného podvozku.

Z výkonového hľadiska je potrebné zabezpečiť najmä dostatočnú výkonovú rezervu pri zatáčaní na mäkkom povrchu a povrchu s vysokým trecím odporom a tomu zodpovedajúce chladenie. Z regulačného hľadiska ide predovšetkým o rýchle kompenzovanie prechodových dejov a zabezpečenie vhodného prerozdelenia momentov na jednotlivé kolesá. Vyvinuté meniče umožňujú simultánnu reguláciu dvoch pohonov, v našom prípade predného a zadného kola jednej strany, ktoré sú riadené buď nezávisle alebo v master/slave štruktúre. Pri experimentoch sa najviac osvedčila kaskádna regulačná štruktúra s nadradeným rýchlostným regulátorom a podradeným prúdovým regulátorom, ktorá je upravená na master/slave štruktúru (Obr. 3). [12]



Obr. 3 Regulačná štruktúra dvojmotorového meniča v režime Master/Slave

Princíp činnosti je nasledovný: Master pohon má regulátor rýchlosti typu PI, ktorý plne kompenzuje regulačnú odchýlku rýchlosti. Jeho výstup je referenčným signálom pre podradený PI regulátor prúdu mastra (28). Regulátor rýchlosti slave pohonu je typu P a k jeho výstupu sa pripočítava integračná zložka regulátora rýchlosti mastra, korigovaná koeficientom rozdelenia zaťaženia medzi predné a zadné koleso K_d . Tento signál je referenciou prúdu slave pohonu. (29).

$$I_{qr1} = \left(K_{\omega_1} + \frac{K_{I\omega_1}}{s} \right) (\omega_{r1} - \omega_1), \quad (28)$$

$$I_{qr2} = K_d \left(\frac{K_{I\omega_1}}{s} (\omega_{r1} - \omega_1) \right) + K_{\omega_2} (\omega_{r1} - \omega_2). \quad (29)$$

To, ktorý z pohonov bude master, závisí od profilu terénu, v ktorom sa jazdí. Pri jazde po rovine a do kopca je mastrom predné koleso, pri jazde z kopca zadné. Voľba pohonu master a rozdelenie momentov medzi oba pohony zabezpečí riadiaca logika. Takáto štruktúra zabezpečí korektné rozdelenie momentov medzi motormi, bráni prešmykovaniu kolies a prevráteniu vozidla pri jazde do svahu alebo zo svahu. [12]

Meniče ľavej a pravej strany podvozku sú pripojené na komunikačnú zbernicu RS-485, cez ktorú komunikujú s komunikačným procesorom. Komunikačný procesor pripája meniče k nadradenému riadiacemu systému. Ľavá a pravá strana je nezávislá, t. j. nedochádza medzi nimi k výmene informácií cez komunikačnú zbernicu. Smer jazdy sa zadáva rozdielom medzi referenčnou rýchlosťou ľavej a pravej strany podvozku. Vzniknuté nepresnosti koriguje nadradený systém využitím mapovania okolia nasadenými kamerovými snímačmi pre lokalizovanie robota v priestore.

V. VIZUÁLNA ODOMETRIA

Lokalizácia pomocou kamerového systému, nazývaná aj ako vizuálna odometria, vyhodnocuje pohyb robota na základe vizuálneho vstupu z kamier. Idea bola prvýkrát predstavená v roku 2004 [22], kde boli prezentované jej úspešné výsledky na rôznych cestných a terénnych robotických vozidlách s použitím samostatnej alebo stereoskopickkej kamery. Základná myšlienka vizuálnej odometrie spočíva vo vyhodnotení zmeny polôh význačných bodov v obraze medzi dvoma po sebe nasledujúcimi snímkami z kamery. Rôzne prístupy k riešeniu problematiky sa líšia hlavne v použitom kamerovom systéme.

Vizuálna odometria je proces inkrementálneho odhadovania pozície robotického vozidla pomocou skúmania zmien, ktoré tento pohyb vyvoláva na obrazoch kamier umiestnených na vozidle. Takýmto spôsobom môžeme odhadnúť jeho pohyb za predpokladu dostatočného osvetlenia okolia, ktoré je dostatočne obsiahnuté textúrami, ktoré sa využijú ako význačné body. Ďalej je potrebné, aby statické prostredie okolo robota dominovalo nad pohybujúcimi sa objektmi a dva po sebe nasledujúce snímky boli zosnímané v dosť krátkom čase na to, aby vedeli zachytiť pohyb medzi význačnými bodmi.

V prvom kroku kamera zachytí snímok a následne sa hľadá určitý počet význačných bodov, ktoré zabezpečia, že ak bude bod viditeľný, bude aj jednoznačne identifikovateľný v ďalšej iterácii (Harrisov detektor rohov [23], SURF [24], SIFT [25], FAST [26]). V ďalšej vzorke obrazu z kamery sa opäť hľadajú význačné body a hľadajú sa korešpondujúce vzorky z predchádzajúcej snímky. Vektor medzi dvoma korešpondujúcimi vzorkami nesie informáciu o zmene polohy a orientácie robota medzi dvoma po sebe idúcimi snímkami [19]. V takom prípade dve po sebe idúce polohy kamery v časových okamihoch $k, k-1$ môžeme vyjadriť transformačnou

maticou $\mathbf{T}_{k,k-1}$ vo formáte známom z robotických manipulátorov:

$$\mathbf{T}_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{k,k-1} & \mathbf{t}_{k,k-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

kde $\mathbf{R}_{k,k-1}$ je rotačná matica a $\mathbf{t}_{k,k-1}$ je polohový vektor. Takto pomocou n -transformácií $\{\mathbf{T}_{1,0}, \dots, \mathbf{T}_{n,n-1}\}$ dostaneme n polôh kamier $\{\mathbf{C}_0, \dots, \mathbf{C}_n\}$ vo vzťahu k počiatočnej polohe kamery podľa vzťahu:

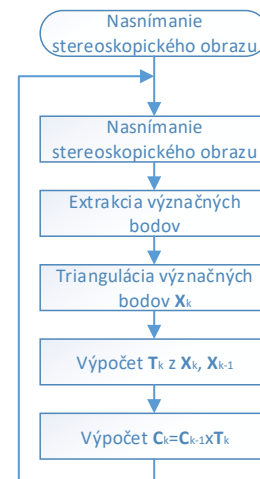
$$\mathbf{C}_n = \mathbf{C}_{n-1} \mathbf{T}_n. \quad (31)$$

Vizuálna odometria, na rozdiel od odometrie kolies, nie je ovplyvnená prešmykovaním kolesa, nerovnomerným terénom a inými nepriaznivými podmienkami. Z toho dôvodu bola vizuálna odometria využitá ako informácia o aktuálnej polohe a rýchlosti robotického vozidla pre riadiace algoritmy.

Pre vizuálnu odometriu s využitím stereoskopického kamerového systému nám pre určenie polohy stačia tri kľúčové body. Riešenie úlohy spočíva v hľadaní takej \mathbf{T}_k , ktorá minimalizuje vzdialenosť medzi dvoma množinami kľúčových bodov.

$$\mathbf{T}_k = \arg \min \sum_i \|\tilde{\mathbf{X}}_k^i - \mathbf{T}_k \tilde{\mathbf{X}}_{k-1}^i\|, \quad (32)$$

kde i označuje i -tý význačný bod a \mathbf{X} je vektor súradníc polohy i -tého význačného bodu v časových okamihoch k resp. $k-1$. Na základe toho vytvoríme algoritmus výpočtu vizuálnej odometrie (Obr. 4)

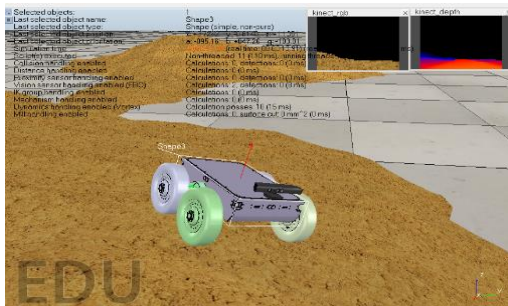


Obr. 4 Algoritmus 3D vizuálnej odometrie

VI. SIMULAČNÝ MODEL MOBILNÉHO ROBOTICKÉHO VOZIDLA

Presné riadenie pohybu vyvinutého robotického podvozka je problematické vzhľadom ku konštrukcii. Z toho dôvodu bol pri vývoji algoritmov riadenia trajektórie robota kladený dôraz na riadenie uhlovej rýchlosti zatáčania na základe signálov z externých snímačov. Išlo hlavne o gyroskopické snímanie uhlovej rýchlosti, na základe čoho bola vyhodnotená miera rotácie okolo vlastnej osi. Pre kompenzáciu gyroskopu bol využítý akcelerometrický snímač, ktorý fungoval aj v režime

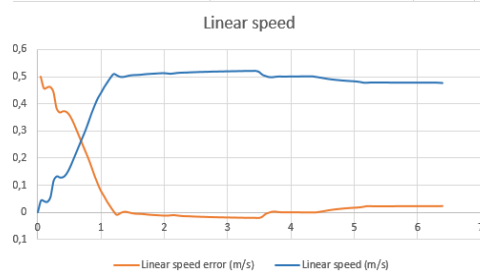
inclinometra a na základe tohto signálu bol určovaný náklon robotického vozidla v teréne. Na získanie lineárnej rýchlosti bol využitý stereoskopický kamerový systém, kde na základe metódy stereoskopickej vizuálnej odometrie s využitím ICP podľa [44] bola získavaná informácia o lineárnej rýchlosti a polohe robotického vozidla v priestore. Simulácia algoritmov bola vykonaná v simulačnom prostredí V-REP (Obr. 5), pre rôzne terénne a adhézne podmienky. V-REP je pokročilý simulačný softvér s trojrozmernou grafickou vizualizáciou na simuláciu robotických aplikácií. Má funkcionality z rôznych odvetví robotiky ako je kinematika, riadenie, spracovanie signálov snímačov a poskytuje aj presný simulátor dynamiky Vortex dynamics.



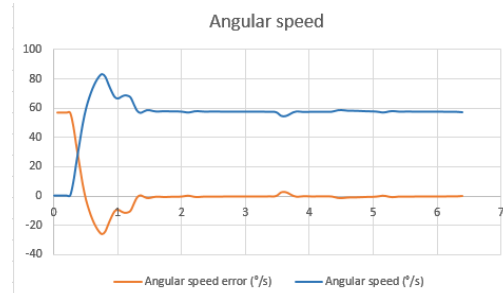
Obr. 5 Simulačný model robota v prostredí V-REP

A. Simulácia šmyku

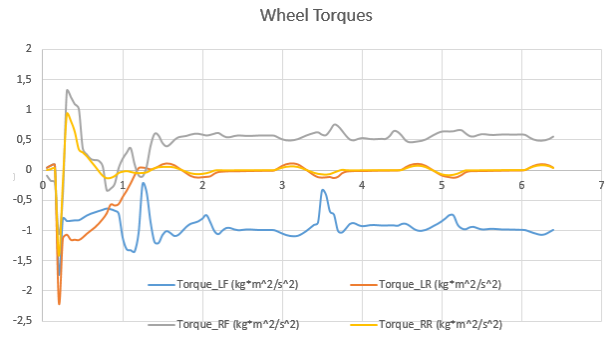
Simulácia šmyku využíva identický riadiaci algoritmus ako fyzikálny model robotického vozidla, vďaka prepojitelnosti simulátora V-REP a robotického operačného systému. Simulácie boli vytvorené pre rôzne podmienky kontaktu kolies vozidla so simulovaným povrchom. Simulovaný robot bol testovaný v nepriaznivých podmienkach okolitého prostredia t. j. pri náklone a na sypkom povrchu (Obr. 5). Simulácie boli vytvorené pre kruhovú trajektóriu s konštantnou lineárnou rýchlosťou (0,5 m/s) a konštantnou uhlovou rýchlosťou ($1 \text{ rad/s} = 57,3 \text{ }^\circ/\text{s}$). Regulačné odchýlky lineárnej a uhlovej rýchlosti a takisto momenty na kolieskach pre rôznych trecích podmienkach v kontakte kolies s povrchom sú zobrazené na Obr. 6 – Obr. 11.



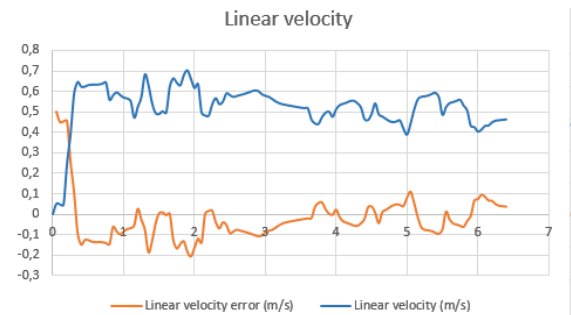
Obr. 6 Lineárna rýchlosť na povrchu s nízkym trením



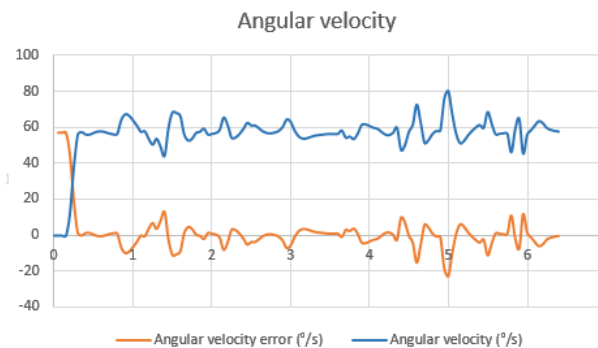
Obr. 7 Uhlová rýchlosť na povrchu s nízkym trením



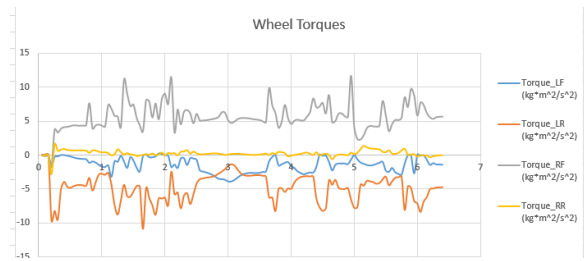
Obr. 8 Momenty motorov na povrchu s nízkym trením



Obr. 9 Lineárna rýchlosť na povrchu s vysokým trením



Obr. 10 Uhlová rýchlosť na povrchu s vysokým trením

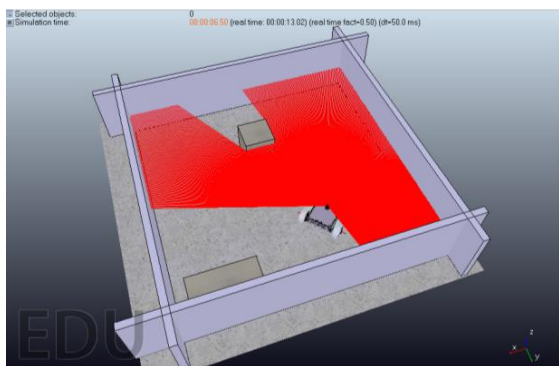


Obr. 11 Momenty motorov na povrchu s vysokým trením

Z grafov môžeme sledovať, že na povrchu s nízkym trením je regulačná odchýlka do 5% v ustálenom stave pri lineárnej aj uhlovej rýchlosti. V ustálenom stave zároveň pozorujeme, že sú v zábere (vytvárajú dominantný moment) hlavne predné ľavé a predné pravé koleso. Pri rovnakom pohybe na povrchu s vysokým trením môžeme pozorovať zvýšenie regulačnej odchýlky do 15% v ustálenom stave. Z momentov kolies môžeme pozorovať, že sú v zábere hlavne predné ľavé a zadné pravé koleso. K zvýšenej regulačnej odchýlke môže dochádzať z dôvodu, že motory pracujú aj v oblasti momentového obmedzenia a dochádza aj k zvýšenému vzájomnému ovplyvňovaniu jednotlivých kolies.

B. Simulácia lokalizácie a mapovania

Pre zostavenie algoritmov simultánnej lokalizácie a mapovania (ďalej len SLAM), boli využité softvérové prostriedky robotického operačného systému (ROS). Simulačné prostredie bolo vytvorené v simulačnom softvéri V-REP, kde bolo namodelované robotické vozidlo, laserový snímač a prekážky, ktoré bolo potrebné identifikovať. (Obr. 12)

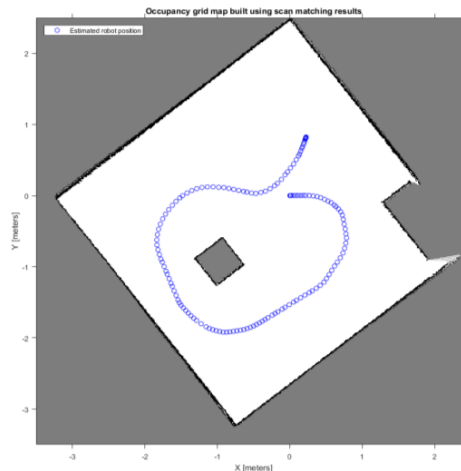


Obr. 12 Simulačný model SLAMu v prostredí V-REP

Laserové dáta boli spracované algoritmom Open SLAM. Algoritmus kombinuje systém 2D SLAMU založený na integrácii laserových skenov z LIDARu do rovinnnej mapy a systému založeného na inerciálnych snímačoch, ktoré sa zlučujú do jednotnej informácie [57]. Na základe nameraných vzdialeností algoritmus vyhľadáva kľúčové body, ktoré slúžia ako referenčné a spája namerané body tak, aby vytvárali súvislé priamky, a tým odfiltrovali chyby v meraní.

Na základe spracovaných bodov laserového snímača vo fúzii s inerciálnymi snímačmi v simulačnom modeli je možné vytvoriť rovinnú 2D mapu prostredia. Táto mapa reprezentuje prostredie s obrysami prekážok, v ktorom sa robot pohybuje.

Robot v tomto prostredí vytvára určitú trajektóriu. Túto trajektóriu je možné extrahovať vzhľadom k zmene vzdialenosti robota ku kľúčovým bodom objektov, ktoré boli v prostredí identifikované. Tento proces sa nazýva 2D vizuálna odometria a bola implementovaná podľa [59]. Na Obr. 13 je znázornená výsledná rovinná mapa prostredia, v ktorom sa robot v simulačnom modeli z Obr. 12 pohybuje, zároveň s vyznačenou trajektóriou (modrou farbou).



Obr. 13 Výstup z algoritmu 2D SLAMu

VII. FYZIKÁLNY MODEL MOBILNÉHO ROBOTICKÉHO VOZIDLA

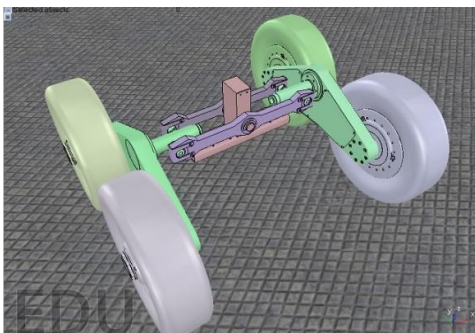
Pre overenie navrhnutých algoritmov bol vytvorený fyzikálny model mobilného robotického vozidla (Obr. 14). Na základné overenie funkčnosti a ručné riadenie bolo vytvorené operátorské rozhranie pre fyzikálny model v prostredí ROS, ktoré umožňuje operátorovi riadiť robot v semi-autonómnom režime

Fyzikálny model robota je zhodný so simulačným modelom a je kompatibilný s ROS V-REP MoveIt a Gazebo. Tým umožňuje rýchlu simuláciu kinematiky a dynamiky robota vzhľadom na povel od operátora a prípadne zastavenie pohybu v prípade nebezpečného manévru (prevrátenie robota, náraz do prekážky a pod.). Ako základný riadiaci hardvér bol využitý minipočítač Raspberry Pi, ktorý tvorí komunikačný most medzi regulačným systémom motorov, niektorými snímačmi (IMU, gyroskop) a nadradeným riadiacim systémom s robotickým operačným systémom.



Obr. 14 Fyzikálny model robotického vozidla

Na pohon podvozku boli využité elektrické pohony, ktoré sú vďaka vhodne upraveným frekvenčným meničom schopné rekuperácie brzdného energie. Pre zabezpečenie neustáleho kontaktu všetkých štyroch kolies s nerovným terénom bolo výhodné použiť výkyvný systém podvozku. Výkyvný systém využíva ramená s rozdielnou dĺžkou, ktoré sú otočne uložené okolo spoločnej osi otáčania.



Obr. 15 Výkyvný systém podvozku

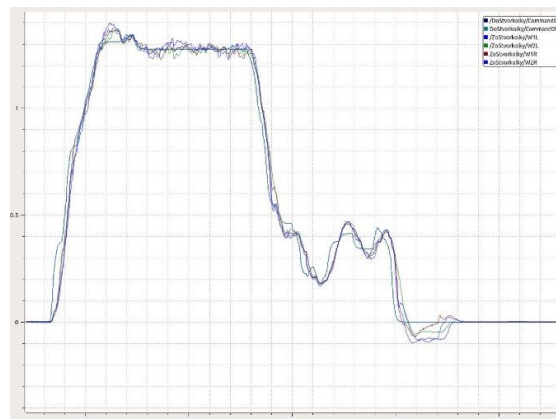
Ako motory boli použité synchronné motory s permanentnými magnetmi, ktoré boli spolu s planétovou prevodovkou priamou súčasťou jednotlivých kolies. Pre riadenie pohonov šmykom riadeného podvozku boli vyvinuté dvojosové meniče frekvencie, zabudovateľné priamo do karosérie robotického vozidla, čím sa zlepšil odvod tepla a odpadla nutnosť použitia dodatočného chladenia. Meniče sú navrhnuté na nominálne napätie 60V a nominálny prúd 10A pre každú os. Pre jednu stranu robotického vozidla je použitý jeden takýto menič. Na zabezpečenie mobility bol využitý batériový paket LiFePo4. Na zabezpečenie optimálneho toku energie medzi jednotlivými článkami batérie bolo potrebné v rámci dizertačnej práce vyvinúť batériový manažment, ktorý vyrovnáva napätie na jednotlivých článkoch

Riadiace algoritmy boli implementované na mikroprocesore radu ARM Cortex-M4. Regulačný algoritmus má konfigurovateľnú štruktúru a parametre. Je možné zvoliť rýchlostnú reguláciu, prúdovú reguláciu, generovanie PWM výstupu a štruktúru master/slave, ktorá je preferovaná pre šmykom riadené vozidlo. Regulačné štruktúry boli implementované tak pre blokovú komutáciu, ako aj pre režim vektorového riadenia. V režime master/slave je motor master v rýchlostnej väzbe s PI regulátorom rýchlosti. Motor slave je v rýchlostnej väzbe s P regulátorom rýchlosti a má zdieľanú referenčnú hodnotu s motorom master. Motor master zdieľa integračnú zložku regulátora rýchlosti s motorom slave v nastaviteľnom pomere.

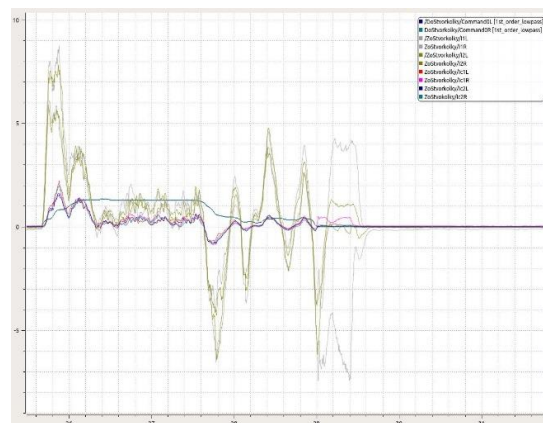
Doba cyklu pre regulačnú slučku prúdu je 50 μ s a pre regulačnú slučku rýchlosti 200 μ s. Do riadenia boli implementované aj bezpečnostné funkcie. Riadiaci obvod vypína výkonové obvody zatlačením centrálného núdzového vypínača. V prípade straty spojenia s nadradeným riadiacim systémom sú pohony okamžite brzdené až do úplného zastavenia.

A. Riadenie šmyku

Pre implementáciu algoritmov simultánnej lokalizácie a mapovania bolo potrebné v prvom rade odľadiť regulačné štruktúry pohonov na fyzikálnom modeli robotického vozidla. Merania boli vykonané na sledovanie regulačnej odchýlky pre rôzne typy kontaktu kolies s povrchom. Ďalej boli zaznamenané aj momentotvorné prúdy motorov I_q , ktoré proporcionálne vyjadrujú momenty na jednotlivých kolesách. Boli zaznamenané aj celkové prúdy motorov, ktoré určujú aktuálny odoberaný prípadne rekuperovaný príkon pri konštantnom napájacom napätí 30V. Na Obr. 16 Je zobrazený časový priebeh referenčnej rýchlosti (modrá farba) a skutočnej rýchlosti. Na Obr. 17 sú zobrazené referenčné momentotvorné prúdy pravej strany podvozku (žltá farba) a ľavej strany podvozku (sivá farba) ako aj celkový prúd motorov (ružová farba) pri sledovaní predpísanej referenčnej trajektórie (modrá farba).



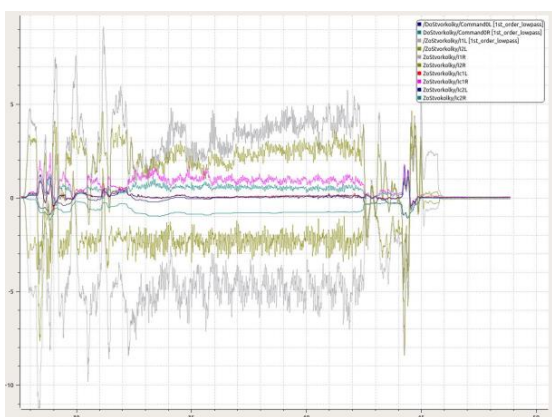
Obr. 16 Graf priebehu rýchlostí



Obr. 17 Graf priebehu prúdov

Z grafov vyplýva že pohony sledujú referenčnú riadiacu trajektóriu. Na rozdiel od simulačných výsledkov sa nám nevytvorili také podmienky trenia, kedy by pohony pracovali na momentovom obmedzení, keďže boli pre danú aplikáciu momentovo značne predimenzované. Pri rozbehu a pri brzdení vznikajú zákmitý momentotvorného prúdu, ktoré sú spôsobené zásahom riadenia do želanej rýchlosti, ktoré sa snaží zabrániť

prevráteniu robotického vozidla pri prudkom rozbehu a brzdení. Pri zatáčaní sú v zábere najmä ľavé a pravé predné kolesá v smere jazdy. Ďalej z meraní vyplýva, že otáčavý pohyb na mieste nie je energeticky efektívny, keďže pravá aj ľavá strana pri šmyku vytvára hnací moment. Každý motor má pri takomto zatáčaní odber v ustálenom stave cca. 1A. Pre zlepšenie účinnosti je vhodné pri zatáčaní robotického vozidla využiť excentrickú rotáciu, kde sa stred otáčania posunie mimo uhlopriečku náprav, čo dosiahneme nenulovou lineárnou rýchlosťou pri zatáčaní. Pri takomto zatáčaní majú motory v ustálenom stave odber: pravý predný cca 1A, pravý zadný cca 0,75A, ľavý predný a ľavý zadný motor sú vo vnútornej stope otáčania a majú zanedbateľný odber. Takýto stav bol simulovaný a bol navodený aj na fyzikálnom modeli s nameranými časovými priebehmi na Obr. 18. Pri takomto zatáčaní kolesá vo vonkajšej stope vyvíjajú väčší moment ako kolesá vo vnútornej stope, ktoré vytvárajú menší moment, v istých prípadoch aj záporný, pričom dochádza k rekuperácii brzdnjej energie

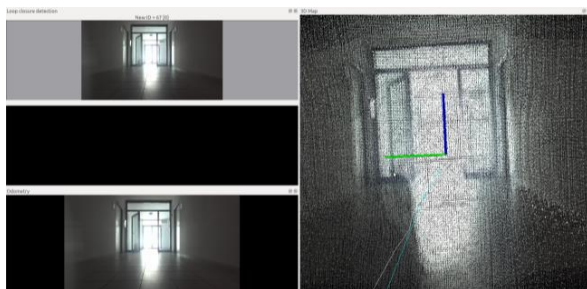


Obr. 18 Graf priebehu prúdov pri excentrickej rotácii

B. Simulácia lokalizácie a mapovanie

Na online budovanie RGB-D mapy sme využili softvérové moduly ROS-u a to konkrétne modul RTAB-map (Real time appearance based mapping), ktorý dokáže pomocou kompresie a redukcie kvality budovanie mapy v reálnom čase.

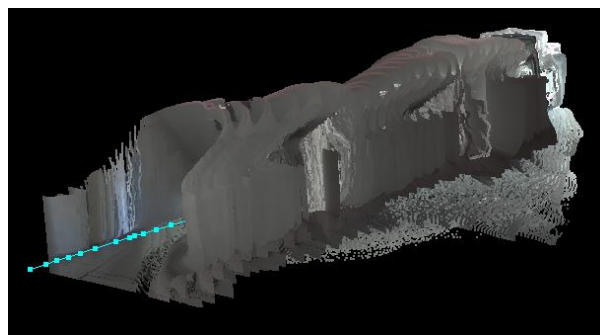
Na Obr. 19 je zobrazený proces tvorby RGB-D mapy s lokalizáciou robota v rámci mapy vo vnútornom prostredí.



Obr. 19 RGB-D SLAM vo vnútornom prostredí

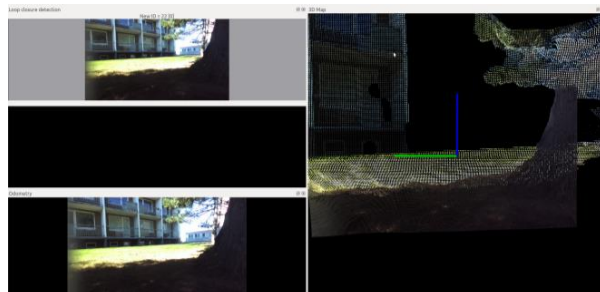
Výsledná RGB-D mapa je znázornená na Obr. 20. Robotické vozidlo sa pohybovalo po priamkovej dráhe po

chodbe (znázornená modrou farbou). Vytvorená RGB-D mapa nasnímanej chodby je oproti bodom na Obr. 19 pootočená na pohľad z boku, kde môžeme vidieť skreslenie pri tvorbe mapy, keďže chodba, po ktorej sa robot pohyboval bola tvorená rovnými plochami a hranami a výsledná mapa je zakrivená. Skreslenie mohlo byť spôsobené nedostatočným počtom význačných bodov.

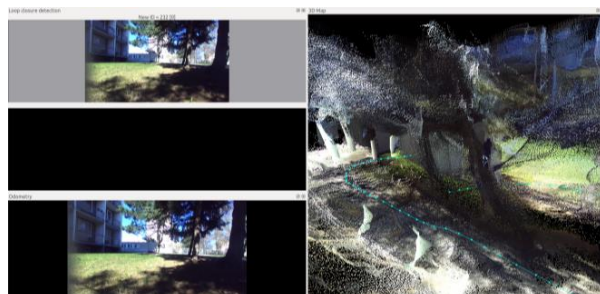


Obr. 20 Vytvorená RGB-D mapa s vyznačenou dráhou pohybu robota

Nasadenie stereoskopického kamerového systému vo vonkajšom prostredí vykazuje lepšie výsledky, nakoľko je takéto prostredie viac štruktúrované a obsahuje viac význačných bodov. Tvorba RGB-D mapy vo vonkajšom prostredí je znázornená na Obr. 21 a Obr. 22 s vyznačenou trajektóriou robota



Obr. 21 RGB-D SLAM vo vonkajšom prostredí



Obr. 22 Vytvorená RGB-D mapa s vyznačenou dráhou pohybu robota

Vytvorenú RGB-D mapu je možné v robotickom operačnom systéme ďalej spracovať. Na Obr. 23 je v prostredí ROS-u znázornená aktuálna hĺbka skenu spolu s vypočítanou vizuálnou odometriou. Nasnímaná RGB-D mapa je využitá pri detekcii prekážok po rozdelení na body nachádzajúce sa na úrovni terénu a nad úrovňou terénu, čo reprezentuje prekážky



Obr. 23 Zdetegovavé body – prekážky a terén

VIII. ZÁVER

Pre využitie robotického vozidla ako experimentálnej platformy na autonómnu jazdu bolo v prvom rade potrebné navrhnúť metódu riadenia pohonov, ktorá na základe lokalizácie zabezpečí presné sledovanie predpísanej trajektórie. Na riadenie takéhoto podvozku sa v minulosti využívali inerciálne snímače, ktoré integráciou v čase akumulujú nameranú chybu snímača. V tejto práci bolo na riadenie šmyku využité v kombinácii s inerciálnymi snímačmi aj kamerové systémy, ktoré s prispôbenými algoritmi vizuálnej odometrie a riadenia preukázateľne vykazujú dobré regulačné vlastnosti. Naintegrovaný drift snímačov sa eliminuje väzbou na kľúčové body prostredia snímané kamerami, ktoré sú statické. Na základe nameraných údajov sa taktiež podarilo preukázať, že využitie elektrického pohonu pri vozidlách so šmykom riadeným podvozkom môže byť energeticky efektívne.

Úloha lokalizácie a mapovania bola realizovaná spracovaním údajov najmä vizuálnych snímačov stereoskopickú kamery. Na základe spracovaných dát a algoritmov simultánnej lokalizácie a mapovania (SLAM) bolo robotické vozidlo schopné vytvoriť mapu svojho okolia. Ako algoritmy SLAMu sme využili softvérové knižnice robotického operačného systému, ktoré boli upravené na našu aplikáciu. Tým sme zistili že použité algoritmy fungujú použiteľne len v podmienkach s dostatočným počtom statických kľúčových bodov a veľkú úlohu hrajú rušivé podmienky ako sú cudzie pohybujúce sa objekty, vibrácie samotného vozidla, nepresnosť snímačov a podobne.

V budúcnosti sa práce na robotickom vozidle budú uberať smerom zvýšenia kvality SLAMu ako aj o doplnenie o algoritmy, ktoré zabezpečia autonómnu prevádzku v neznámom prostredí.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0750.

REFERENCIE

- [1] SIEGWART, Roland; NOURBAKSH, Illah Reza; SCARAMUZZA, Davide. *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press, 2011.
- [2] RAIBERT, Marc, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. In: *Proceedings of the 17th World Congress*. Proceedings Seoul, Korea, 2008. p. 10822-10825.
- [3] SANDIN, Paul E. *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated*. New York, NY: McGraw-Hill, 2003.
- [4] CARACCILO, Luca; DE LUCA, Alessandro; IANNITTI, Stefano. Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot. In: *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*. IEEE, 1999. p. 2632-2638.
- [5] LHOMME-DESAGES, D.; CH. GRAND; GUINOT, J. C. Trajectory Control of a Four-Wheel Skid-Steering Vehicle over Soft Terrain using a Physical Interaction Model. In: *ICRA*. 2007. p. 1164-1169.
- [6] KOZŁOWSKI, Krzysztof; PAZDERSKI, Dariusz. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 2004, 14.4: 477-496.
- [7] MAALOUF, Elie; SAAD, Maarouf; SALIAH, Hamadou. A higher level path tracking controller for a four-wheel differentially steered mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54.1: 23-33.
- [8] MANDOW, Anthony, et al. Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2007. p. 1222-1227.
- [9] ISIDORI, Alberto. *Nonlinear control systems*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] SICILIANO, Bruno, et al. *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [11] Fetyko, J., Jezný, J., Üveges, R., & Fedak, V. (2014). Development of Motion Control of Legs in Six-Legged Robotic Vehicle. *Applied Mechanics & Materials*, (613).
- [12] ZBORAY, Ladislav; ĎUROVSKÝ, František; TOMKO, Jaroslav. *Regulované pohony*. Viena, 2000.
- [13] MERRIT, Herbert E. *Hydraulic Control Systems*. John Wiley and Sons. Inc. New York, 1967.
- [14] V. Fedak, R. Uveges, J. Fetyko, J. Jezný, Control Strategy Principles of Leg Motion Control in a Six-Legged Robotic Vehicle, in: 28th microCAD Int. Sci. Conf., University of Miskolc, 10-11 April 2014.
- [15] SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama (ed.). *Springer handbook of robotics*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [16] HAMMOND, J. H. Book-Review-the Camera Obscura-a Chronicle. *Journal for the History of Astronomy*, 1982, 13: 143.
- [17] <http://vision.middlebury.edu/> -Dostupné na internete k 8.1.2019
- [18] OLSON, Edwin. A primer on odometry and motor control. 2004.
- [19] BERNIS, Karsten; PUTTKAMER, Ewald. *Autonomous land vehicles*. Vieweg+ Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [20] CHEN, Patrick C.; PAVLIDIS, Theodosios. Segmentation by texture using a co-occurrence matrix and a split-and-merge algorithm. *Computer graphics and image processing*, 1979, 10.2: 172-182.
- [21] FISCHLER, Martin A.; BOLLES, Robert C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 1981, 24.6: 381-395.
- [22] NISTÉR, David; NARODITSKY, Oleg; BERGEN, James. Visual odometry. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on*. IEEE, 2004. p. I-652-I-659 Vol. 1.
- [23] HARRIS, Chris; STEPHENS, Mike. A combined corner and edge detector. In: *Alvey vision conference*. 1988. p. 50.
- [24] BAY, Herbert, et al. Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*, 2008, 110.3: 346-359.
- [25] LOWE, David G. Object recognition from local scale-invariant features. In: *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*. IEEE, 1999. p. 1150-1157.
- [26] ROSTEN, Edward; DRUMMOND, Tom. Machine learning for high-speed corner detection. In: *European conference on computer vision*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 430-443.
- [27] LAWSON, Charles L.; HANSON, Richard J. *Solving least squares problems*. Philadelphia: Siam, 1995.
- [28] HARTLEY, Richard; ZISSERMAN, Andrew. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [29] LABBÉ, Mathieu; MICHAUD, François. Online global loop closure detection for large-scale multi-session graph-based slam. In: *2014*

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2014. p. 2661-2666.
- [30] DAVISON, Andrew J. Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera. In: *Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on*. IEEE, 2003. p. 1403-1410.
- [31] DISSANAYAKE, MWM Gamini, et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 2001, 17.3: 229-241.
- [32] <https://digital.deutsches-museum.de/virtuell/> -Dostupné na internete k 8.1.2019
- [33] BESL, Paul J.; MCKAY, Neil D. Method for registration of 3-D shapes. In: *Robotics-DL tentative*. International Society for Optics and Photonics, 1992. p. 586-606.
- [34] DURRANT-WHYTE, Hugh; BAILEY, Tim. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE robotics & automation magazine*, 2006, 13.2: 99-110.
- [35] THRUN, Sebastian; LEONARD, John J. Simultaneous localization and mapping. In: *Springer handbook of robotics*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 871-889.
- [36] ANUPAMA, J., et al. Design and Development of Autonomous Ground Vehicle for Wild Life Monitoring. In: *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 2, Issue 5, May 2014
- [37] SCARAMUZZA, Davide, et al. Key technologies for intelligent and safer cars-From motion estimation to predictive collision avoidance. In: *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2010. p. 2803-2808.
- [38] SCARAMUZZA, Davide; MARTINELLI, Agostino; SIEGWART, Roland. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion. In: *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06)*. IEEE, 2006. p. 45-45.
- [39] LAFFERTY, John; MCCALLUM, Andrew; PEREIRA, Fernando. Conditional random fields: Probabilistic models for segmenting and labeling sequence data. In: *Proceedings of the eighteenth international conference on machine learning, ICML*. 2001. p. 282-289.
- [40] LEIBE, Bastian; SEEMANN, Edgar; SCHIELE, Bernt. Pedestrian detection in crowded scenes. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. IEEE, 2005. p. 878-885.
- [41] MAYBECK, Peter S. The Kalman filter: An introduction to concepts. In: *Autonomous robot vehicles*. Springer New York, 1990. p. 194-204.
- [42] RUFLI, Martin; SIEGWART, Roland. On the application of the d* search algorithm to time-based planning on lattice graphs. *ECMR*, 2009, 9: 105-110.
- [43] SCARAMUZZA, Davide; FRAUNDORFER, Friedrich; SIEGWART, Roland. Real-time monocular visual odometry for on-road vehicles with 1-point ransac. In: *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009. p. 4293-4299.
- [44] JIANG, Yanhua, et al. Icp stereo visual odometry for wheeled vehicles based on a 1dof motion prior. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014. p. 585-592.
- [45] TOMASI, Carlo; KANADE, Takeo. Detection and tracking of point features. Pittsburgh: *School of Computer Science, Carnegie Mellon Univ.*, 1991.
- [46] ROHDE, Mitchell M., et al. PointCom: semi-autonomous UGV control with intuitive interface. In: *SPIE Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics*, 2008. p. 69620G-69620G-10.
- [47] CIVERA, Javier; DAVISON, Andrew J.; MONTIEL, JM Martinez. Inverse depth parametrization for monocular SLAM. *IEEE transactions on robotics*, 2008, 24.5: 932-945.
- [48] LABBE, Mathieu; MICHAUD, Francois. Appearance-based loop closure detection for online large-scale and long-term operation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29.3: 734-745.
- [49] <http://introlab.github.io/rtabmap/> -Dostupné na internete k 8.1.2019
- [50] LEONARD, John, et al. A perception-driven autonomous urban vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25.10: 727-774.
- [51] BUEHLER, Martin; IAGNEMMA, Karl; SINGH, Sanjiv (ed.). *The DARPA urban challenge: autonomous vehicles in city traffic*. springer, 2009.
- [52] LAVALLE, Steven M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. 1998.
- [53] QUIGLEY, Morgan, et al. ROS: an open-source Robot Operating System. In: *ICRA workshop on open source software*. 2009. p. 5.
- [54] www.ros.org -Dostupné na internete k 8.1.2019
- [55] Grisetti, G., Stachniss, C., & Burgard, W. (2005, April). Improving grid-based slam with rao-blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2432-2437). IEEE.
- [56] Grisetti, G., Stachniss, C., & Burgard, W. (2007). Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. *IEEE transactions on Robotics*, 23(1), 34.
- [57] Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), 108-117.
- [58] Kohlbrecher, S., Von Stryk, O., Meyer, J., & Klingauf, U. (2011, November). A flexible and scalable slam system with full 3d motion estimation. In *2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics* (pp. 155-160). IEEE.
- [59] Jaimez, M., Monroy, J. G., & Gonzalez-Jimenez, J. (2016, May). Planar odometry from a radial laser scanner. A range flow-based approach. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4479-4485). IEEE.
- [60] Zeng, W.; Church, R. L. (2009). "Finding shortest paths on real road networks: the case for A*". *International Journal of Geographical Information Science*. 23 (4): 531-543
- [61] Fox, D., Burgard, W., & Thrun, S. (1997). The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1), 23-33.

Hybridné modely kyber-fyzikálnych systémov a ich aplikácia v rámci distribuovaného systému riadenia

Ing. Dominik Vošček

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Technická univerzita, Košice

dominik.voscek@tuke.sk

doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Technická univerzita, Košice

anna.jadlovaska@tuke.sk

Abstrakt—Tento článok prezentuje prehľad dosiahnutých výsledkov počas trvania doktorandského štúdia, ktoré sú komplexne spracované v rámci dizertačnej práce *Hybridné modely kyber-fyzikálnych systémov a ich aplikácia v rámci distribuovaného systému riadenia*. Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky pre pre modelovanie, analýzu a riadenie hybridných systémov v kontexte kyber-fyzikálnych systémov s ich následnou implementáciou do distribuovaného systému riadenia, ktorá pozostáva z vybraných metód a algoritmov riadenia. Navrhnutá metodika je v rámci dizertačnej práce overená s využitím simulačných a reálnych modelových aplikácií tvoriacich experimentálne pracovisko, ktoré je súčasťou Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky na KKUI FEI TU v Košiciach ako aj experimentu ALICE CERN. Metodika a overenie jej návrhu je spracované v dizertačnej práci v štyroch scenároch a dvoch výskumných úlohach experimentu ALICE CERN. Softvérový výstup dizertačnej práce je implementovaný v prostredí *MATLAB/Simulink*, v jazyku C++ a v nástroji WinCC OA.

Kľúčové slová—modelovanie, experimentálna identifikácia, hybridný systém, optimálne riadenie, optimalizácia krdľa častíc, explicitné prediktívne riadenie, supervízne riadenie, distribuovaný systém riadenia, detector control system

Abstrakt—This article presents an overview of the results achieved during the doctoral studies, which is comprehensively elaborated within the thesis *Hybrid models of cyber-physical systems and their application within distributed control system*. The main aim of the thesis is to design a methodology for modeling, analysis and control design of hybrid systems in the context of cyber-physical systems with their subsequent implementation into the distributed control system that consists of selected control methods and algorithms. The proposed methodology is validated within the thesis using simulation and laboratory model applications forming an experimental workplace, which is a part of the Center of Modern Control Techniques and Industrial Informatics at KKUI, FEI, TU in Košice as well as at ALICE CERN experiment. The methodology and its verification is elaborated in the thesis within four case studies and two research tasks at the ALICE CERN experiment. The software output of the thesis is implemented in the simulation environment *MATLAB/Simulink*, in C++ language and in WinCC OA application.

Index Terms—modeling, experimental identification, hybrid system, optimal control, particle swarm optimization, explicit model predictive control, supervisory control, distributed control system, detector control system

I. ÚVOD

Kyber-fyzikálne systémy (CPS) je možné definovať ako integrálnu súčasť fenoménu Industry 4.0 pričom spájajú fy-

zické a výpočtové procesy systému a postupne si zabezpečujú vedúce postavenie v oblasti integrovaných systémov s významným ekonomickým a sociálnym dopadom [1]. CPS prispievajú rozhodujúcim spôsobom k riešeniu spoločenských výziev, akými sú napr. zlepšenie zdravotnej starostlivosti, zvládanie starnúceho obyvateľstva, podpora prechodu na obnoviteľné zdroje energie, zmena klimatických podmienok, plánovanie inteligentných miest a iné. Mnohé z týchto oblastí sú kľúčom k riešeniu spoločenských výziev ako v súčasnosti, tak aj v budúcnosti [2].

Zvládnutie návrhu, analýzy a implementácie komplexných CPS je dôležité aj preto, aby jednotlivé priemyselné odvetvia boli schopné implementovať obchodné modely založené na CPS. Súčasná CPS sú však často navrhované a udržiavané s neznámymi rizikami a vysokými nákladmi. Z tohto pohľadu je možné definovať v oblasti CPS mnoho výskumných výziev, medzi inými napríklad:

- analýza a návrh architektúry CPS,
- bezpečnosť CPS,
- robustnosť CPS,
- verifikácia CPS,
- **modelovanie a riadenie hybridných systémov (HS) v kontexte CPS.**

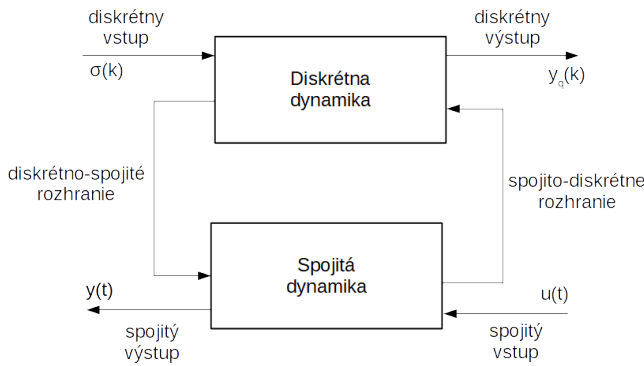
V tomto článku sa budeme zaoberať návrhom metodiky pre modelovanie a riadenie HS v kontexte CPS v rámci modelových aplikácií na KKUI FEI TU a experimentu ALICE CERN, čo predstavuje jednu z uvedených výziev CPS.

Výskum v oblasti HS poskytuje modelovaciu platformu pre CPS a systematické metódy potrebné na ich návrh, analýzu a verifikáciu [3].

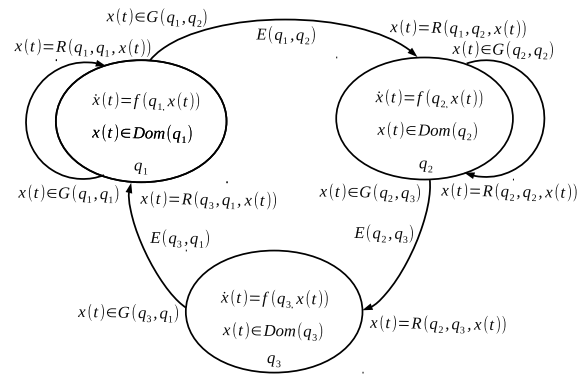
Hybridné systémy predstavujú komplexné systémy, ktoré obsahujú spojitú dynamiku so vstupom $u(t)$ a výstupom $y(t)$ (modelovanú napríklad diferencnými alebo diferenciálnymi rovnicami), diskretnú dynamiku so vstupom $\sigma(t)$ a výstupom $q(t)$ (Petriho siete, konečné stavové automaty) a ich rozhrania [4]. Túto štruktúru je možné vidieť na Obr. 1.

II. HYBRIDNÉ AUTOMATY

Jedným zo základných matematických modelov na popis hybridných systémov je reprezentácia v tvare hybridného automatu, ktorá je rozšírením formalizmu konečných stavových



Obr. 1: Základná štruktúra hybridného systému [5]



Obr. 2: Grafická reprezentácia hybridného automatu

automatov o spojité dynamiku v jednotlivých diskretných stavoch [6].

Hybridný automat si je teda možné predstaviť ako n -tícu $H = (Q, X, f, \text{Init}, \text{Dom}, E, G, R)$, kde:

- Q predstavuje konečnú množinu stavov, ktorá môže nabíadať hodnoty $\{q_1, q_2, \dots, q_{max}\}$,
- $X \subseteq \mathbb{R}^n$ je stavový priestor, v ktorom sa vyvíja spojité dynamiku hybridného automatu H ,
- $f: Q \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, definuje spojité priebeh vývoja spojitého stavového vektora $\mathbf{x}(t)$ v stave q ,
- $\text{Init} \subseteq Q \times X$ určuje množinu možných počiatkových stavov,
- $\text{Dom} : Q \rightarrow 2^X$ predstavuje pre $\forall q \in Q$ oblasť v stavovom priestore $\text{Dom}(q) \subseteq X$, v rámci ktorej je možný vývoj spojitého stavu systému $\mathbf{x}(t)$,
- množina hrán $E \subseteq Q \times Q$, predstavuje také páry (q_i, q_j) medzi ktorými je možný prechod,
- hraničné podmienky prepnutia, ktoré priradiajú každej hrane $(q_i, q_j) \in E$ množinu $G(q_i, q_j)$, pre ktorú je definovaný prechod spojitého stavu $\mathbf{x}(t)$ zo stavu q_i do stavu q_j ,
- množina prechodov $R: E \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, ktorá definuje pre každú hranu $(q_i, q_j) \in E$ a spojité stav $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ skok spojitého stavu počas prechodu zo stavu q_i do stavu q_j [7].

Stav hybridného automatu H je možné teda určiť ako dvojicu prvkov $(q, \mathbf{x}(t)) \in Q \times \mathbb{R}^n$, kde $\mathbf{x}(t) \in X$ a $q \in Q$.

A. Grafická reprezentácia hybridného automatu

V mnohých prípadoch je vhodné znázorniť HS ako orientovaný graf. Vrcholy grafu predstavujú jednotlivé diskretné stavy $q \in Q$ a hrany E definujú jednotlivé možné prechody medzi týmito diskretnými stavmi. Každý vrchol je popísaný pomocou množiny počiatkových stavov Init , spojitej dynamiky f a oblasti, v ktorej sa daný systém vyvíja Dom . Každý hrane G sa priradí podmienka prepnutia R a prechodová funkcia hybridného automatu [8]. Grafické znázornenie daného popisu orientovaného grafu je ukázané na Obr. 2.

III. NÁVRH METODIKY PRE MODELOVANIE, ANALÝZU A RIADENIE HS S VIACERÝMI SPOJITÝMI DYNAMIKAMI

Pre CPS, ktoré je možné popísať pomocou matematického aparátu hybridných systémov bola navrhnutá metodika, ktorá zahŕňa dve skupiny hybridných systémov, a to:

- hybridné automaty s definovanou spojitou dynamikou v každom diskretnom stave a
- hybridné automaty s diskretnými stavmi bez definovanej spojitej dynamiky.

Pre obidve skupiny hybridných systémov pozostáva metodika z troch hlavných modulov:

- **Modelovanie HS** - modul slúži na vytvorenie matematickej reprezentácie CPS a ich následnej úprave do tvaru vhodného pre nasledovnú analýzu a návrh riadenia
- **Analýza HS** - modul sa zaoberá analýzou a verifikáciou CPS v už vytvorenej matematickej reprezentácii HS
- **Riadenie HS** - modul používa výstupy predošlých modulov na návrh algoritmov riadenia zabezpečujúcich požadované správanie HS v kontexte CPS

Nakoniec po aplikovaní týchto troch modulov na CPS je možné dosiahnuté výstupy modulov aplikovať priamo na HS v rámci distribuovaného systému riadenia.

Modul **Modelovanie** ako taký pozostáva zo štyroch krokov:

- **M1** - tento krok predstavuje zadefinovanie jednotlivých prvkov n -tice hybridného automatu tak ako boli uvedené v časti II. Zároveň správna realizácia tohto kroku predstavuje dôležitý predpoklad správneho definovania dynamiky celého CPS v podobe hybridného systému.
- **M1.1** - tento krok je obzvlášť vhodný pre hybridné systémy bez definovanej spojitej dynamiky v niektorých diskretných stavoch, nakoľko pomocou lineárnej temporálnej logiky sa dajú charakterizovať takéto systémy.
- **M2** - nasledujúci krok navrhutej metodiky zahŕňa vytvorenie orientovaného grafu prechodov hybridného systému, pričom tento graf slúži na jednoduchšiu čitateľnosť správania sa celého systému ako celku ale aj na odhalenie nezrovnalostí a nesprávne zadefinovaných prvkov n -tice hybridného automatu.
- **M3** - v rámci tohto kroku je odvodená lineárna aproximácia spojitej dynamiky tých diskretných stavov, v ktorých

uvažujeme návrh algoritmov riadenia vychádzajúcich z lineárnej syntézy.

M4 - niektoré algoritmy riadenia sú využívané kvôli svojej zložitosti len v rámci systémov s dynamikou definovanou v diskretnom čase, t.j. na základe periódy vzorkovania, napr. explicitné prediktívne riadenie založené na modeli. Na základe tohto predpokladu je v tomto kroku vytvorená lineárna aproximácia spojitej dynamiky v diskretnom čase pre jednotlivé diskkrétne stavy.

Po vytvorení matematickej reprezentácie CPS v podobe hybridného systému je nutné túto matematickú reprezentáciu validovať a následne analyzovať vlastnosti hybridného systému s ohľadom na nasledovné kroky metodiky.

Nasledujúci modul **Analýza** je zložený zo štyroch krokov:

A1 - tento krok predstavuje implementáciu matematickej reprezentácie CPS v podobe HS do zvoleného programového prostredia. Pre systémy s definovanou spojitou dynamikou v každom diskretnom stave bolo zvolené využitie s-funkcií simulačného prostredia MATLAB/Simulink a aplikačného toolbox-u HYSDEL. Pre systémy s diskretnými stavmi bez spojitej dynamiky sme zvolili implementáciu v rámci aplikačného toolbox-u Stateflow simulačného prostredia MATLAB/Simulink.

A2 - po vykonaní implementácii HS prebehne analýza a porovnanie matematických reprezentácií spojitej dynamiky diskretných stavov v nelineárnej a lineárnej podobe v okolí vypočítaného ustáleného stavu.

A3 - Validácia HS ako celku prebieha na základe analýzy v otvorenom regulačnom obvode.

A4 - posledný krok modulu **Analýza** hybridných systémov zahŕňa vytvorenie fázových portrétov ako pre nelineárnu tak aj pre lineárnu spojité dynamiku a vyšetrovanie správania sa HS v rámci jednotlivých diskretných stavoch.

Následne po úspešnej validácii matematickej reprezentácie CPS v podobe HS a následnej analýze systému je možné navrhnúť vybrané metódy a algoritmy riadenia na uvažovaný CPS v rámci modulu **Riadenie**.

Modul **Riadenie** pozostáva z troch krokov:

R1 - návrh explicitného prediktívneho riadenia založeného na modeli vychádza z lineárnej aproximácie spojitej dynamiky v diskretnom čase jednotlivých diskretných stavov.

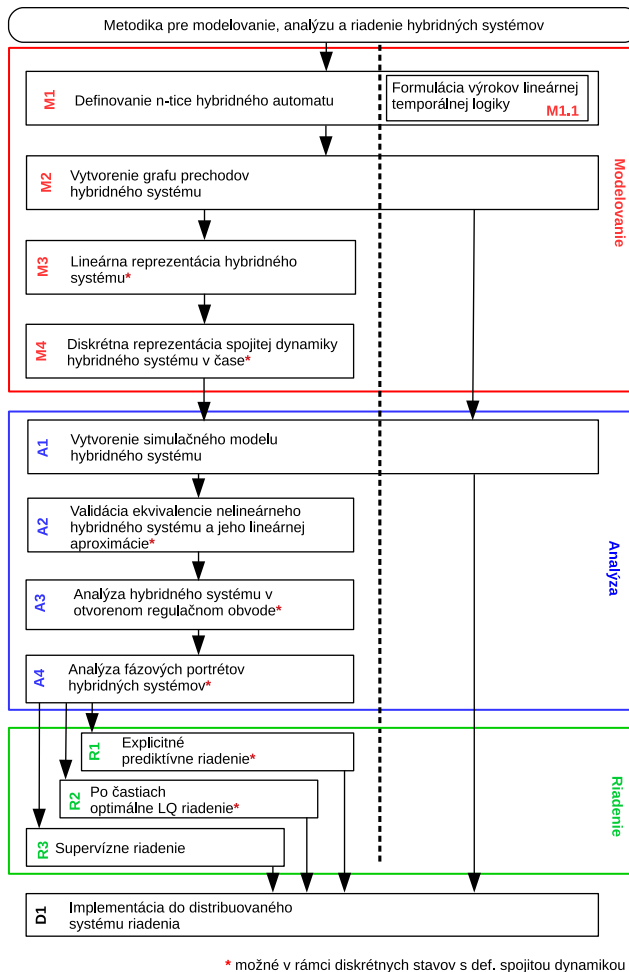
R2 - návrh po častiach spojitého optimálneho LQ riadenia vychádza z lineárnej aproximácie spojitej dynamiky diskretného stavu či už v spojitom alebo diskretnom čase.

R3 - návrh supervízneho riadenia, ktoré predstavuje návrh rôznych algoritmov riadenia v súčinnosti s prepínacím mechanizmom, ktorý určuje aktívny algoritmus riadenia aplikovaný na HS v danom čase.

Posledný krok navrhutej metodiky predstavuje implementáciu do distribuovaného systému riadenia:

D1 - Implementácia do distribuovaného systému riadenia predstavuje posledný krok navrhutej metodiky zahŕňa implementáciu algoritmov riadenia do distribuovaného systému riadenia CPS a ich verifikáciu

Predstavená metodika je graficky znázornená na Obr. 3.



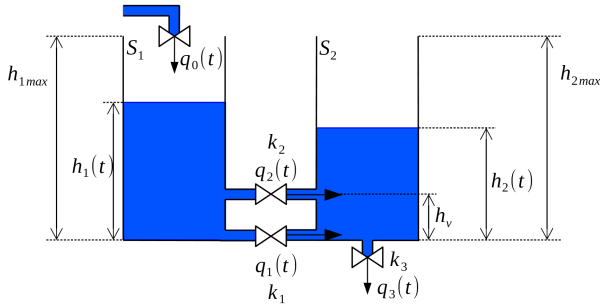
Obr. 3: Návrh metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie hybridných dynamických systémov

IV. MODELOVANIE, ANALÝZA A RIADENIE SIMULAČNÉHO MODELU HYBRIDNÉHO HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU - SCENÁR 1

Prvý scenár v dizertačnej práci sa zaoberá simulačným modelom hybridného hydraulického systému. Hydraulický HS sa skladá z dvoch nádob, ktoré sú spojené dvomi ventilmi tak, ako je to znázornené na Obr. 4. Úrovně výšky kvapaliny v jednotlivých nádobách sú označené ako $h_1(t)$ pre prvú a $h_2(t)$ pre druhú nádobu. Prítok $q_0(t)$ predstavuje vstup do HS. Ventily nádrží sú popísané parametrami k_1, k_2, k_3 s príslušným označením prietoku kvapaliny $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$. Spoločný ventil k_1 môže byť otvorený alebo zatvorený. Ventil k_2 sa nachádza vo výške h_v . Nádrže sú valcovitého tvaru, preto je možné plochu prierezu nádob uvažovať ako konštantnú a to S_1 pre prvú a S_2 pre druhú nádobu.

Zvolený hydraulický systém vykazuje hybridný charakter, nakoľko nastáva prechod medzi jednotlivými diskretnými stavmi systému, a to ak jedna z výšky hladín nádob $h_1(t)$ alebo $h_2(t)$ prekročí výšku h_v v spoločnom hornom ventile

k_2 . Dôsledkom toho je, že systém má 4 rôzne diskrétny stavy s otvoreným spodným ventilom k_1 . Keď je ventil k_1 zatvorený, existujú ďalšie 4 diskrétny stavy systému. Celkovo sa teda môže systém nachádzať v jednom z ôsmich rôznych diskretných stavov, ktoré sú označené ako \mathcal{A} až \mathcal{H} , čo je graficky znázornené na Obr. 5.



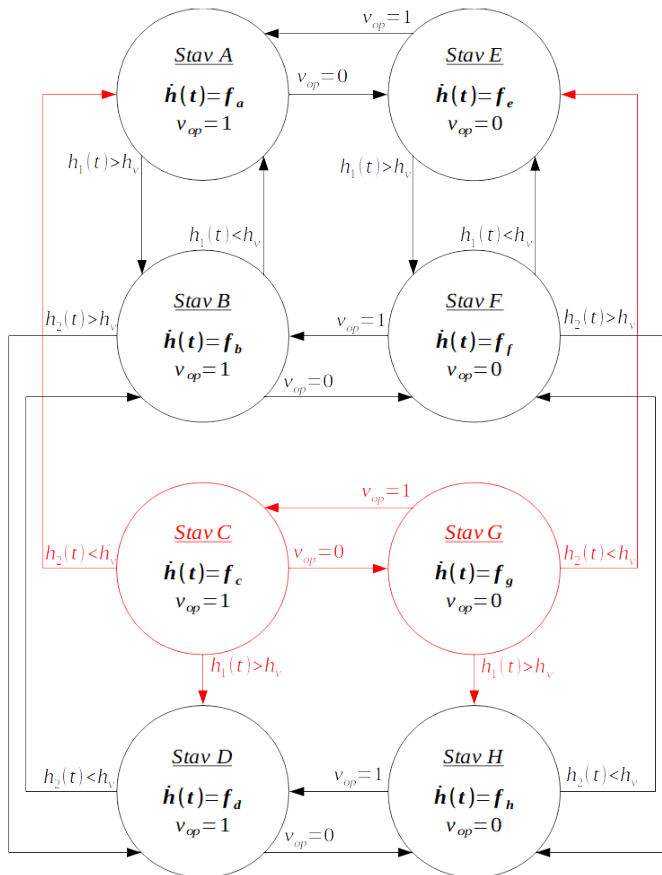
Obr. 4: Schéma hydraulického hybridného systému

pričom bolo využité prostredie s -funkcií, ako aj aplikačného toolboxu HYSDEL.

D. stav	Podmienka pre $h_1(t)$	Podmienka pre $h_2(t)$	Ventil k_1
\mathcal{A}	$h_1(t) \leq h_v$	$h_2(t) \leq h_v$	otvorený
\mathcal{B}	$h_1(t) > h_v$	$h_2(t) \leq h_v$	otvorený
\mathcal{C}	$h_1(t) \leq h_v$	$h_2(t) > h_v$	otvorený
\mathcal{D}	$h_1(t) > h_v$	$h_2(t) > h_v$	otvorený
\mathcal{E}	$h_1(t) \leq h_v$	$h_2(t) \leq h_v$	zatvorený
\mathcal{F}	$h_1(t) > h_v$	$h_2(t) \leq h_v$	zatvorený
\mathcal{G}	$h_1(t) \leq h_v$	$h_2(t) > h_v$	zatvorený
\mathcal{H}	$h_1(t) > h_v$	$h_2(t) > h_v$	zatvorený

Tabuľka I: Diskrétny stavy hydraulického hybridného systému

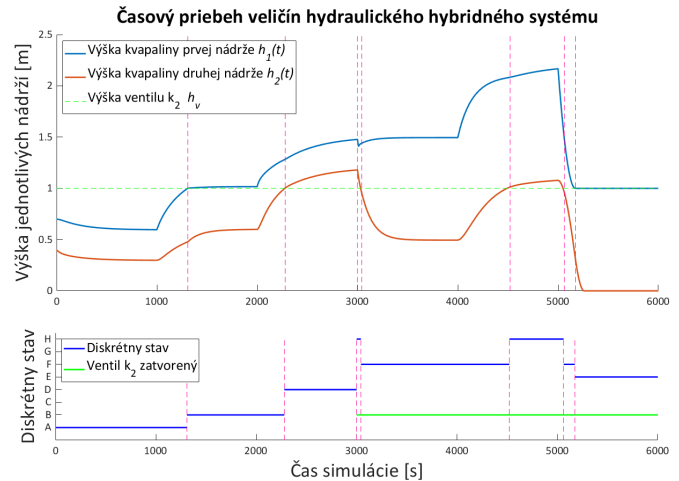
Odozva v rámci otvoreného regulačného obvodu, slúži na sledovanie časových priebehov či už stavového vektora $\mathbf{x}(t)$ alebo výstupu systému $\mathbf{y}(t)$ a prechodov medzi jednotlivými diskretnými stavmi pri zvolenom vstupe $\mathbf{u}(t)$. Prechody medzi diskretnými stavmi hydraulického HS sú znázornené na Obr. 6.



Obr. 5: Graf prechodov hydraulického HS

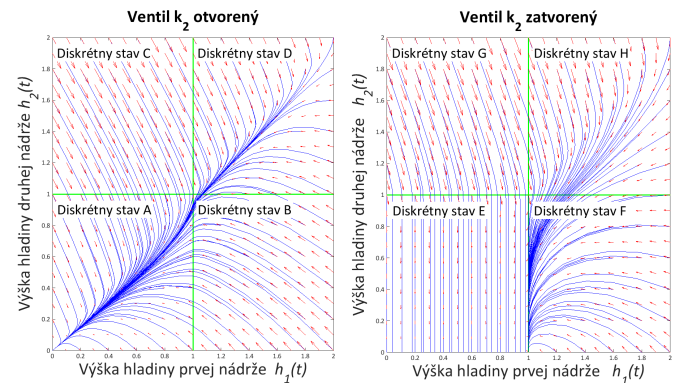
Podmienky, definujúce diskretny stavy hydraulického HS, sú uvedené v Tab. I.

Po ukončení modulu **Modelovanie** navrhnutej metodiky je možné vykonať kroky v rámci modulu **Analýza** pre hydraulický HS. Nevyhnutným predpokladom pre analýzu je implementácia HS v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink



Obr. 6: Časový priebeh veličín hydraulického hybridného systému

Taktiež je možné využiť analýzu v podobe fázových portrétov, čo je znázornené na Obr. 7.



Obr. 7: Fázový portrét nelineárnej reprezentácie hydraulického hybridného systému

Nakoľko Jakobiho matice pre hydraulický HS mohli byť získané len pre niektoré diskkrétne stavy, t.j. $\{\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{D}, \mathcal{F}, \mathcal{H}\}$, stavové riadenie bolo navrhnuté len pre tieto stavy. Stavový vektor pre hydraulický HS je definovaný ako $\mathbf{x}(t) = [h_1(t) \ h_2(t)]^T$ a vstup $u(t) = q_0(t)$.

Hlavný rozdiel oproti jednoduchému LQ algoritmu riadenia je v minimalizácii funkcionálu v každom prvku množiny *Domain* hybridného automatu. Cieľom po častiach optimálneho LQ riadenia je potom zabezpečiť, aby stav systému spĺňal podmienku $\Delta \mathbf{x}(\infty) = 0$ z akéhokoľvek počiatočného stavu $\Delta \mathbf{x}(0)$ a zároveň minimalizovať funkcionál:

$$J(x_0, u) = \int_0^{\infty} (\Delta \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_q \Delta \mathbf{x} + \Delta u^T \mathbf{R}_q \Delta u) dt \quad (1)$$

kde $\mathbf{Q}_q \geq 0$ a $\mathbf{R}_q > 0$ sú váhové matice pre stav a vstup systému príslušných rozmerov pre diskrétne stav q . Na základe minimalizácie funkcionálu je možné vypočítať spätnoväzobné zosilnenie $\mathbf{k}_q = \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{B}_q^T \mathbf{S}_q$ kde matica \mathbf{S}_q je riešenie maticovej Riccatiho algebraickej rovnice:

$$0 = -\mathbf{Q}_q - \mathbf{A}_q^T \mathbf{S}_q - \mathbf{S}_q \mathbf{A}_q + \mathbf{S}_q \mathbf{B}_q \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{B}_q^T \mathbf{S}_q \quad (2)$$

kde $\mathbf{A}_q, \mathbf{B}_q$ sú matice dynamiky a vstupu pre jednotlivé diskkrétne stavy. Spätnoväzobný zákon riadenia je potom možné definovať ako:

$$\Delta u_{FBq}(t) = -\mathbf{k}_q^T \Delta \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

V prípade potreby je možné akýkoľvek prvok stavového vektora $\mathbf{x}(t)$ riadiť na nový ustálený stav $y_{ref}(t)$. Výstup hydraulického HS je definovaný ako $y(t) = h_2(t)$. Na základe toho je možné dosiahnuť požadovanú hodnotu $y_{ref}(t) = h_{2ref}(t)$ pridaním dopredného zosilnenia N pre q -tý diskrétne stav:

$$N_q = \frac{-1}{\mathbf{C}_q (\mathbf{A}_q - \mathbf{B}_q \mathbf{k}_q)^{-1} \mathbf{B}_q} \quad (4)$$

a zákon riadenia pre doprednú zložku má potom tvar:

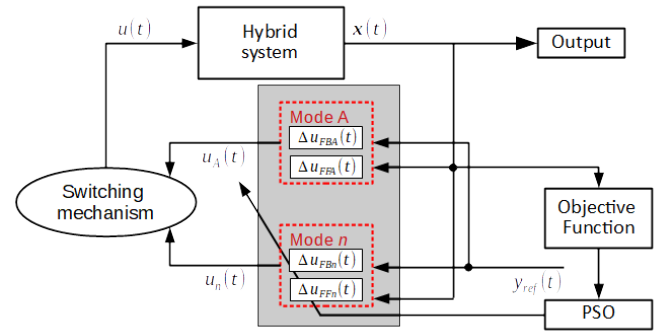
$$\Delta u_{FFq}(t) = N_q \Delta y_{ref}(t) \quad (5)$$

Celkový zákon riadenia $u(t)$ aplikovaný na systém je potom súčtom spätnoväzbových a dopredných riadiacich zložiek:

$$\Delta u_q(t) = \Delta u_{FBq}(t) + \Delta u_{FFq}(t) \quad (6)$$

Akčný zásah definovaný pomocou (6) je implementovaný na nelineárnu reprezentáciu hydraulického HS.

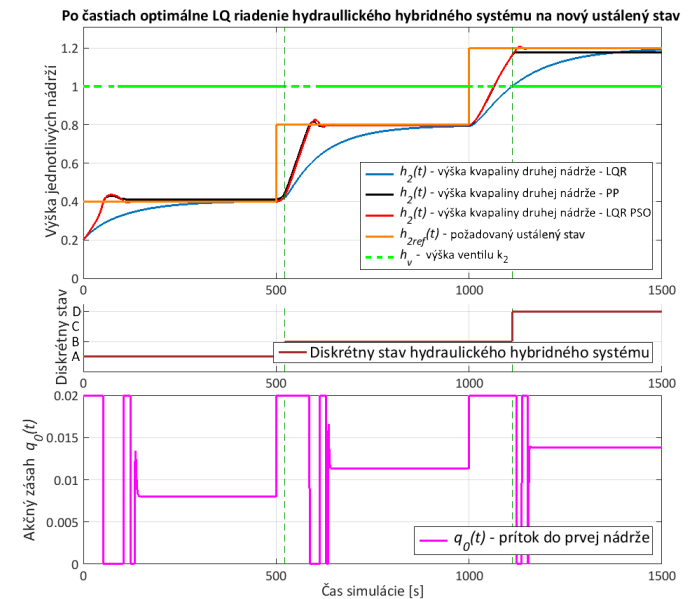
V rámci návrhu po častiach optimálneho LQ riadenia je využitý metaheuristický algoritmus optimalizácie krdľ'a častíc (particle swarm optimization - PSO), tak ako je to znázornené na Obr. 8.



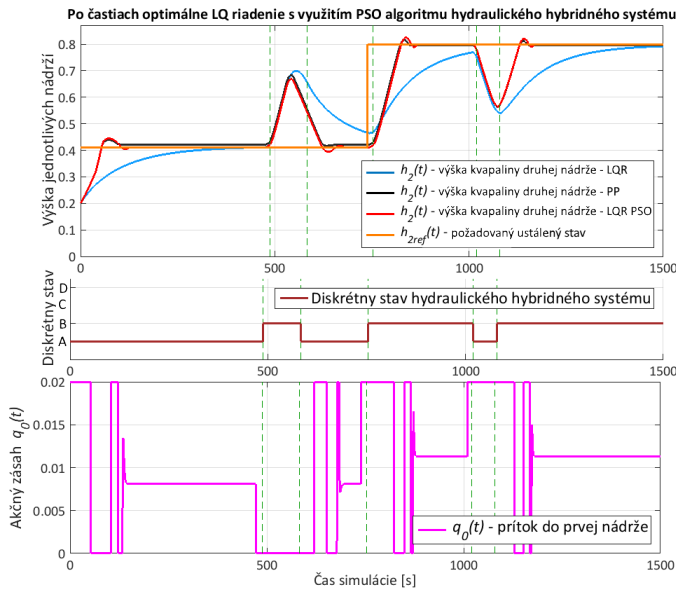
Obr. 8: Schéma po častiach optimálneho LQ riadenia na základe PSO algoritmu

Overenie navrhovaného algoritmu riadenia sa uskutočnilo na základe zmeny požadovaného ustáleného stavu, ako aj na základe kompenzácie poruchy. Cieľom algoritmu riadenia bolo v prvom prípade dosiahnuť prechod z diskrétneho stavu \mathcal{A} do stavu \mathcal{D} cez stav \mathcal{B} , tak ako to je znázornené na Obr. 9. Obr. 10 znázorňuje výsledky kompenzácie pôsobenia poruchy na zvolený systém.

Je možné vidieť, že v oboch prípadoch po častiach optimálne LQ riadenie na základe PSO algoritmu dosiahlo najlepší časový priebeh či už v sledovaní nového ustáleného stavu alebo pri kompenzácii pôsobenia poruchy na systém.



Obr. 9: Sledovanie nového ustáleného stavu hydraulického HS



Obr. 10: Po častiach optimálne LQ riadenie hydraulického HS s kompenzáciou poruchy

Výsledky prvého scenára boli publikované v [9].

V. MODELOVANIE, ANALÝZA A RIADENIE Modelovej aplikácie Výťah - SCENÁR 2

Scenár 2 sa zaoberá modelovaním a analýzou Modelovej aplikácie Výťah (MAV). MAV obsahuje diskrétny stavy bez definovanej spojitej dynamiky, preto sa na ňu vzťahuje časť navrhovanej metodiky, ktorá je znázornená v rámci pravej časti Obr. 3. Modelová aplikácia Výťah, ktorej funkčnosť je inšpirovaná laboratórnym modelom výťahu (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php>), je opísaná z hľadiska konštrukcie v [10] a je zobrazená na Obr. 11.



Obr. 11: Modelová aplikácia Výťah (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php>)

Popis a prehľad fyzikálnych veličín sú uvedené v Tab. II a parametre MAV v Tab. III.

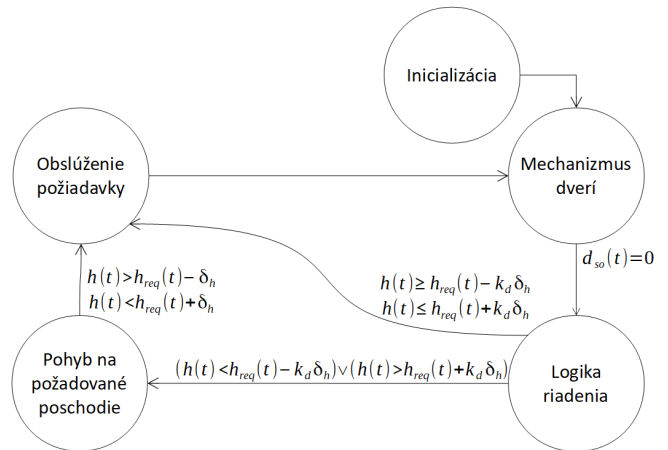
Označenie	Definičný obor	Popis
$h(t)$	$\langle h_1; h_4 \rangle$	výška MAV
$d(t)$	$\langle 0; d_{max} \rangle$	pozícia dverí
$h_{req}(t)$	$\{h_1; h_2; h_3; h_4\}$	požadovaná výška
$\tau(t)$	$\langle 0; \tau_{max} \rangle$	časovač
$v_d(t)$	$\{-v_{dlin}; 0; +v_{dlin}\}$	rýchlosť otvárania dverí
$v_h(t)$	$\{-v_{hlin}; 0; +v_{hlin}\}$	rýchlosť pohybu výťahu

Tabuľka II: Fyzikálne veličiny Modelovej aplikácie Výťah

Označenie	Hodnota	Popis
h_{dif}	1.5 [m]	výška poschodia
h_1	0 [m]	výška prvého poschodia
h_2	$h_1 + h_{dif}$ [m]	výška druhého poschodia
h_3	$h_1 + 2h_{dif}$ [m]	výška tretieho poschodia
h_4	$h_1 + 3h_{dif}$ [m]	výška štvrtého poschodia
d_{max}	1.2 [m]	šírka 1 strany dverí
δ_d	0.01 [m]	tolerancia polohy dverí
δ_h	0.03 [m]	tolerancia polohy výťahu
τ_{max}	3 [s]	maximálna hodnota časovača
v_{dlin}	1 [ms ⁻¹]	rýchlosť otvárania dverí
v_{hlin}	0.1 [ms ⁻¹]	rýchlosť pohybu výťahu

Tabuľka III: Parametre Modelovej aplikácie Výťah

MAV je matematicky popísaná ako hybridný systém na znázornenie prechodov medzi jednotlivými diskretnými stavmi. Pri vytvorení HS MAV bolo potrebné zostrojiť graf prechodov medzi jednotlivými diskretnými stavmi systému, pričom uzly reprezentujú tieto stavy a hrany zobrazujúce prechody medzi stavmi. Graf prechodov MAV je ilustrovaný na Obr. 12 a zobrazuje diskretné stavy najvyššej úrovne, pričom jednotlivé diskretné stavy majú vlastné grafy prechodov o jednu úroveň nižšie.



Obr. 12: Graf prechodov Modelovej aplikácie Výťah na najvyššej úrovni

V zadanom formalizme hybridných automatov je možné MAV definovať nasledovne:

a) MAV obsahuje 5 diskretných stavov

$$Q = \{q_1 - inicializácia, q_2 - mechanizmus dverí,$$

q_3 – logika riadenia,

q_4 – pohyb na požadované poschodie,

q_5 – obsluženie požiadavky}

b) pre stavový priestor, v ktorom sa vyvíja spojitá dynamika platí

$$\mathbf{X} = \langle 0 - \delta_h, h_4 + \delta_h \rangle \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle$$

c) dynamika systému \mathbf{f} pre jednotlivé diskkrétne stavy s definovanou spojitou dynamikou

- q_2 - diskkrétne stav *Mechanizmus dverí*
 - otváranie dverí $v_d(t) = -v_{din}$
 - zatváranie dverí $v_d(t) = v_{din}$
 - časovač $\dot{\tau}(t) = 1$
- q_4 - diskkrétne stav *Pohyb na požadované poschodie*
 - pohyb smerom hore $v_h(t) = v_{hlin}$
 - pohyb smerom dole $v_h(t) = -v_{hlin}$

d) množinu možných počiatkových stavov MAV je možné určiť ako

$$\text{Init} = h_1 \times 2d_{max}$$

e) pre domény jednotlivých stavov s definovanou spojitou dynamikou potom platí:

- $Dom(q_2)$ - diskkrétne stav *Mechanizmus dverí*

$$Dom(q_2) = h_1 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle \cup$$

$$\cup h_2 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle \cup$$

$$\cup h_3 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle \cup$$

$$\cup h_4 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle$$

- $Dom(q_4)$ - diskkrétne stav *Pohyb na požadované poschodie*

$$Dom(q_4) = \langle 0 - \delta_h, h_4 + \delta_h \rangle \times 2d_{max} + 2\delta_d$$

f) množina hrán E je definovaná ako $E(q_1, q_2)$, $E(q_2, q_3)$, $E(q_3, q_4)$, $E(q_3, q_5)$, $E(q_4, q_5)$ a $E(q_5, q_1)$,

g) hraničné podmienky prepnutia daného systému sú znázornené na Obr. 12,

h) množina prechodov R je reprezentovaná identickým zobrazovaním.

Následne bude popísané správanie sa MAV pomocou lineárnej temporálnej logiky.

Logika a parametre MAV

Funkcionalitu MAV je možné opísať pomocou lineárnej temporálnej logiky, nakoľko spomínaná aplikácia obsahuje diskkrétne stavy bez definovanej spojitaj dynamiky. Podľa nomenklatury lineárnej temporálnej logiky a jej operátorov:

- $\mathcal{G}p$ pre *vždy* p,
- $\mathcal{F}p$ pre *raz určite* p,
- $\mathcal{X}p$ pre *nasledujúci krát* p
- $p\mathcal{U}q$ pre *raz q začne platiť a dovtedy platí p*

a na základe už uvedenej funkcionality a grafu prechodov MAV je možné uviesť nasledujúce atomické propozície v rámci LTL [11]:

- h_i MAV sa nachádza na i -tom poschodí,
- d_i dvere na i -tom poschodí sú otvorené,
- r_i je aktívna požiadavka na i -tom poschodí,
- d_{so} v priestore dverí sa nachádza prekážka.

Uvažujúc tieto atomické propozície môže byť pre MAV definovaná množina piatich formúl LTL Φ_i :

F1) dvere sú "bezpečné", t.j. dvere na danom poschodí sú zatvorené, ak sa tam nenachádza MAV

$$\Phi_1 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} (\neg h_i \rightarrow \neg d_i)). \quad (7)$$

F2) akákoľvek požiadavka bude nakoniec obslužená,

$$\Phi_2 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} (r_i \rightarrow \mathcal{F}(h_i \wedge d_i))). \quad (8)$$

F3) pohyb MAV na vyššie poschodia je možný, len ak neexistuje požiadavka na nižšie poschodia

$$\Phi_3 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} h_i \wedge r_{j < i} \rightarrow \mathcal{X}((\bigwedge_{k=i+1, \dots, i_{max}} \neg h_k) \mathcal{U}(h_j \wedge d_j))) \quad (9)$$

F4) ak sa v priestore dverí nachádza prekážka dvere ostanú otvorené a výška MAV sa nemení, až kým sa v priestore dverí prekážka nebude nachádzať

$$\Phi_4 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} h_i \wedge d_{so} \rightarrow \mathcal{X}((\bigwedge_{i=1,2,3,4} h_i \wedge d_i) \mathcal{U}(\neg d_{so}))) \quad (10)$$

F5) Nakoniec bude aktívna iba jedna požiadavka, t.j. existuje čas, po ktorom nebude aktívna žiadna požiadavka

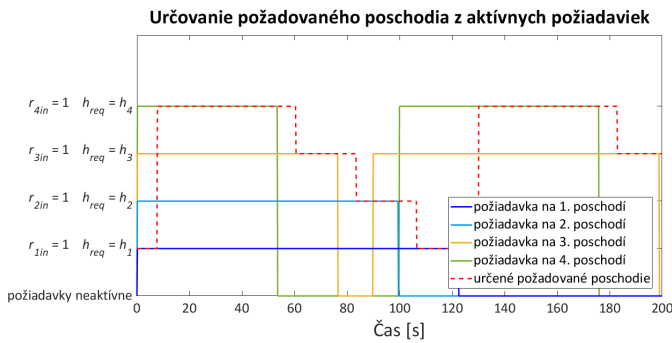
$$\Phi_5 = \mathcal{F}\mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} (\neg r_i)). \quad (11)$$

MAV pracuje na princípe zberu zhora nadol. Účelom tohto scenára je preto overiť správanie sa MAV pri súčasne aktívnych viacerých požiadavkách. Paralelne sa sleduje správanie MAV pri aktivácii požiadavky na hornom poschodí, zatiaľ čo na dolných poschodiach stále existujú aktívne požiadavky, výsledky sú znázornené na Obr. 13.

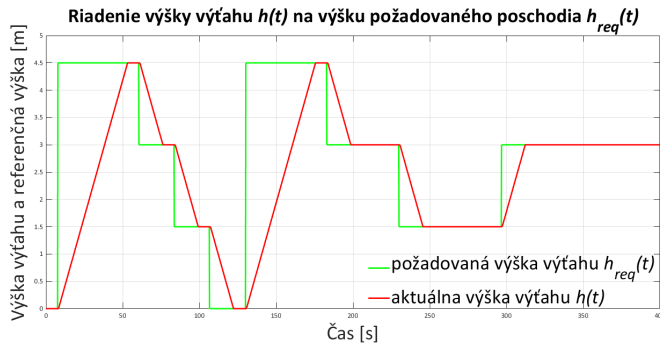
Následne prebehlo overenie pohybu MAV na základe zmien požadovaného poschodia h_{req} . Zmena výšky $h(t)$, v závislosti od zmeny skutočnej požadovanej výšky $h_{req}(t)$, je zobrazená na Obr. 14.

Nakoniec bola vykonaná verifikácia funkčnosti mechanizmu dverí boli sledované tri signály, konkrétne poloha dverí $d(t)$, prekážka v priestore dverí $d_{so}(t)$ a časovač $\tau(t)$. Časový priebeh týchto troch signálov je znázornený na Obr. 15.

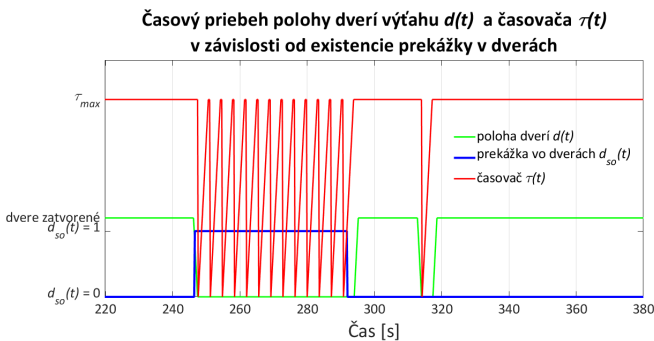
Výsledky druhého scenára boli spublikované v [12].



Obr. 13: Spracovanie aktívnych požiadaviek Modelovej aplikácie Výt'ah



Obr. 14: Pohyb MAV vzhľadom na požadované poschodie



Obr. 15: Časový priebeh funkcionality dverí s prekážkou v priestore dverí

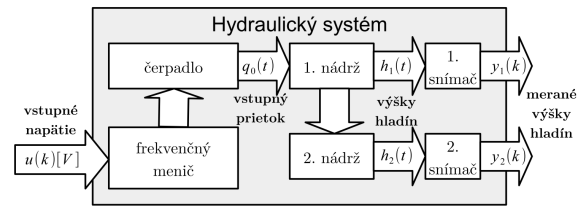
VI. MODELOVANIE, ANALÝZA A RIADENIE Modelovej aplikácie hydraulického systému - SCENÁR 3

Scenár 3 v dizertačnej práci sa zaoberá modelovaním, analýzou a riadením Modelovej aplikácie hydraulického systému (MAHS). MAHS predstavuje laboratórny model hydraulického systému (nádoby bez interakcie) a je zobrazená na Obr. 16.

MAHS pozostáva z dvoch valcových nádrží bez interakcie medzi nimi. Kvapalina je privádzaná do prvej nádrže pomocou membránového čerpadla $q_0(t)$. Z prvej nádrže $h_1(t)$ následne prúdi kvapalina do druhej nádrže $h_2(t)$ pôsobením hydrostatického tlaku a z nej vyteká do rezervoáru.



Obr. 16: Modelová aplikácia hydraulického systému (MAHS) (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>)



Obr. 17: Schématické znázornenie MAHS

Matematická reprezentácia MAHS bola na základe empirického pozorovania správania volená v podobe PWA systému.

Namerané dáta pri $u(k) = \{5, 6, 7\}$ boli následne upravené do tvaru vhodného pre potreby identifikácie pomocou funkcie *ssest* aplikačného toolboxu System Identification simulačného prostredia MATLAB, ktorý využíva algoritmus metódy najmenších štvorcov. Tvar matematického modelu bol volený ako:

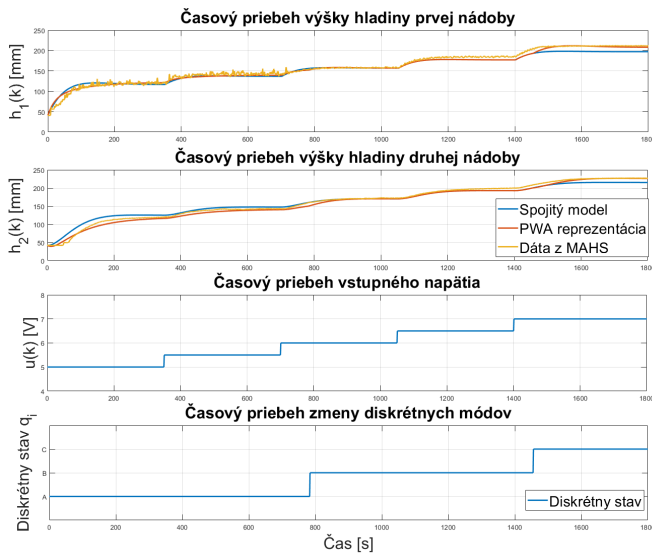
$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{F} \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{G} \Delta u(k), \\ \Delta \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

kde tvar matíc dynamiky \mathbf{F} a vstupu \mathbf{G} boli zvolené na základe uvažovania jednotkovej diagonálnej matice \mathbf{C} .

Po implementácii jednotlivých matematických reprezentácií MAHS či už do *s*-funkcií alebo v rámci aplikačného toolboxu HYSDEL, bola verifikovaná táto aproximácia stavového opisu voči dátam z MAHS.

Výsledné porovnanie týchto zápisov je zobrazené na Obr. 18. Ako je možné postrehnúť, matematická reprezentácia využívajúca PWA formalizmus pokrýva správanie sa MAHS v celom rozsahu prípustných hodnôt oboch nádrží. V spodnej časti grafu sú zobrazené prechody medzi diskretnými stavmi MAHS.

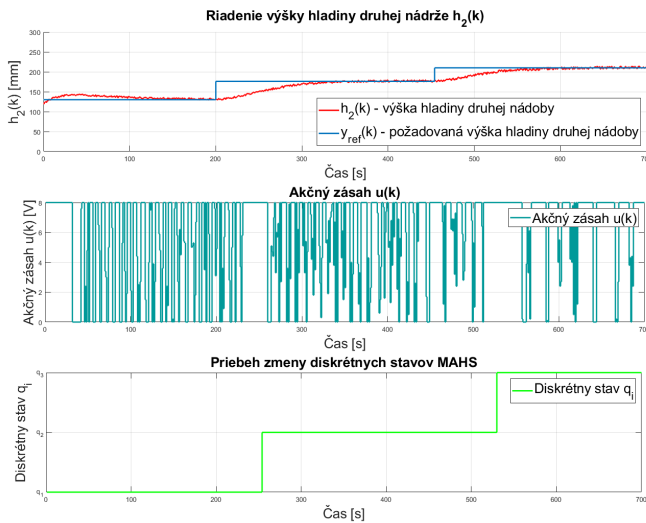
V rámci modulu **Riadenie** navrhutej metodiky bol navrhnutý algoritmus po častiach spojitého optimálneho LQ riadenia a explicitné prediktívne riadenie založené na modeli.



Obr. 18: Časové priebehy jednotlivých hladín v nádržiach pre rôzne reprezentácie MAHS

Po častiach spojité LQ riadenie bolo navrhnuté na základe rovnakej metodiky ako to bolo uvedené v rámci Scenáru 1. Zmena ustáleného stavu MAHS je definovaná pre výšku hladiny druhej nádoby, t.j. $y_{ref}(k) = h_2(k)$.

Výsledky uvedeného po častiach spojitého LQ riadenia sú uvedené na Obr. 19. Na základe výsledkov je možné vidieť, že výška hladiny $h_2(k)$ sleduje požadovanú zmenu ustáleného stavu $y_{ref}(k)$ naprieč všetkými diskretnými stavmi MAHS.



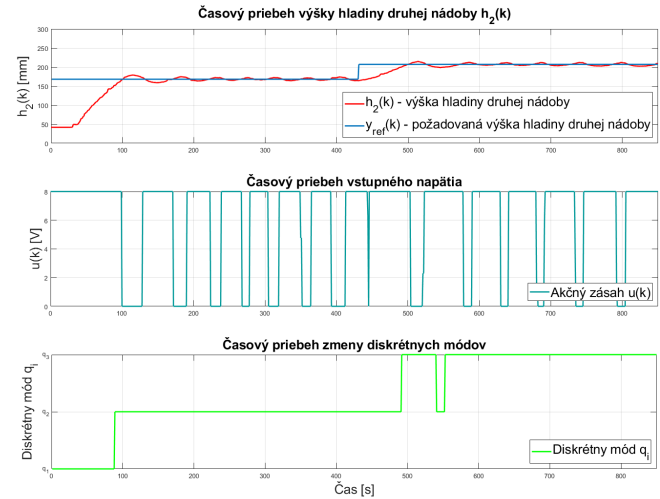
Obr. 19: Riadenie výšky hladiny druhej nádrže $h_2(k)$ na základe po častiach spojitého LQ riadenia

Druhá metóda riadenia aplikovaná na MAHS predstavuje explicitné prediktívne riadenie založené na modeli so sledovaním referenčnej trajektórie s funkcionálom definovaným ako:

$$J_{MPC} = \sum_{k=0}^{N-1} [y(k) - y_{ref}(k)]^T Q [y(k) - y_{ref}(k)] + u^T(k) R u(k)$$

v. n. $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{u}(k), k = 0, 1, \dots, N-1,$
 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(k),$
 $\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{max}, k = 0, 1, \dots, N-1,$
 $\mathbf{y}_{min} \leq \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \leq \mathbf{y}_{max}, k = 0, 1, \dots, N-1.$ (13)

pričom výsledky sú znázornené na Obr. 20.



Obr. 20: Riadenie výšky hladiny druhej nádrže $h_2(k)$ na základe explicitného prediktívneho riadenia

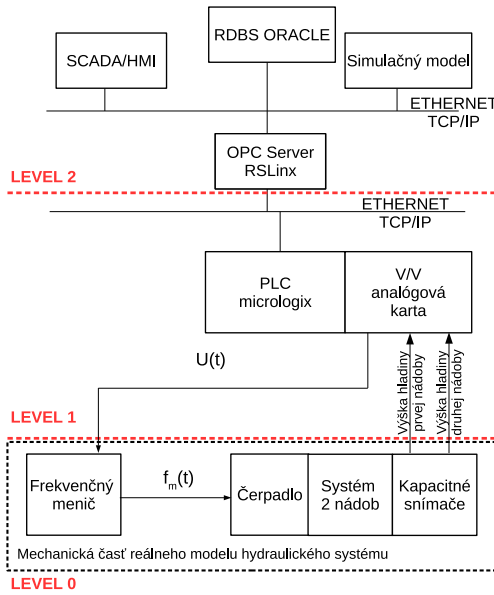
Na základe výsledkov modulu **Riadenie** navrhutej metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie HS aplikovaných na MAHS je možné zhodnotiť, že uvedené metódy a algoritmy riadenia splnili ciele riadenia, a to sledovanie nového ustáleného stavu $y_{ref}(k) = h_2(k)$.

Začlenenie *Modelovej aplikácie hydraulického systému* do DSR je znázornené na Obr. 21.

VII. SUPERVÍZNE RIADENIE MODELOVEJ APLIKÁCIE INVERZNÉHO KYVADLA NA VOZÍKU S LINEÁRNÝCH SYNCHRÓNNYM MOTOROM - SCENÁR 4

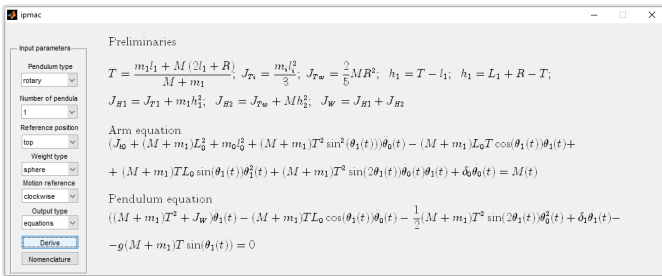
V rámci dizertačnej práce som sa zaoberal aj podaktuovanými systémami. Tie sú definované ako systémy s viac stupňami voľnosti ako akčných zásahov. Na základe Brockettovej podmienky platí, že pre podaktuované systémy nie je možné navrhnuť jednotný zákon riadenia v rámci ich celého stavového priestoru. Preto je na daný typ systémov aplikované supervízne riadenie, čo predstavuje krok R3 predstavenej metodiky.

Objektom záujmu je systém inverzného kyvadla s lineárnym synchronným motorm, ktorý je systémom v rámci Multifunkčného pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky. Matematický model vychádza z Lagrangeových rovníc II. druhu a preto



Obr. 21: DSR architektúra pre Modelovú aplikáciu hydraulického systému

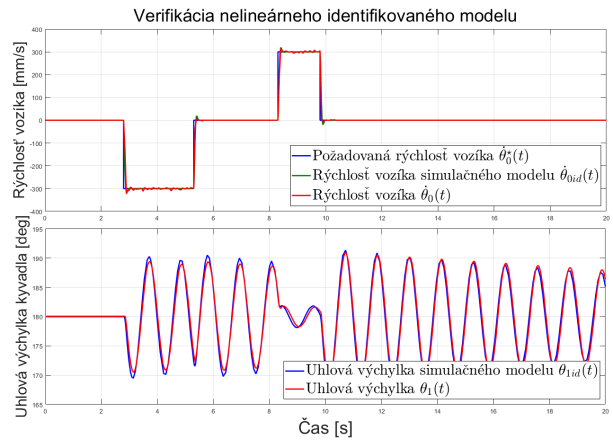
je kinetická $E_k(\theta(t), \dot{\theta}(t))$ a potenciálna $E_p(\theta(t))$ energia definovaná pre dva hmotné body - pre polohu vozíka $\theta_0(t)$ a pre uhlovú výchylku kyvadla $\theta_1(t)$. Odvodenie matematického modelu inverzného kyvadla s lineárnym synchronným motorom je implementované vo funkciách, ktoré sú súčasťou knižnice *IPMaC* [13], [14] pričom *Inverted Pendula Model Equation Derivator* predstavuje grafické rozhranie, ktoré zobrazuje pohybové rovnice v symbolickej alebo $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ forme a je zobrazené na Obr.22.



Obr. 22: Grafické užívateľské rozhranie *Inverted Pendula Model Equation Derivator_v3*

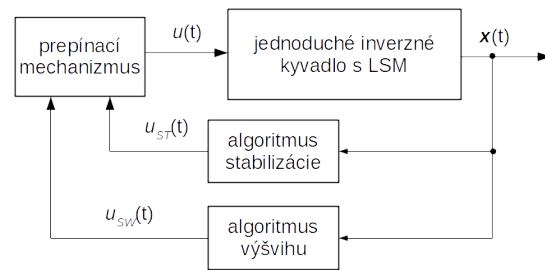
Po vygenerovaní matematického modelu uvedeného systému bol experimentálno-analytickou identifikáciou získaný celkový model laboratórneho systému, pričom jeho overenie je znázornené na Obr. 23. Je možné pozorovať, že vytvorený simulačný model kopíruje časové priebehy stavových veličín uvedeného systému.

Cieľ riadenia pre podaktuované systémy je zvyčajne definovaný ako stabilizácia systému vo zvislej vzpriamenej (obráteňnej) nestabilnej polohe pri nenulových počiatkových podmienkach alebo za pôsobenia poruchového signálu [15]. Nakoľko systém inverzného kyvadla nespĺňa Brockettovu nevyhnutnú



Obr. 23: Validácia časového priebehu rýchlosti vozíka $\dot{\theta}_0(t)$ a uhlovej výchylky kyvadla $\theta_1(t)$ simulačného modelu a Modelovej aplikácie s LSM

podmienku [16], je potrebné použiť hybridnú riadiacu štruktúru - supervízne riadenie tak, ako je to vidieť na Obr. 24 [5].



Obr. 24: Hybridná riadiaca štruktúra pre návrh algoritmov systému inverzného kyvadla na vozíku

Výstupy implementovanej hybridnej riadiacej štruktúry na laboratórnom modeli inverzného kyvadla s lineárnym synchronným motorom sú znázornené na Obr. 25.

Celková implementácia inverzného kyvadla na vozíku s lineárnym synchronným motorom a teda aj *Multifunkčného pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky* do DSR je ukázaná na Obr. 26 [17].

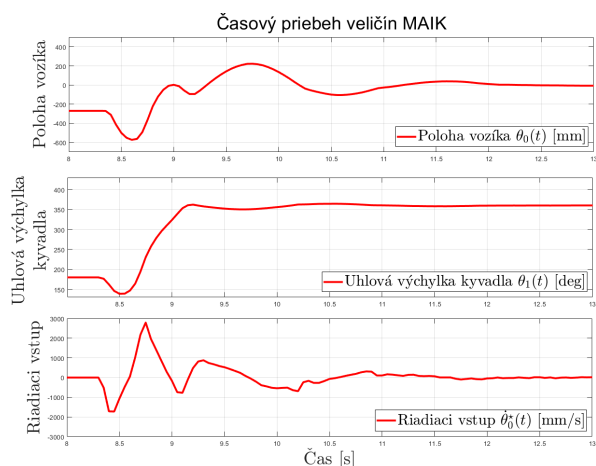
Výsledky Scenáru 4 boli publikované v rámci [18].

VIII. MODERNIZÁCIA KOMUNIKAČNO-RIADIACEJ ARCHITEKTÚRY DCS ALICE CERN

V rámci dizertačnej práce som sa venoval aj dvom výskumným úlohám experimentu ALICE CERN. Na základe modernizácie jednotlivých detektorov experimentu ALICE CERN vyplývajú výskumné úlohy.

A. Emulátor architektúry riadiaceho systému detektora

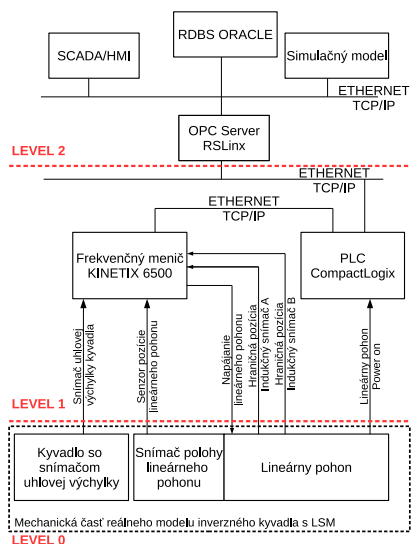
Prvá výskumná úloha predstavuje návrh, implementáciu a verifikáciu komunikačno-riadiacej architektúry riadiaceho systému detektora (detector control system - DCS).



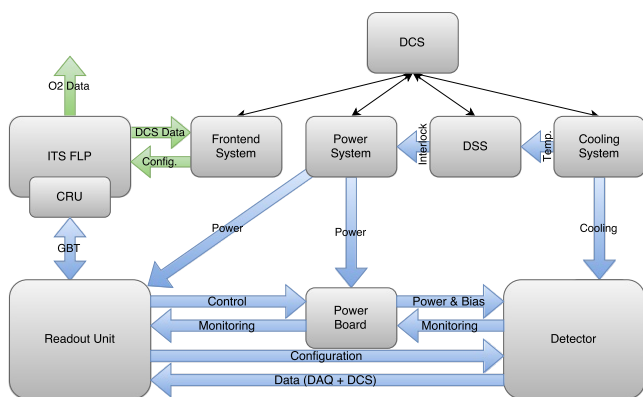
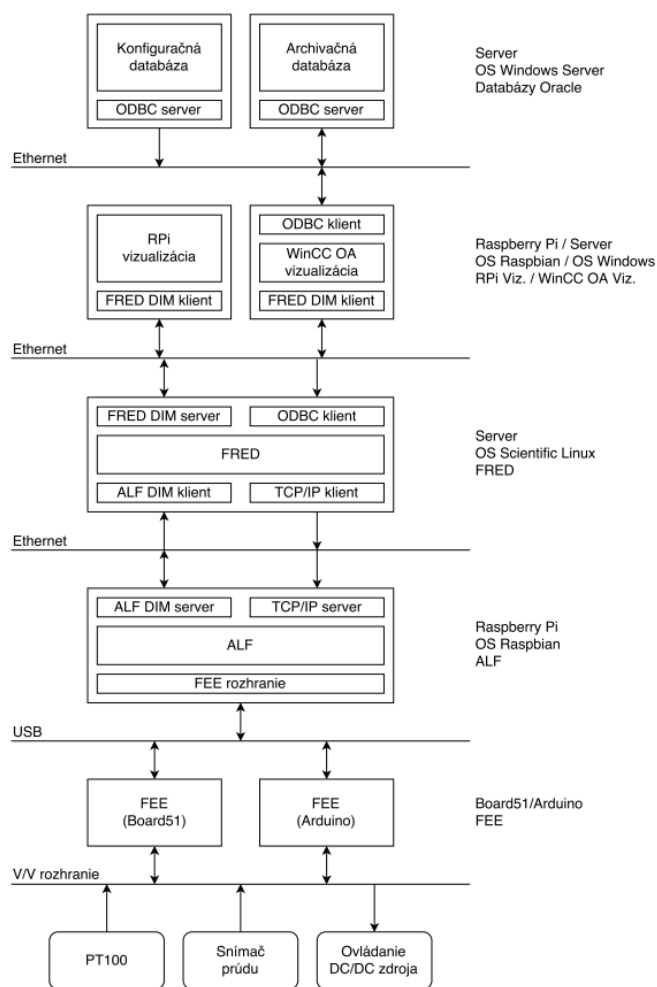
Obr. 25: Časový priebeh pozície vozíka $\theta_0(t)$, uhlovej výchylky kyvadla $\theta_1(t)$ a akčného zásahu $\dot{\theta}_0^*(t)$ pre MAIK_LSM

DCS slúži prevažne na konfiguráciu, kalibráciu, monitorovanie a riadenie napájania a chladenia samotných pixelových detektorov.

Na základe konzultácií a požiadaviek bolo vytvorené testovacie pracovisko *Emulátor DCS architektúry* v rámci Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky, ktoré bolo vyvinuté riešiteľmi projektu za účelom emulácie časti DCS a využíva alternatívne hardvérové prostriedky, nakoľko hardvér, ktorý je použitý v rámci modernizácie experimentu ALICE CERN je vo vývoji a nie je k dispozícii pre vývoj na vysunutých výskumných pracoviskách. Cieľom testovacieho pracoviska *Emulátor DCS architektúry* je navrhnúť a programovo realizovať univerzálne API, slúžiace pre riadenie a zber dát z neštandardných zariadení vyvinutých pre experiment ALICE CERN (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/cern.php>). Konceptná schéma emulátora DCS je znázornená na Obr. 28.



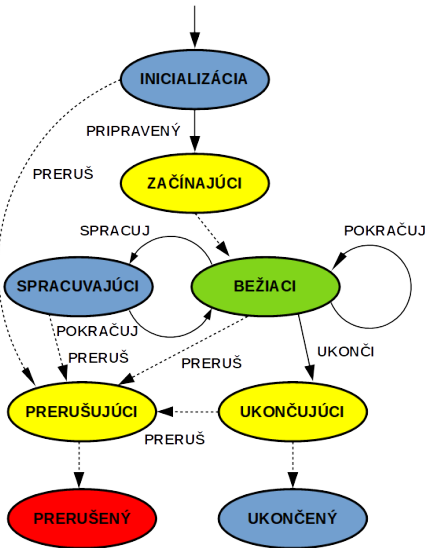
Obr. 26: Implementácia *Viacúčelového pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky* do architektúry DSR



Obr. 27: Schematické zobrazenie DCS pre detektor ITS

Obr. 28: Konceptná schéma *Emulátora DCS architektúry* pre detektor ITS

Jadrom riadiaceho systému detektora je systém ALFRED (ALICE Low Level Frontend Device), ktorého konečný stavový automat je znázornený na Obr. 29.



Obr. 29: Konečno stavový automat komunikačno-riadiacej architektúry ALFRED

Uvedený emulátor bol spublikovaný v [19] a [20].

B. Generátor zát'aže DCS architektúry

Druhou výskumnou úlohou, ktorou som sa zaoberal bolo vytvorenie nástroja na validáciu návrhu komunikačno-riadiacej architektúry v podobe generátora údajov, ktorý simuluje priebeh experimentu. Generátor zát'aže DCS teda slúži ako testovacie pracovisko pre overenie konečnej priepustnosti medzi architektúrou DCS a SW archivačných systémov. Cieľom je overiť či systémy v rámci experimentu ALICE CERN budú schopné zvládnuť objem dát generovaných v rámci plánovanej modernizácie LHC.

Architektúra ADAPOS, zabezpečujúca archiváciu dát z DCS, sa skladá z troch aplikácií: *jadro* (engine - E), *terminál* (terminal - T) a *generátor zát'aže* (load generator - LG). Podľa špecifikácií navrhnutá architektúra ADAPOS musí spĺňať nasledovné kritériá [21]:

- 1) nestratiť alebo poškodiť údaje,
- 2) zachovať poradie zmien DPE,
- 3) spracovávať údaje najpredvídateľnejšou priepustnosťou a latenciou,
- 4) stabilita navrhutej architektúry,
- 5) umožniť redundantné inštancie pre maximalizáciu celkovej robustnosti a udržateľnosti,
- 6) obmedziť výskyt zbytočných prestojov.

Podobne ako bolo uvedené v rámci Scenáru 2 bude pre návrh a implementáciu využitá metodika pre *Modelovanie, analýzu a riadenie hybridných systémov* s využitím lineárnej temporálnej logiky, nakoľko generátor zát'aže v rámci komunikačno-riadiacej architektúry DCS predstavuje hybridný systém s diskretnými módmami bez definovanej spojitej dynamiky, čo je zobrazené v pravej časti Obr. 3.

Generátor zát'aže DCS v podobe hybridného automatu $H = (Q, X, f, \text{Init}, \text{Dom}, E, G, R)$ je možné zapísať ako:

- množina stavov $Q = \{ \text{Pripravený}, \text{Začínajúci}, \text{Bežiaci}, \text{Pozastavený}, \text{Prerušujúci}, \text{Ukončujúci}, \text{Prerušený}, \text{Ukončený} \}$,
- stavový priestor X - generátor dát obsahuje iba 1 diskretný mód so spojitou dynamikou a tým je mód *Bežiaci*, kde sa postupne vyvíja stav jednotlivých dátových bodov, teda $X \in \mathbb{R}^n$
- spojitá dynamika f definovaná pre diskretný mód *Bežiaci*

$$x(k) = \bar{x}(z\Delta x/100.0 + 1), \quad z \in \langle -1, 1 \rangle \quad (14)$$

kde $x \in \mathbb{R}^n$, \bar{x} predstavuje strednú hodnotu dátového bodu, Δx - maximálnu prípustnú odchýlku v %,

- množina Init je definovaná ako prvok množiny diskretných módom Q *Pripravený*,
- množina Dom pre diskretný mód *Bežiaci* je definovaná ako n -rozmerný priestor $\text{Dom}(\text{Bežiaci}) = \mathbb{R}^n$,
- množina hrán E nebude uvedená z dôvodu obsiahlosti ale bude graficky znázornená v rámci grafu prechodov generátora dát,
- hraničné podmienky prepnutia G sú splnené na základe signálov od operátora alebo automatických signálov v rámci generátora dát čo bude znova viditeľné na grafe prechodov generátora dát,
- nakoľko generátor dát obsahuje iba 1 diskretný mód s definovanou spojitou dynamikou, množina prechodov R je prázdna.

Atomické propozície generátora zát'aže budú označené ako s pre stavy a c pre signály hybridného automatu generátora dát:

- $s_i; \quad i \in \{ I - \text{prerušený}, F - \text{ukončený}, R - \text{bežiaci}, P - \text{pozastavený}, S - \text{pripravený}, FC - \text{ukončujúci}, IC - \text{prerušujúci}, SC - \text{začínajúci} \}$
- $c_j; \quad j \in \{ I - \text{preruš}, R - \text{pokračuj}, F - \text{ukonči}, S - \text{začni} \}$

a na základe týchto atomických propozícií je možné zadefinovať nasledovné formuly lineárnej temporálnej logiky:

- generátor dát beží práve vtedy, ak je v diskretnom móde *Pripravený* - s_S a dostane signál *Začni* - c_S alebo je v móde *Pozastavený* - s_P a obdrží signál *Pokračuj* - c_R :

$$\Phi_1 = \mathcal{G}((s_S \wedge c_S) \vee (s_P \wedge c_R) \rightarrow s_R), \quad (15)$$

- ak sa generátor zát'aže nachádza v diskretnom móde *Bežiaci* - s_R alebo *Pozastavený* - s_P a obdrží signál *Ukonči* - c_F , tak prechádza do módu *Ukončujúci* - s_{FC} , kde pri neobdržaní signálu *Preruš* - c_I automaticky prechádza do módu *Ukončený* - s_F :

$$\Phi_2 = \mathcal{G}((s_R \vee s_P) \wedge c_F \rightarrow \mathcal{X}(s_{FC} \wedge \neg c_I) \cup s_F), \quad (16)$$

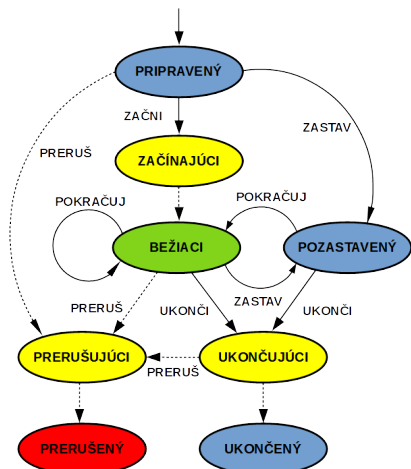
- ak sa generátor dát nachádza v diskretnom móde *Pripravený* - s_I , *Bežiaci* - s_R alebo *Ukončujúci* - s_{FC} a zároveň obdrží signál *Preruš* - c_I tak automaticky prejde do módu *Prerušujúci* - s_{IC} a následne do módu *Prerušený* - s_I :

$$\Phi_3 = \mathcal{G}((s_{FC} \vee s_S \vee s_R) \wedge c_I \rightarrow \mathcal{X}_{s_{IC}} \cup s_I), \quad (17)$$

- generátor dát sa nakoniec nachádza v diskretnom móde *Prerušený* - s_I alebo *Ukončený* - s_F :

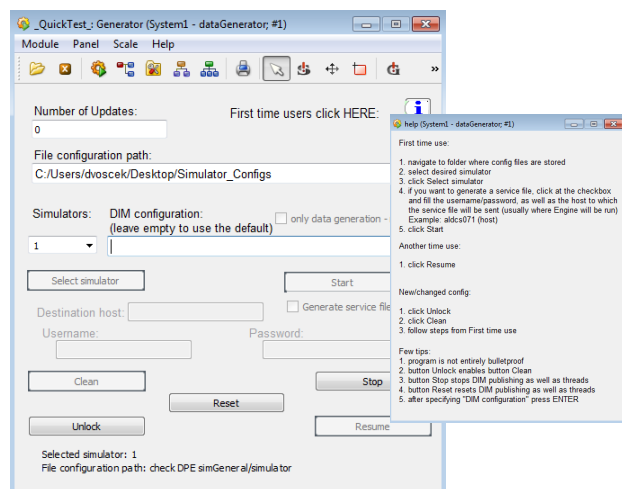
$$\Phi_4 = \mathcal{FG}(s_F \vee s_I). \quad (18)$$

Na základe popisu generátora zát'áže pomocou hybridného automatu s využitím lineárnej temporálnej logiky je možné zostrojiť orientovaný graf v podobe ako je uvedený na Obr. 30.



Obr. 30: Konečno-stavový automat generátora zát'áže pre DCS ALICE CERN

Pre vývoj a testovanie generátora zát'áže bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie v nástroji WinCC OA, Obr. 31, ktoré má implementovanú spomínanú funkcionálnosť.



Obr. 31: Užívateľské prostredie generátora zát'áže implementované vo WinCC OA

Testovanie uvedenej architektúry pomocou dlhodobého testu trvalo 37 dní. Systém pozostával zo 70 až 100 Generátorov dát, pričom každý obsahoval 1000 parametrov rôzneho dátového typu, ako aj intervalu aktualizácie. V rámci tohto dlhodobého testu bolo spracovaných 50 356 458 541 aktualizácií

parametrov, čo predstavuje ekvivalent objemu dát pre ALICE DCS v rámci trvania 4 rokov. Priemerná zát'áž bola 15 400 aktualizácií za sekundu, pričom maximálna bola vyše 30 000 aktualizácií za sekundu.

V rámci druhého testu, ktorý bol zameraný na meranie výkonu danej architektúry bolo implementovaných 100 Generátorov zát'áže pričom každý z nich publikoval 1 000 aktualizácií za sekundu, teda v celkovom objeme 100 000 aktualizácií za sekundu. Doba trvania testu bola stanovená na 3 hodiny, počas ktorých bolo publikovaných 1 080 000 hodnôt parametrov čo predstavuje ekvivalent objemu dát pre ALICE DCS v rámci trvania 1 mesiaca. Tento test navyše overoval schopnosť celej architektúry nestratiť alebo poškodiť údaje, zachovať poradie zmien DPE ako aj stabilitu celej architektúry. To bolo dosiahnuté tak, že ku 100 systémom Generátora zát'áže boli pridané dáta zo senzorov fyzikálnych veličín okolia experimentu ALICE a tie boli na druhej strane architektúry validované a vyčítavané v rovnakom poradí v akom prichádzali do systému ADAPOS.

IX. ZÁVER A DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Riešenia cieľov dizertačnej práce bolo zamerané na návrh metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie hybridných systémov či už pre systémy s viacerými spojitými dynamikami alebo pre systémy vyžadujúce supervízne riadenie a následne implementáciu tejto metodiky do distribuovaného systému riadenia. Dosiahnuté výsledky je možné rozdeliť do troch základných oblastí, či už v oblasti modelovania, analýzy alebo návrhu algoritmov riadenia hybridných systémov.

V rámci riešenia dizertačnej práce boli zostavené dva simulčné modely v programovom prostredí MATLAB/Simulink, na základe ich nelineárnych matematických modelov, ktoré sme získali analytickou identifikáciou fyzikálnych systémov *Hydraulický hybridný systém* a *Modelová aplikácia Výt'ah* (<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php>), kde pre druhú spomenutú bol využitý aj formalizmus lineárnej temporálnej logiky. Pre laboratórne modely *Modelová aplikácia hydraulického systému* (predstavujúci dve nádrže bez interakcie, <http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>) a *Modelová aplikácia Inverzného kyvadla* s lineárnym synchronným motorom (<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/multiKyv.php>) sme získali ich matematický model experimentálnou identifikáciou s využitím funkcionality Identification a Signal Processing toolbox-u programového prostredia MATLAB/Simulink. Získané matematické modely uvedených aplikácií boli následne využité v rámci analýzy a návrhu radiacích algoritmov. V rámci riešenia výskumných úloh pre experiment ALICE CERN bol vytvorený emulátor Detector Control System-u ako aj Generátor zát'áže na otestovanie navrhutej architektúry, pričom bol taktiež využitý formalizmus hybridných systémov s využitím lineárnej temporálnej logiky.

Medzi dosiahnuté výsledky v oblasti analýzy hybridných systémov patrí verifikácia a validácia jednotlivých matematických modelov uvedených aplikácií, ako aj implementácia výskumných úloh v rámci experimentu ALICE CERN a ich následná verifikácia priamo na výskumnom pracovisku.

V rámci oblasti návrhu riadenia hybridných systémov boli navrhnuté algoritmy po častiach optimálneho LQ riadenia s využitím optimalizácie kfdl'a častíc ako aj explicitného prediktívneho riadenia. Tieto algoritmy boli verifikované ako na simulačných tak aj laboratórnych systémoch (*Hydraulický hybridný systém, Modelová aplikácia hydraulického systému*) v riadiacich štruktúrach, ktoré boli volené na základe definovaných cieľoch riadenia. Pre *Modelovú aplikáciu inverzného kyvadla* s lineárnym synchronným motorom bolo navrhnuté adaptívne supervízne riadenie pozostávajúce z algoritmu výšvihy kyvadla a zo stabilizujúceho algoritmu.

Využitie modelové aplikácie laboratórnych modelov vytvárajú experimentálne pracovisko, ktoré je možné využiť pre overenie algoritmov modelovania, analýzy a riadenia hybridných systémov na základe navrhutej metodiky. Dosiahnuté výsledky sú spracované v štyroch scenároch a v rámci dvoch výskumných úloh pre experiment ALICE CERN.

POĎAKOVANIE

Dizertačná práca bola riešená v rámci projektov:

- **Univerzitný vedecký park Technicom pre inováčné aplikácie s podporou znalostných technológií - II.fáza**, kód ITMS:313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1, PP7), (2015 - 2017) (10%),
- **ALICE KE FEI TUKE (0222/2016 - 2/2016-DOT) Experiment ALICE na LHC v CERN: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach**, (2016-2020) (20%),
- grant FEI TUKE 2015-33 s názvom **Výskumné laboratórium nelineárnych podaktuovaných systémov** (Research laboratory for nonlinear underactuated systems), (1/2017 - 12/2017) (20%),
- **KEGA 072 TUKE – 4/2018: Implementácia výsledkov vedeckého výskumu v oblasti modelovania a simulácie kyberfyzikálnych systémov do výučby – tvorba moderných vysokoškolských učebníc**, (2018-2020) (50%).

LITERATÚRA

- [1] E. A. Lee, "Cyber physical systems: Design challenges," in *11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. IEEE, 2008, pp. 363–369.
- [2] J. Wan, H. Yan, H. Suo, and F. Li, "Advances in cyber-physical systems research." *TIIS*, vol. 5, no. 11, pp. 1891–1908, 2011.
- [3] R. Baheti and H. Gill, "Cyber-physical systems," *The impact of control technology*, vol. 12, no. 1, pp. 161–166, 2011.
- [4] A. J. Van Der Schaft and J. M. Schumacher, *An introduction to hybrid dynamical systems*. Springer London, 2000, vol. 251.
- [5] J. Lunze and F. Lamnabhi-Lagarigue, *Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [6] H. Lin, P. J. Antsaklis *et al.*, "Hybrid dynamical systems: An introduction to control and verification," *Foundations and Trends® in Systems and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 1–172, 2014.
- [7] J. Lygeros, K. H. Johansson, S. N. Simic, J. Zhang, and S. S. Sastry, "Dynamical properties of hybrid automata," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 48, no. 1, pp. 2–17, 2003.
- [8] J. Lygeros, C. Tomlin, and S. Sastry, "Hybrid systems: modeling, analysis and control," *preprint*, 1999.
- [9] D. VOŠČEK, A. JADLOVSKÁ, and D. GRIGL'ÁK, "Modelling, analysis and control design of hybrid dynamical systems (in print)," *Journal of Electrical Engineering*, 2019, ISSN 1339-309X.
- [10] N. Ferenčík, J. Jadlovský, M. Kopčík, and I. Zolotová, "Pi control of laboratory model elevator via ladder logic in plc," in *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), 2017 IEEE 15th International Symposium on*. IEEE, 2017, pp. 000 383–000 386.
- [11] M. Y. Vardi, "An automata-theoretic approach to linear temporal logic," in *Logics for concurrency*. Springer, 1996, pp. 238–266.
- [12] D. VOŠČEK, A. JADLOVSKÁ, and D. GRIGL'ÁK, "Modelling and analysis of the lift system as a hybrid system," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 28–34, 2017.
- [13] S. Jadlovská, J. Sarnovský, J. Vojtek, and D. Vošček, "Advanced generalized modelling of classical inverted pendulum systems," in *Emergent trends in robotics and intelligent systems*. Springer, 2015, pp. 255–264.
- [14] S. Jadlovská and J. Sarnovský, "Modelling of classical and rotary inverted pendulum systems—a generalized approach," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 12–19, 2013.
- [15] A. Jadlovská and S. Jadlovská, *Modern Methods of Modeling and Control of Nonlinear Systems*, Košice: ELFA press, 2013.
- [16] F. Ceragioli, "Some remarks on stabilization by means of discontinuous feedbacks," *Systems & control letters*, vol. 45, no. 4, pp. 271–281, 2002.
- [17] A. Jadlovská, S. Jadlovská, and D. Vošček, "Cyber-physical system implementation into the distributed control system," in *14th IFAC International conference on Programmable devices and embedded systems*, 2016, pp. 375–380, ISSN : 2405-8963.
- [18] —, "Cyber-physical system implementation into the distributed control system (preprint)," in *14th IFAC International conference on Programmable devices and embedded systems*, 2016, pp. 375–380, ISSN : 2405-8963.
- [19] J. Jadlovský, A. Jadlovská, S. Jadlovská, M. Kopčík, J. Čabala, M. Oravec, D. Vošček, M. Tkáčik, P. Chochula, and O. Pinazza, "Communication architecture of the detector control system for the inner tracking system," 2017, pp. 1930–1933.
- [20] —, "A novel general purpose data acquisition board with a dim interface," 2017.
- [21] J. Lång, A. Augustinus, P. Bond, P. Chochula, L. Lechman, O. Pinazza, and A. Kurepin, "Adapos: An architecture for publishing alice dcs conditions data," pp. 482–485, 2017.

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