

Technická univerzita v Košiciach  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

QuoVadis Research @ FEI



ročník 3, číslo 2  
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

<b>Logická analýza prirodzeného jazyka prostredníctvom transparentnej intenzionálnej logiky a lineárnej logiky</b>	
<i>Zuzana Bilanová, Liberios Vokorokos</i> .....	4-21
<b>Automatické spracovanie akustických signálov pre bezpečnostné a priemyselné aplikácie</b>	
<i>Dávid Čonka, Jozef Juhár</i> .....	21-36
<b>Hierarchické smerovacie protokoly pre viacúrovňové viacpreskokové mobilné siete s využitím kognitívneho rádia</b>	
<i>Dávid Hrabčák, Ján Papaj</i> .....	36-53
<b>Spracovanie písma pre systémy podpory rozhodovania</b>	
<i>Zuzana Hudáková, Liberios Vokorokos, Peter Drotár</i> .....	53-68
<b>Aplikácia smart DSP systému vpriemyselnej elektrotechnike</b>	
<i>Patrik Jacko, Dobroslav Kováč</i> .....	68-78
<b>Manažment rádiových zdrojov pre kognitívne mobilné ad-hoc siete</b>	
<i>Dominik Nezník, Lubomír Doboš</i> .....	78-87
<b>Nové vstupno-výstupné moduly využívajúce zákaznicke integrovane obvody pre pokročilé UWB radarové aplikácie krátkeho dosahu</b>	
<i>Martin Pečovský, Pavol Galajda</i> .....	87-95
<b>Analýza sériovej aparalelnej spolupráce DC/DC meničov</b>	
<i>Dávid Schweiner, Dobroslav Kováč</i> .....	95-105
<b>Vypočítateľná Lean Formalizácia Mriežok a Celulárnych Automatov</b>	
<i>František Silváši, Martin Tomášek</i> .....	105-112
<b>Riešenie niektorých problémov spojených svyhodnocovaním parametrov sledovaných vmultikamerových systémoch</b>	
<i>Roman Vápeník, František Jakab</i> .....	112-121

# Logická analýza prirodzeného jazyka prostredníctvom transparentnej intenzionálnej logiky a lineárnej logiky

Zuzana Bilanová

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

Liberios Vokorokos

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

**Abstrakt**—Článok sa zaoberá princípmi logickej analýzy prirodzeného jazyka a použitím jej metód v informatike. Najprv je analyzované široké spektrum logických systémov, pričom sú porovnávané tradičné logiky s netradičnými, extenzionálne logiky s intenzionálnymi a logiky prvého rádu s viacrádovými logikami. Následne sú porovnané najrozšírenejšie intenzionálne mechanizmy - Montagueova intenzionálna logika a transparentná intenzionálna logika, pričom je zistené, že druhá z nich predstavuje vhodný aparát na prepojenie s predikátovou lineárnou logikou. Je vytvorený nový originálny logický systém, nazvaný zdrojovo-orientovaná transparentná intenzionálna logika, na ktorý je aplikovaná teória Ludics a je implementovaný jeho sémantický stroj.

**KLúčové slová**—logická analýza prirodzeného jazyka, Ludics, Montagueova intenzionálna logika, Predikátová lineárna logika, sémantický stroj, transparentná intenzionálna logika

**Abstract**—The dissertation thesis deals with the principles of logical analysis of natural language and the use of its methods in computer science. Firstly, a wide range of logic systems is analyzed by comparing traditional logic with non-traditional logic, extensional logic with intensional logic, and first-order logic with high-order logic. Subsequently, the most widespread intensional mechanisms are compared - Montague's intensional logic and transparent intensional logic. It is found that the second one represents a suitable apparatus for connection with predicate linear logic. A new original logic system, called resource-oriented transparent intensional logic is created. The Ludics theory is applied to this logic and its semantic machine is implemented.

**Key words**—logical analysis of natural language, Ludics, Montague intensional logic, predicate linear logic, semantic machine, transparent intensional logic

## I. ÚVOD

Porozumenie prirodzenému jazyku je nutné pre správne usudzovanie a argumentáciu. Rozumieť výrazom prirodzeného jazyka znamená poznať ich význam. Nedokonalé porozumenie významu výrazov vedie k chybám v usudzovaní a argumentácii. Keďže logická štruktúra výrazov prirodzeného jazyka nie je zhodná s ich gramatickou štruktúrou, ich význam musí byť odhalený analýzou. Vedný odbor, ktorý sa zaoberá nachádzaním významu výrazov a riešením problémov vzniknutých kvôli chybnéj analýze premís, sa nazýva logická

analýza prirodzeného jazyka (LAPJ). Rozvíjala sa v dvoch konkurenčných školách:

- Montagueho intenzionálna logika Richarda Montaguea.
- Transparentná intenzionálna logika Pavla Tichého.

Oba spomenuté logické systémy možno považovať za “revolučné” minimálne preto, že ich autori pre popis sémantiky výrazov vytvorili dovedy neexistujúce spojenie medzi vednými disciplínami logiky a lingvistiky. Nasledovníci Montagueho a Tichého ukázali, že oba prístupy majú široké spektrum použitia a neobmedzujú sa len na oblasti logiky a lingvistiky, uplatniteľné sú aj v analytickej filozofii alebo informatike.

S nutnosťou efektívneho riešenia širokého spektra sémantických problémov je spätá značná expresívnosť intenzionálnych logických systémov. Daňou za ich expresívnosť je nemožnosť vytvorenia komplexného logického kalkulu a zároveň s tým súvisiaca strata plnej automatizácie. Transparentná intenzionálna logika a Montagueova intenzionálna logika preto zatiaľ predstavujú aparáty používané predovšetkým v oblasti teoretickej informatiky. Jednou z možností, ako umožniť ich použitie v nových teoretických oblastiach a aj v praxi, je nájsť ich prepojenie s iným kompatibilným logickým systémom, ktorý nemá problém s automatizáciou. Vhodným aparátom pre tento účel sa ukázala byť predikátová lineárna logika. Nadstavbou predikátovej lineárnej logiky je teória Ludics, pomocou ktorej je možné modelovať dialógy prirodzenej reči v podobe polarizovanej hry.

Na základe predostretých faktov je ďalší text článku rozdelený do nasledujúcich častí:

- Kapitola II: Podrobná analýza konkurenčných prístupov v logickej analýze prirodzeného jazyka - Montagueho intenzionálnej logiky a transparentnej intenzionálnej logiky.
- Kapitola III: Je skúmané, či predikátová lineárna logika predstavuje adekvátny systém pre formalizovanie viet prirodzeného jazyka, pričom je popísaná jej syntax, sémantika, dokazovací kalkul a teória Ludics.
- Kapitola IV: Syntéza vybranej intenzionálnej logiky a

lineárnej logiky na syntakticko-sémantickej úrovni a na úrovni dokazovacieho kalkulu. Zároveň je konštruovaný logický dôkaz vety prirodzeného jazyka, pričom táto veta je súčasťou dialógu, ktorý je použitím princípov teórie Ludics skúmaný z hľadiska interakcií jeho aktérov.

- Kapitola V: Predstavenie implementácie prototypu sémantického stroja zdrojovo-orientovanej logiky intenzionálneho charakteru, ktorý umožňuje automatizovaný preklad výrazov prirodzeného jazyka do konštrukcií zachytávajúcich ich zmysel.

## II. ROZBOR VYBRANÝCH LOGICKÝCH SYSTÉMOV LAPJ

Ako už bolo naznačené, LAPJ predstavuje nástroj odhaľujúci nejednoznačnosť prirodzeného jazyka. Zároveň umožňuje lepšie rozumieť konkrétnym tvrdeniam a vyvodzovať z nich dôsledky. Ako vedná disciplína sa začala rozvíjať v 70. rokoch minulého storočia pričinením Richarda Montagueho [1], amerického matematika špecializujúceho sa na modálne logiky. Montague predstavil prvý systematický pokus [2] o aplikovanie logických metód na dovtedy výlučne lingvistickú oblasť skúmania významu prirodzených jazykov. Zhruba v rovnakom čase, keď Montague formuloval prvotný náčrt jeho intenzionálnej logiky [3], Pavel Tichý nezávisle od neho prišiel so svojou vlastnou logikou [4], ktorá Montagueovej verzii konkurovala. Nasledujúce podkapitoly obsahujú rozbor spomínaných konkurenčných logík, pričom obidva logické mechanizmy v závere kapitoly porovnáme, aby mohol byť pre ďalší postup práce vybraný vyhovujúci systém spĺňajúci konkrétne požiadavky.

### A. Montagueova intenzionálna logika

Montague tvrdil, že syntax a sémantika prirodzených jazykov a formálnych logických jazykov je veľmi podobná [5]. Zároveň bol presvedčený, že je možné opísať ich jedinou matematicky presnou teóriou. Pri vytváraní tejto teórie použil prvky modelovo-teoretickej sémantiky, teórie typov,  $\lambda$ -kalkulu a intenzionálne princípy.

Montague, podobne ako Gottlob Frege, kvôli zachovaniu extenzionálneho princípu skladobnosti zastával myšlienku kontextualizmu [6]. Skutočnosť, že zmysel výrazu závisí od kontextu sa odzrkadlila aj na Montagueovom prístupe k intenziám. Zmysel výrazu je v jeho systéme štandardne extenzionálny, intenzionálny bol len v kontextoch, v ktorých to bolo nevyhnutné [7]. Aby mohol prechádzať od extenzionálneho charakteru výrazu  $E$  k intenzionálnemu (a naopak), definuje dva operátory:

- unárny intenzionalizujúci operátor  $\wedge E$  zvyšujúci rád intenzie, ktorý transformuje výraz  $E$  na výraz, ktorého extenziou je intenzia  $E$ ,
- unárny extenzionalizujúci operátor  $\vee$  znižujúci rád intenzie, ktorý je inverzný k  $\wedge$ ,

pre ktoré platí:

$$\begin{aligned} \text{extenzia } \wedge E &= \text{intenzia } E \\ \text{intenzia } \vee E &= \text{extenzia } E \\ \wedge \vee E &= \vee \wedge E = E \end{aligned} \quad (1)$$

1) *Princípy Montagueovho prístupu*: Montague svojej intenzionálnej logike (MIL) dodal reálny charakter tým, že jej použitie demonštroval na fragmente anglického jazyka. Teória MIL pozostáva z dvoch zložiek – syntactickej a sémantickej [8], ktoré spolu interagujú.

Syntaktická analýza je Montagueom v MIL používaná ako nástroj na eliminovanie viacznačnosti výrazov. Súčasťou syntaxe je:

- Slovník - množina lexikálnych jednotiek používaných v demonštračnom fragmente anglického jazyka.
- Základné (a z nich odvodené) kategórie - na zachytenie výrazov je použitá kategoriálna gramatika, kde sú zo základných kategórií  $e_C$  a  $t_C$  (kategória individuových výrazov, tzv. entít a kategória výrazov pravdivostných hodnôt) vytvárané odvodené kategórie.
- Syntaktické pravidlá - definujú spôsob, akým sú výrazy jednotlivých kategórií zret'azované do zložených výrazov. Je ich 17, označujú sa symbolicky S1 - S17.

V MIL je prirodzený jazyk interpretovaný prostredníctvom jazyka intenzionálnej logiky. V sémantickej časti Montagueovho aparátu je každému výrazu prirodzeného jazyka patriacemu do určitej kategórie priradená množina výrazov intenzionálneho logického jazyka.

Sémantická časť MIL pozostáva z definície:

- Syntaxe jazyka intenzionálnej logiky - použitie pojmov z teórie typov, kde sú zo základných typov entít  $e_T$ , pravdivostných hodnôt  $t_T$  a možných svetov  $s_T$  rekurzívnymi pravidlami vytvárané odvodené typy. Rozlišujú sa funkčné odvodené typy a intenzionálne odvodené typy:

#### Definícia II.1.

*Funkčné odvodené typy  $\langle a_T, b_T \rangle$  sú funkcie z výrazov typu  $a_T$  do výrazov typu  $b_T$ , kde  $a_T, b_T$  sú typy.*

#### Definícia II.2.

*Intenzionálne odvodené typy  $\langle s_T, a_T \rangle$  sú funkcie z možných svetov do výrazov typu  $a_T$ , pre každý typ  $a_T$ .*

- Sémantiky jazyka intenzionálnej logiky [9] - zmysluplným výrazom jazyka intenzionálnej logiky je priradený jedinečný denotát, na základe interpretácie  $U$ , ktorá je intenzionálnym modelom MIL. Platí:

#### Definícia II.3.

*Interpretácia  $U$  je päťica  $\langle A, I, J, \leq, G \rangle$ , kde*

- $A$  je neprázdna množina individuí,
- $I$  je neprázdna množina možných svetov,
- $J$  je neprázdna množina časových momentov,
- $\leq$  je lineárne usporiadanie na množine časových okamihov  $J$ ,
- $G$  je funkcia priradujúca nelogickým konštantám všetkých typov denotát.

- Sémantických (resp. prekladových) pravidiel - každému syntaktickému pravidlu MIL prislúcha jedno zodpovedajúce sémantické pravidlo, takže je ich 17, označujú sa T1 - T17.

Medzi syntaktickými kategóriami a sémantickými typmi je zjavná korešpondencia [10]. Pre funkciu  $f$  z množiny syntaktických kategórií prirodzeného jazyka  $Cat$  do množiny sémantických typov logického intenzionálneho jazyka  $Type$  platí, že:

**Definícia II.4.**

Ak  $f : Cat \rightarrow Type$ , tak:

- $f(e_C) = e_T$ ,
- $f(t_C) = t_T$ ,
- $f(A_C/B_C) = f(A_C // B_C) = \langle \langle t, f(B_T) \rangle, f(A_T) \rangle$ .

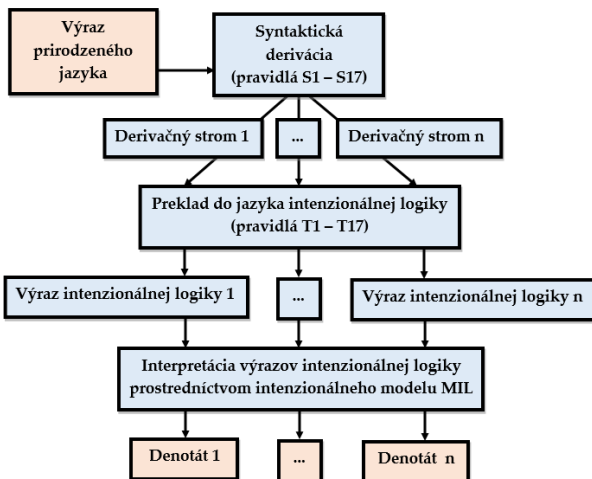
Na demonštrovanie uvedených princípov posluží Tabuľka I, ktorá zachytáva niektoré z kategórií výrazov MIL spolu s ich definíciou, korešpondujúcimi typmi a príkladmi lexikálnych jednotiek slovníka.

TABUĽKA I  
KATEGÓRIE A TYPY MIL

Kategór.	Typ	Skratka	Pomenovanie kategórií	Slovník
$t_C$	t	Zákl. kat.	Výrazy pravd. hodnôt	-
$e_C$	e	Zákl. kat.	Indiv.výrazy	-
$t_C/e_C$	$\langle \langle s,e \rangle, t \rangle$	$IV_C$	Neprechodné slovesá	run
$t_C/IV_C$	$\langle \langle s, \langle \langle s,e \rangle, t \rangle, t \rangle$	$T_C$	Termy	John
$IV_C/T_C$	$\langle \langle s, \langle \langle s, \langle \langle s,e \rangle, t \rangle, t \rangle, t \rangle, \langle \langle s,e \rangle, t \rangle \rangle$	$TV_C$	Prech. slovesá	find
$t_C//e_C$	$\langle \langle s,e \rangle, t \rangle$	$CN_C$	Podstatné mená	man
$IV_C/t_C$	$\langle \langle s,t \rangle, \langle \langle s,e \rangle, t \rangle \rangle$	-	Slovesá uvádz. vedľajšiu vetu	believe that

Po popísaní základných charakteristík MIL je ich demonštrálne aplikujeme na konkrétnu vetu prirodzeného jazyka.

2) Aplikácia MIL na vetu prirodzeného jazyka: Výrazy prirodzeného jazyka sú najprv preložené do logického jazyka intenzionálnej logiky a následne je ich význam interpretovaný prostredníctvom intenzionálneho modelu MIL [11]. Tento proces (viď Obrázok 1) pozostáva z daných krokov:



Obr. 1. Fázy spracovania výrazu prirodzeného jazyka v MIL

- 1) Vstupom je gramaticky korektný výraz prirodzeného jazyka v podobe lineárneho reťazca znakov.
- 2) Prebieha syntaktická analýza vstupného výrazu reprezentovaná derivačnými stromami - zisťuje sa, z akých lexikálnych jednotiek sa daný výraz skladá, a ktoré syntaktické pravidlá boli použité pri jeho konštruovaní.
- 3) Prebieha sémantická analýza vstupného výrazu reprezentovaná prekladovými stromami.<sup>1</sup>
- 4) Vzniknuté výrazy intenzionálnej logiky sú pre zachytenie ich zmyslu interpretované prostredníctvom intenzionálneho modelu MIL.
- 5) Výstupom sú denotáty výrazu prirodzeného jazyka.

Uvažujme nad vetou:

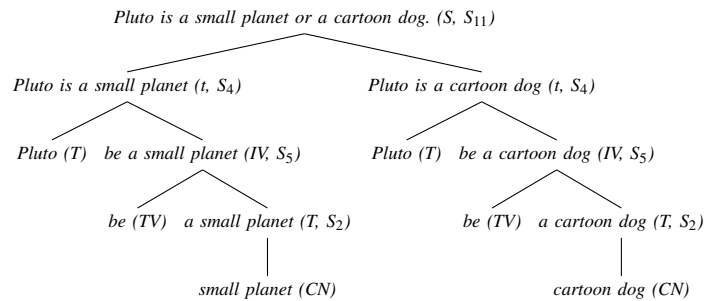
**Príklad II.1.**

*Pluto is a small planet or a cartoon dog.*

Veta z príkladu II.1 je písaná v anglickom jazyku preto, lebo metóda MIL nie je univerzálna, je spätá s konkrétnym prirodzeným jazykom, pre ktorý bola navrhnutá. Lexikálne jednotky vety prislúchajú nasledujúcim kategóriám z Montagueovej kategoriálnej gramatiky:

- “*Pluto*” je z kategórie termov  $T_C$ ,
- “*be*” je z kategórie prechodných sloves  $TV_C$ ,
- “*small\_planet*”, “*cartoon\_dog*” sú z kategórie podstatných mien  $CN_C$ <sup>2</sup>.

Na Obrázku 2 je zachytená syntaktická derivácia skúmanej vety, v ktorej sa postupuje smerom zhora nadol. Použité syntaktické pravidlá určujú, akým spôsobom sú základné syntaktické jednotky zlučované do väčších celkov.



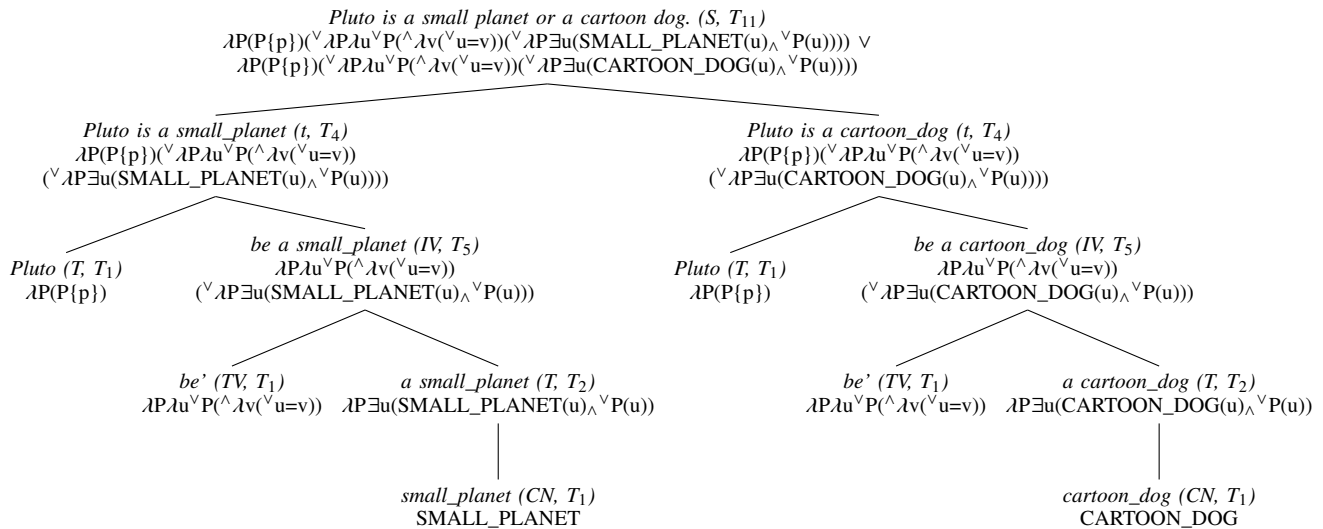
Obr. 2. Syntaktická derivácia vety “*Pluto is a small planet or a cartoon dog.*”

V príklade z Obrázka 2 sú použité nasledujúce syntaktické pravidlá, pričom symbol  $\times$  predstavuje zret'azenie:

- $S_2: a/an \times CN_C \rightarrow T_C$ ,
- $S_4: T_C \times IV_C \rightarrow t_C$ , zároveň je prvý výskyt slovesa v  $IV$  nahradený jeho tvarom v 3. osobe jednotného čísla,

<sup>1</sup>Pre každé syntaktické pravidlo existuje kompatibilné prekladové pravidlo. Pravidlá sú striktné lokálne, čo znamená, že žiadne pravidlo nepristupuje k predošlým alebo nadchádzajúcim etapám derivácie resp. prekladu.

<sup>2</sup>Keďže kategoriálna gramatika MIL neobsahuje kategóriu prídavných mien, sme nútení nazerať na “*small\_planet*” a “*cartoon\_dog*” ako na zložené podstatné mená.



Obr. 3. Preklad vety “Pluto is a small planet or a cartoon dog.” do logického jazyka

- $S_5: TV_C \times T_C \rightarrow IV_C$ ,
- $S_{11}: t_C \times t_C \rightarrow t_C$ .

Na Obrázku 3 je zachytený preklad skúmanej vety do jazyka intenzionálnej logiky a jej interpretácia prostredníctvom intenzionálneho modelu MIL. Tento derivačný strom sa podobá na syntaktický strom z Obrázku 2, no pri použití sémantických pravidiel sa v ňom postupuje smerom zdola nahor.

V príklade z Obrázku 3 sú použité nasledujúce sémantické pravidlá (symbol  $\mapsto$  je použitý v zmysle “prekladá sa na”, symboly  $\theta, \vartheta$  reprezentujú prekladaný výraz a  $\theta', \vartheta'$  zastupujú výsledok prekladu do intenzionálneho logického jazyka):

- $T_1: \theta \mapsto \theta'$ , kde  $\theta'$  predstavuje preklad lexikálnych jednotiek do logického jazyka (napr. man  $\mapsto$  MAN). *Be* a *Pluto* predstavujú výnimku z tohto pravidla a prekladajú sa nasledovne:
  - $be \mapsto \lambda P P \lambda u \vee P P (\vee \lambda v (\vee u = v))$ ,
  - $Pluto \mapsto \lambda P (P\{p\})$ ,
- $T_2: (\theta) \mapsto \lambda P \exists u (\theta'(u) \wedge P(u))$ ,
- $T_4, T_5: (\theta, \vartheta) \mapsto \theta' (\wedge \vartheta')$ ,
- $T_{11}: (\theta, \vartheta) \mapsto (\theta' \vee \vartheta')$ .

### B. Transparentná intenzionálna logika

Pavel Tichý od 60. rokov minulého storočia so záujmom sledoval Montagueove prelomové práce, v ktorých našiel inšpiráciu pre vytvorenie svojho životného diela. Tým bol koncept jeho vlastnej verzie intenzionálnej logiky, tzv. transparentnej intenzionálnej logiky (TIL) [12] a zavedenie pojmu konštrukcií [13] do LAPJ. TIL je logikou vyššieho rádu s rozvetvenou hierarchiou typov [14] a stala sa základom pre procedurálnu sémantiku [15]. Jej jazykom je modifikovaná verzia typovaného  $\lambda$ -kalkulu. TIL je mimoriadne expresívnym systémom - dokáže zachytiť dostatočne jemne väčšinu hovorových javov v ich logickej podobe. V oblasti informatiky sa používa pri databázovom modelovaní HIT modelom, alebo

na automatizovanú reprezentáciu významu viet prirodzeného jazyka v podobe logických objektov.

Podobne ako v MIL je aj v TIL rešpektovaný intenzionálny princíp skladobnosti. TIL je však na rozdiel od MIL antikontextualistickou logikou [16]. Tichý odmietol Montagueovo a Fregeho presvedčenie, že zmysel výrazu závisí od kontextu, v ktorom sa nachádza, aby sa vyhol neprijemnému dôsledku kontextualizmu - nie je možné určiť zmysel výrazu, pokiaľ nie je jednoznačný jeho kontext. V TIL je denotát výrazu rovnaký v každom kontexte. Dôsledkom Tichého odmietnutia kontextualizmu je, že zmyslom empirického výrazu je vždy jeho intenzia. Aby Tichý túto myšlienku zdôraznil, nazval svoju intenzionálnu logiku transparentnou - čo je zmyslom denotátu, je v TIL vždy jasné, priehľadné.

1) *TIL ako typovaná logika*: V TIL sa používa nekonečná rozvetvená hierarchia typov [17], kde najnižšia typová úroveň obsahuje základné nefunkcionálne objekty 1. rádu resp. najjednoduchšie entity prirodzeného jazyka. Tichý rozšíril Churchovu teóriu jednoduchých typov [18], ktorú je možné zovšeobecniť nasledujúcou definíciou:

#### Definícia II.5.

Nech  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$  sú ľubovoľné typy objektov. Potom platí, že  $\alpha$  je typ,  $(\beta\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  je typ a nič iné nie je typ.

tým, že do nej okrem množiny individuí a pravdivostných hodnôt pridal časopriestorovú zložku. Objektová báza  $B$  v TIL obsahuje:

- množinu pravdivostných hodnôt  $o$  - nadobúda hodnoty *true/false*, popisujúce pravdivosť výrazov prirodzeného jazyka<sup>3</sup>,
- množinu individuí nazývanú Univerzum  $\iota$  - väčšinou vlastné mená individuí extenzionálneho charakteru,

<sup>3</sup>Kvôli tomu, že TIL pracuje s parciálnymi funkciami, ktoré v niektorých prípadoch nemusia vracaať žiadnu návratovú hodnotu, je možné v TIL uvažovať nad tret'ou návratovou hodnotou vyjadrujúcou “možno” alebo “neviem”.

- množinu časových okamihov (resp. reálnych čísel)  $\tau$  - každé reálne číslo zodpovedá časovému okamihu,
- množinu možných svetov  $\omega$  - logický priestor umožňujúci zachytenie intenzionálneho charakteru výrazov.

Hierarchia typov v TIL umožňuje konštruovať objekty nad objektovou bázou  $B$  ako funkcie nad touto bázou - typy 1. rádu sú množiny parciálnych funkcií nad  $B = o, \iota, \tau, \omega$  [19]. Uvažujme nad vlastnosťou:

**Príklad II.2.**

“byť najpredávanjšou knihou roka 2005”

V TIL môžeme zaviesť funkciu ( $\omega \rightarrow (\tau \rightarrow (\iota \rightarrow o)$ )), ktorá v určitom možnom svete a časovom okamihu priradí skúmanému individuu pravdivostnú hodnotu podľa toho, či v danom svete a časovom okamihu nadobúda vlastnosť z príkladu II.2. Pre tieto funkcionálne objekty 1. rádu platí:

**Definícia II.6.**

Funkcionálne entity 1. rádu ( $\beta\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ) sú parciálne funkcie typu  $\alpha_1 \dots \alpha_n$  s hodnotami v  $\beta$ , pričom  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$  sú typy 1. rádu.

Vychádzajúc z tejto definície môžeme intenzie empirických výrazov v TIL zaviesť nasledujúcim spôsobom:

**Definícia II.7.**

( $\alpha$ -)intenzie sú objekty typu ( $(\alpha\tau)\omega$ ), predstavujúce funkcie zo svetamihov do prvkov ľubovoľného typu  $\alpha$ .

Zápis ( $(\alpha\tau)\omega$ ) býva v TIL zjednodušený do tvaru  $\alpha\tau\omega$ . Uvedená definícia sa vzťahuje len na empirické výrazy, no TIL umožňuje zachytiť aj význam analytických a matematických tvrdení [20]. Rozdiel medzi nimi je zachytený v Tabuľke II.

TABUĽKA II  
POROVNANIE MATEMATICKÝCH, ANALYTICKÝCH A EMPIRICKÝCH  
VÝRAZOV V TIL

	Matem. výraz	Analytický výraz	Empirický výraz
Je pravdivosť výrazu jednoznačná?	Áno	Áno	Nie
Má výraz vždy zmysel?	Áno	Áno	Nie
Čo je zmyslom výrazu?	Extenzia	Triviálna intenzia	Intenzia
Príklad	$7=7$	Každý vdove zomrel manžel.	Najmenší človek v Košiciach.

Matematické a analytické výrazy vždy vyjadrujú nejaký zmysel, no pri empirických tvrdeniach to vždy neplatí (napr. tvrdenie “umocniť Eleonóru Akvitánsku na druhú” je nezmyselné). Zmyslom matematických výrazov je vždy extenzia, empirických netriviálna intenzia - funkcia z množiny svetamihov do pravdivostných hodnôt, a pri analytických výrazoch je zmyslom triviálna intenzia - denotátom je rovnaká pravdivostná hodnota vo všetkých svetamihoch.

Tabuľka III zachytáva niektoré z často používaných extenzií v TIL:

TABUĽKA III  
TYPY EXTENZIÍ V TIL

Typ	Popis	Príklad
( $oo$ )	Binárne logické operátory	$\wedge, \vee, \supset, \equiv$
( $o$ )	Unárny logický operátor	$\neg$
( $o(o\alpha)$ )	Kvantifikátory pre typ $\alpha$	$\forall, \exists$
( $o\alpha$ )	Trieda objektov typu $\alpha$	prvočíslo

Tabuľka IV zachytáva niektoré z často používaných intenzií v TIL:

TABUĽKA IV  
TYPY INTENZIÍ V TIL

Typ	Popis	Príklad
$o\tau\omega$	Propozície	pes šteká
( $o\iota$ ) $\tau\omega$	Vlastnosti objektov typu $\alpha$	byť múdry
$\iota\tau\omega$	Individuové role	najkrajšia žena na svete
$\tau\tau\omega$	Veličiny	počet smrteľných hriechov
( $u$ ) $\tau\omega$	Atribúty	byť prezident niečoho
( $o\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ) $\tau\omega$	Empirické vzťahy medzi objektami typu $\alpha_1, \dots, \alpha_n$	byť krajší než
( $o\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ) $\tau\omega$	Neempirické vzťahy medzi objektami typu $\alpha_1, \dots, \alpha_n$	väčšie číslo než iné číslo
( $ou$ ) $\tau\omega$	Binárne vzťahy medzi individuuami	ľúbiť
(( $o\iota$ ) $\tau\omega$ ) $\tau\omega$	Propozičné postoje	vedieť, že nejaká propozícia je pravdivá

2) TIL ako procedurálna logika: TIL je priamou metódou na interpretáciu významu výrazu, preto v nej nie je potrebné robiť medzikrok v podobe prekladu výrazu do intenzionálneho logického jazyka. Zmysel výrazu je v TIL štruktúrovaný objekt, ktorého logická štruktúra je odvoditeľná z gramatickej štruktúry výrazu. Zmysel sa vyjadruje pomocou abstraktných mimojazykových algoritmicky štruktúrovaných procedúr nazývaných konštrukcie.

Konštrukcie [21] môžu byť:

- 1) Premenné ‘ $x$ ’ sú atomické konštrukcie, ktoré konštruujú objekty v závislosti na ich valuácii
- 2) Trivializácia ‘ ${}^0X$ ’ je atomická konštrukcia, ktorá konštruuje objekt  $X$  bez akejkol'vek zmeny. Trivializácie umožňujú budovať rozvetvenú hierarchiu typov v TIL, lebo trivializáciou konštrukcie je možné vytvoriť konštrukciu vyššieho rádu.
- 3) Kompozícia je konštrukcia, pomocou ktorej je identifikovaná konštruovaná funkcia a jej argumenty a táto funkcia je následne aplikovaná na dané argumenty.
- 4) Uzáver ‘ $\lambda x_1, \dots, x_n X$ ’ - konštruuje parciálnu funkciu  $f$  abstrakciou od hodnôt jej argumentov. Táto operácia je duálna ku kompozícii.

Objekty objektovej bázy  $B = o, \iota, \tau, \omega$  nie sú konštrukciami. Umožňujú konštruovať objekty nad objektovou bázou  $B$  ako funkcie nad touto bázou, a tak budovať rozvetvenú hierarchiu





výrazu v supozícii de dicto a de re. Logický aparát TIL je zároveň veľmi prehľadný, lebo Tichý odmietol interpretáciu zmyslu výrazov prirodzeného jazyka cez iný logický intenzionálny jazyk tak, ako to bolo nutné u Montaguea, a zmysel interpretoval priamou elegantnou metódou.

Napriek mnohým nedostatkom je MIL najrozšírenejším prístupom v rámci LAPJ, s veľmi pozitívnym medzinárodným ohlasom. Naopak TIL dlhoročne zostáva na okraji logického aj lingvistického diskurzu. Dôvodom môže byť skutočnosť, že Montagueho teória bola vytvorená ako prvá, ako aj to, že technický aparát TIL je nesmierne komplikovaný a nie je ho možné plne automatizovať.

Ďalšie porovnanie MIL a TIL je zachytené v Tabuľke V.

TABUĽKA V  
POROVNANIE MIL A TIL

Skúmaná vlastnosť intenzionálnej logiky	MIL	TIL
Medzinárodná rozšírenosť	+	-
Možnosť plnej automatizácie	+	-
Jednoduchosť logického aparátu	+	-
Jednoduchosť aplikácie na výraz prirodzeného jazyka	-	+
Priama metóda interpretácie	-	+
Antikontextualizmus	-	+
Zmyslom je vždy intenzia	-	+
Bez nutnosti definovania špeciálnych operátorov	-	+
Použitelnosť na všetky výrazy jedného prírod. jazyka	-	+
Použitelnosť na všetky prirodzené jazyky	-	+
Hyperintenzionálna úroveň	-	+

Doterajšie kapitoly mali identifikovať efektívny a univerzálny mechanizmus LAPJ, ktorý má čo najväčšiu expresívnu silu. Takýmto systémom sa ukázala byť Tichého TIL. Niektoré z jej nedostatkov by mohli byť odstránené prepojením TIL s iným logickým systémom, ktorý by navyše umožnil zväčšiť vyjadrovaciu silu pôvodného aparátu. Ako ukážeme v nasledujúcich kapitolách, takýmto systémom by mohla byť predikátová lineárna logika.

### III. PREDIKÁTOVÁ LINEÁRNA LOGIKA

V tradičných logikách sú preberané fakty nemenné a vždy pravdivé, preto reálny svet popisujú len formuly lineárnej logiky, ktorá zachytáva problémy spojené s obmedzeným množstvom zdrojov. Lineárna logika zavádza lineárnu implikáciu ‘ $\multimap$ ’, kde zápis  $P \multimap R$  čítame ako “spotrebovanie  $P$  poskytuje  $R$ ”. Každá formula v nej predstavuje zdroj, akciu, reakciu alebo literál.

Lineárna logika bola ako formalizmus popisujúci problémy s explicitne stanoveným množstvom zdrojov, formulovaná francúzskym logikom Jean-Yves Girardom v roku 1987 [23]. Predstavuje neklasickú logiku akcií a zdrojov, je zovšeobecnením výrokovvej, predikátovej a intuicionistickej logiky. Keďže intenzie výrazov prirodzeného jazyka je možné popísať pomocou predikátov, ktoré možno identifikovať aj v Tabuľke IV v podkapitole II-B1 (vlastnosti objektov, atribúty, vzťahy medzi objektami...), musíme zaviesť predikátovú lineárnu logiku (PLL) [24].

#### A. Syntax PLL

Syntax predikátových lineárnych formúl  $\varphi$  a lineárnych termov  $t$  (každá premenná sa v lineárnom terme  $t$  vyskytuje najviac jedenkrát) je možné vyjadriť nasledujúcou gramatikou v tvare BNF [25]:

$$\begin{aligned} \varphi & ::= p \mid 1 \mid 0 \mid \perp \mid \top \mid P(t, \dots, t) \mid \varphi \otimes \varphi \mid \varphi \wp \varphi \mid \varphi \oplus \varphi \mid \\ & \varphi \& \varphi \mid \varphi \multimap \varphi \mid \varphi^\perp \mid !\varphi \mid ?\varphi \mid (\forall x)\varphi \mid (\exists x)\varphi, \\ t & ::= x \mid c \mid f(t, \dots, t). \end{aligned} \tag{2}$$

Význam symbolov PLL [26] je nasledovný:

- ‘ $p$ ’ sú elementárne formuly,
- ‘1’, ‘0’, ‘ $\perp$ ’, ‘ $\top$ ’ sú logické konštanty - nulárne funkčné symboly, ktoré predstavujú neutrálne prvky binárnych logických spojok, kde
  - ‘1’ je neutrálny prvok pre  $\otimes$  reprezentujúci logický zmysel,
  - ‘ $\top$ ’ je neutrálny prvok pre  $\&$  reprezentujúci logickú pravdu,
  - ‘ $\perp$ ’ je neutrálny prvok pre  $\wp$  reprezentujúci logický nezmysel,
  - ‘0’ je neutrálny prvok pre  $\oplus$  reprezentujúci logickú nepravdu,
- ‘ $P(t, \dots, t)$ ’ sú atomické predikáty - predstavujú aplikáciu predikátového symbolu  $P$  na konečný počet lineárnych termov  $t$ ,
- ‘ $\otimes$ ’, ‘ $\wp$ ’ sú binárne multiplikatívne logické spojky, kde
  - $\varphi \otimes \psi$  - obe akcie budú uskutočnené súčasne,
  - $\varphi \wp \psi$  - ak sa nevykoná prvá akcia, potom sa vykoná druhá akcia, alebo naopak,
- ‘ $\oplus$ ’, ‘ $\&$ ’ sú binárne aditívne logické spojky, kde
  - $\varphi \oplus \psi$  - možnosť voľby medzi akciami, kde vykonaná môže byť len z nich, pričom voľba nezávisí na používateľovi (vnútorný nedeterminizmus),
  - $\varphi \& \psi$  - možnosť voľby medzi akciami, kde vykonaná môže byť len z nich, pričom voľba závisí na používateľovi alebo vyplýva z kontextu (vonkajší nedeterminizmus),
- ‘ $\multimap$ ’ je binárna lineárna implikácia - predpoklad implikácie sa po jej použití spotreboval, čo sa označuje ako  $\varphi^\perp$
- ‘ $(.)^\perp$ ’ je unárna negácia - zachytáva spotrebu zdroja, pričom platí:
  - dualita - akcia  $\varphi$  = reakcia  $\varphi^\perp$
  - lineárna negácia je involutívna -  $\varphi^{\perp\perp} \equiv \varphi$ .
- ‘!’ - “samozrejme” a ‘?’ - “prečo nie” sú exponenciály (resp. modálne operátory):
  - $!\varphi$  - zdroj  $\varphi$  je k dispozícii na nekonečne veľá spotrebovaní,
  - $?\varphi$  - používa sa na vyjadrenie *potencionálnej* nevyčerpatel'nosti zdroja  $\varphi$ ,
- ‘ $\forall$ ’ je univerzálny kvantifikátor a ‘ $\exists$ ’ je k nemu duálny existenčný kvantifikátor - kvantifikujú premennú  $x$ .

- ‘ $x$ ’ je premenná,
- ‘ $c$ ’ je konštanta,
- ‘ $f(t, \dots, t)$ ’ sú funkčné symboly aplikované na lineárne termy  $t$ .

Zavedenie syntaxe PLL ukázalo viaceré výhody [27], ktoré mechanizmus TIL nemá a kvôli ktorým je vhodným systémom na ich prepojenie. Z hľadiska LAPJ sú najzaujímavejšie tieto:

- Konštantami PLL je možné zachytiť nielen pravdivosť  $(\top, 0)$ , ale aj zmysel  $(1, \perp)$  výrazov v tvare predikátových lineárnych formúl.
- PLL má až dve konjunkcie a dve disjunkcie, kvôli ktorým je mimoriadne expresívnym systémom.
- Operátory  $\&$  a  $\oplus$  popisujú závislú a nezávislú voľbu indivídua.
- Schopnosť PLL popisovať spotrebu zdrojov umožňuje špeciálnym spôsobom popísať meniace sa stavy sveta.

### B. Sémantika PLL

Z hľadiska tejto práce je sémantiku PLL [28] vhodné vyjadriť pomocou Kripkeho modelu možných svetov, ktorý sa používa pre popis sémantiky logických systémov zaoberajúcich sa zmyslom formúl na základe Heytingovej sémantickej tradície. Pred vysvetlením pojmu Kripkeho model musíme definovať, čo je to Kripkeho rámec.

#### Definícia III.1.

Nech  $Prop$  je množina obsahujúca všetky formuly predikátovej lineárnej logiky, potom Kripkeho rámec je trojica

$$(W, \leq, \{D_w : w \in W\}) \quad (3)$$

kde

- $W$  je neprázdna konečná množina možných svetov taká, že  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , kde  $n \in \mathbb{N}$ ,
- $\leq$  je binárna relácia dosiahnuteľnosti medzi možnými svetmi taká, že

$$\leq \subseteq D_w \times D_w \quad (4)$$

–  $D_w$  je neprázdna kolekcia zhora uzavretých podmnožín  $W$ , pričom ak  $w \leq w'$  (čo reprezentuje, že svet  $w'$  je dosiahnuteľný zo sveta  $w$ ) tak potom  $D_w \subseteq D_{w'}$ ,

- $w$  je aktuálny svet (v ktorom sa formula vyhodnocuje), pričom  $w \in W$ .

Rozšírením Kripkeho rámca o pravdivostnú reláciu  $\models$ , pre ktorú platí  $\models: W \times Prop$ , je možné popísať Kripkeho model  $M_K$  ako usporiadanú štvoricu

$$M_K = (W, \leq, \models, \{D_w : w \in W\}) \quad (5)$$

Pravdivostná relácia  $\models$  v sémantike PLL formulovanej pomocou Kripkeho modelu [29] sa zvykne členiť na:

- extenzionálnu  $\models_e: W \times Prop \rightarrow \{\top, 0\}$ , kde  $\models_e(w_n, p)$  priradí elementárnej lineárnej formule  $p$  vo svete  $w_n$

hodnotu z množiny  $\{\top, 0\}$ , reprezentujúcej pravdivosť resp. nepravdivosť formuly,

- a intenzionálnu  $\models_i: W \times Prop \rightarrow \{1, \perp\}$ , kde  $\models_i(w_n, p)$  priradí elementárnej lineárnej formule  $p$  vo svete  $w_n$  hodnotu z množiny  $\{1, \perp\}$ , reprezentujúcej zmysel resp. nezmysel formuly.

Zápis  $M_K, w \models_e \varphi$  je možné prečítať ako “predikátová lineárna formula  $\varphi$  je pravdivá vo svete  $w$ , v modeli  $M_K = (W, \leq, \models_e, w)$ ”. Analogicky, zápis  $M_K, w \models_i \varphi$  je možné prečítať ako “predikátová lineárna formula  $\varphi$  má zmysel vo svete  $w$ , v modeli  $M_K = (W, \leq, \models_i, w)$ ”.

Intuitívne by sa mohlo zdať byť vhodné interpretovať len intenzionálny fragment PLL, lebo logické systémy využívané v oblasti logickej analýzy prirodzeného jazyka majú vždy intenzionálny charakter. Fragmentácia PLL by však viedla k zníženiu jej expresívnej sily (viď záver podkapitoly III-A). Z tohto dôvodu k fragmentácii nebude pristúpené a na interpretáciu logických symbolov jazyka PLL použijeme pravdivostnú reláciu

$$\models: W \times Prop \rightarrow \{\top, 0, 1, \perp\} \quad (6)$$

kde  $\models(w_n, p)$  priradí elementárnej formule  $p$  vo svete  $w_n$  hodnotu z množiny  $\{\top, 0, 1, \perp\}$ , reprezentujúcej pravdivosť, nepravdivosť, zmysel alebo nezmysel formuly.

Pre jednotlivé prvky syntaxe PLL platí nasledovné [30], [31], pričom ‘ $\vee\vee$ ’ znamená “vtedy a len vtedy”:

$$\begin{array}{ll} M_K, w \models p & \vee\vee \quad p \in M(w) \\ M_K, w \models \top & \\ M_K, w \models \mathbf{0} & \\ M_K, w \models \mathbf{1} & \\ M_K, w \models \perp & \\ M_K, w \models P(x_1, \dots, x_n) & \vee\vee \quad (a(x_1), \dots, a(x_n)) \in P^{M(w)} \\ M_K, w \models \varphi \otimes \psi & \vee\vee \quad M_K, w \models \varphi \text{ a } M_K, w \models \psi \\ M_K, w \models \varphi \wp \psi & \vee\vee \quad M_K, w \models \varphi \text{ xor } M_K, w \models \psi \\ M_K, w \models \varphi \oplus \psi & \vee\vee \quad (M_K, w \models \varphi \text{ a } M_K, w \models \psi) \\ & \text{alebo } (M_K, w \models \varphi \\ & \text{alebo } M_K, w \models \psi) \\ M_K, w \models \varphi \& \psi & \vee\vee \quad M_K, w \models \varphi \\ & \text{alebo } M_K, w \models \psi \\ M_K, w \models \varphi \multimap \psi & \vee\vee \quad \text{pre všetky } w \leq w', \\ & \text{ak } M_K, w' \models \varphi \text{ potom} \\ & M_K, w' \models \psi \\ M_K, w \models \varphi^\perp & \vee\vee \quad M_K, w \not\models \varphi \\ M_K, w \models !\varphi & \vee\vee \quad (\forall w') w \leq w' : M_K, w' \models \varphi \\ M_K, w \models ?\varphi & \vee\vee \quad (\exists w') w \leq w' : M_K, w' \models \varphi \\ M_K, w \models (\exists x)\varphi & \vee\vee \quad \text{ak existuje } X \in D_w, \\ & M_K, w \models \varphi \quad [x \mapsto X] \\ M_K, w \models (\forall x)\varphi & \vee\vee \quad \text{pre všetky } w \leq w' \text{ a pre} \\ & \text{všetky } X \in D_w, \\ & M_K, w \models \varphi \quad [x \mapsto X] \end{array} \quad (7)$$

### C. Dokazovací kalkúl PLL

Posledným krokom pre komplexné zavedenie logického aparátu PLL je popis jej dokazovacieho systému. Základnými

prvkami lineárneho deduktívneho systému sú Gentzenovské sekventy [32], ktoré sa zapisujú v tvare:

$$\Gamma \vdash \Delta \quad (8)$$

kde  $\Gamma = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ ,  $\Delta = (\psi_1, \dots, \psi_m)$  sú konečné postupnosti formúl PLL.

Zápis v tvare sekventu  $\Gamma \vdash \Delta$  znamená, že postupnosť formúl  $\Gamma$ , nazývaná antecedent, pozostáva z množiny predpokladov, z ktorých je odvodiťelná postupnosť formúl  $\Delta$ , nazývaná sukcedent. Ak množinu  $\Gamma$  vnímame ako multiplikatívnu konjunkciu predpokladov  $\varphi_1 \otimes \dots \otimes \varphi_n$  a množinou  $\Delta$  ako aditívnu konjunkciu záverov  $\psi_1 \&\dots\&\psi_n$ , tak má sekventový zápis nasledujúci tvar:

$$\varphi_1 \otimes \dots \otimes \varphi_n \vdash \psi_1 \&\dots\&\psi_n, \quad (9)$$

Daný zápis znamená, že ak platia všetky formuly sekventu na strane ľavej, musí platiť aspoň jedna formula zo strany pravej.

V PLL nie je možné používať pravidlá zoslabenia a kontrakcie [33], ktoré s predpokladmi resp. zdrojmi pracujú nešetne - pravidlo zoslabenia spôsobuje strácanie zdrojov a pravidlo kontrakcie naopak spôsobí pridávanie zdrojov, čo v PLL nie je povolené. Dané pravidlá je preto možné použiť len v ich reštriktívnom tvare prostredníctvom modálnych operátorov  $!$ ,  $?$ .

Sekventový kalkul PLL obsahuje nasledujúce odvodzovacie axiomy a pravidlá:

1.) Axióma *identity* a pravidlo *reзу*:

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

2.) Štruktúrálna pravidlá: *Pravidlá výmeny*

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

*Reštriktívny tvar pravidiel zoslabenia a kontrakcie:*

$$\frac{\Gamma, ?\varphi, ?\varphi \vdash \Delta}{\Gamma, ?\varphi \vdash \Delta}^{(?cl)} \quad \frac{\Gamma \vdash ?\varphi, ?\varphi, \Delta}{\Gamma \vdash ?\varphi, \Delta}^{(?cr)}$$

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma, ?\varphi \vdash \Delta}^{(?wl)} \quad \frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma \vdash ?\varphi, \Delta}^{(?wr)}$$

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma, ?\varphi \vdash \Delta}^{(?dl)} \quad \frac{\Gamma \vdash \varphi \Delta}{\Gamma \vdash ?\varphi, \Delta}^{(?dr)}$$

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

3.) Pravidlá pre konštanty:

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma, \mathbf{1} \vdash \Delta}^{(1_l)} \quad \frac{\overline{\vdash \mathbf{1}}^{(1_r)}}{\Gamma, \mathbf{0} \vdash \Delta}^{(0_l)}$$

$$\frac{\overline{\Gamma \vdash \top, \Delta}^{(\tau_r)}}{\perp \vdash}^{(\perp_l)} \quad \frac{\overline{\perp \vdash}^{(\perp_l)}}{\Gamma \vdash \perp, \Delta}^{(\perp_r)}$$

4.) Logické pravidlá:

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

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

$$\frac{\Gamma \vdash \psi, \Delta}{\Gamma \vdash \varphi \oplus \psi, \Delta}^{(\oplus_{r2})} \quad \frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta \quad \Phi, \psi \vdash \Sigma}{\Gamma, \Phi, \varphi \multimap \psi \vdash \Delta, \Sigma}^{(\multimap_l)}$$

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

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma \varphi \& \psi, \vdash \Delta}^{(\&_{l1})} \quad \frac{\Gamma, \psi \vdash \Delta}{\Gamma \varphi \& \psi, \vdash \Delta}^{(\&_{l2})}$$

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

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

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

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi, \Delta}{\Gamma, \varphi^\perp \vdash \Delta}^{(0_l^\perp)} \quad \frac{\Gamma, \varphi \vdash \Delta}{\Gamma \vdash \varphi^\perp, \Delta}^{(0_r^\perp)}$$

Definíciu PLL prostredníctvom jej syntaxe, sémantiky a dokazovacieho kalkulu je možné považovať za úplnú. V nasledujúcej podkapitole uvedieme návrh vlastného logického systému pripájajúceho TIL a PLL.

IV. ZDROJOVO-ORIENTOVANÁ TRANSPAREN  
Tná INTENZIONÁLNA LOGIKA

Prepojenie vlastností TIL a PLL umožní vytvorenie nového unikátneho aparátu nazvaného zdrojovo-orientovaná transparentná intenzionálna logika (ZOTIL) s mimoriadnou expresívnou silou, ktorý bude vhodný na použitie v oblasti LAPJ. ZOTIL je logika vyššieho rádu procedurálneho charakteru s rozvetvenou hierarchiou typov. Jej formálnu definíciu, ako aj možnosti použitia v oblasti sémantického spracovania prirodzeného jazyka na teoretickej aj aplikáčnej úrovni, predstavíme v nasledujúcich podkapitolách.

A. Syntax ZOTIL

Syntax logického aparátu rozširujúceho TIL o PLL princípy je možné vyjadriť nasledujúcou gramatikou v tvare BNF:

$$\begin{aligned} \varphi &::= p \mid 1 \mid 0 \mid \perp \mid \top \mid P(t, \dots, t) \mid k \otimes k \mid k \& k \mid k \oplus k \mid \\ &k \wp k \mid k \rightarrow k \mid k^\perp \mid !k \mid ?k \mid (\forall x)k \mid (\exists x)k, \\ k &::= {}^0k \mid [kk'] \mid \lambda x k, \\ t &::= o \mid \iota \mid \tau \mid \omega \mid ttt. \end{aligned} \tag{10}$$

BNF formuly  $\varphi$ , ktorá umožňuje používať logické objekty PLL v ZOTIL, vychádza z definície 2 v podkapitole III-A.

Význam symbolov v produkčnom pravidle pre typy  $t$ , ktoré umožňujú vytvárať rozvetvenú hierarchiu typov výrazov prirodzeného jazyka popísaných ZOTIL formulami, je nasledovný:

- $o$  je typ pravdivostných hodnôt,
- $\iota$  je typ individuí,
- $\tau$  je typ časových okamihov,
- $\omega$  je typ možných svetov,
- $ttt$  je funkcionálny typ, kde prvé  $t$  je typ, druhé  $t$  je typ a tretie  $t$  je v poradí prvý a druhý typ.<sup>4</sup>

Význam symbolov v produkčnom pravidle pre konštrukcie  $k$ , ktoré robí z ZOTIL procedurálny logický systém<sup>5</sup>, je nasledovný:

- ${}^0k$  umožňuje trivializáciu formúl ZOTIL,
- $[kk']$  umožňuje kompozíciu formúl ZOTIL,
- $\lambda x k$  umožňuje vytvoriť uzáver formúl ZOTIL.

Preklad extenzií z pôvodnej TIL, ktoré sú zachytené v Tabuľke III v podkapitole II-B1, do ZOTIL je znázornený v Tabuľke VI:

Použitie ZOTIL systému je možné demonštrovať na sústave viet

**Príklad IV.1.**

Matka: “Ak sa (syn) budeš správať dobre, vyberieš si, či sa

<sup>4</sup>Funkcionálny typ  $ttt$  umožňuje z jednoduchých typov  $o, \iota, \tau, \omega$  vytvárať zložené typy, napr. z  $o, \iota$  je možné vytvoriť typ  $oi$  reprezentujúci vlastnosť individua, z  $oi$  a  $\tau$  je možné vytvoriť typ  $oi_\tau$  reprezentujúci vlastnosť individua premenlivú v čase a z  $oi_\tau$  a  $\omega$  je možné vytvoriť typ  $oi_{\tau\omega}$  reprezentujúci vlastnosť individua premenlivú v čase a možnom svete.

<sup>5</sup>Konštrukcia pre premenné  $x$  sa v syntaxi ZOTIL samostatne nenachádza, premenné sa vyskytujú len viazané v konštrukcii typu uzáver  $\lambda x k$ .

TABUĽKA VI  
KOREŠPONDENCIA MEDZI OPERÁTORMI TIL A ZOTIL

TIL	Zdrojovo-orientovaná TIL	Typ
$\wedge$	$\otimes, \&$	$(ooo)$
$\vee$	$\wp, \oplus$	$(ooo)$
$\supset$	$\rightarrow$	$(ooo)$
$\neg$	$(.)^\perp$	$(oo)$
$\forall, \exists$	$\forall, \exists$	$(o(o\alpha))$
-	!, ?	$(o(o\alpha))$

*doma budeš hrať na počítači a pozerat’ televízor, alebo pôjdeš vonku do kina alebo na nákupy. Ak chceš ísť von, o tom kam pôjdeme rozhodujem ja.”*

Syn: “Chcem ísť vonku.”

Matka: “Potom pôjdeme do kina.”

Na prvú vetu z dialógu v príklade IV.1 bude (podobne ako v podkapitole II-B3) uplatňovaná trojkroková metóda analýzy výrazov:

- 1) Typová analýza vety:  $\text{syn}/\iota$ ,  $\text{správať\_dobre}/(oi)_{\tau\omega}$ ,  $\text{vybrať}/(oi_{oi})_{\tau\omega}$ ,  $\text{počítač}/(oi)_{\tau\omega}$ ,  $\text{televízor}/(oi)_{\tau\omega}$ ,  $\text{kina}/(oi)_{\tau\omega}$ ,  $\text{nákupy}/(oi)_{\tau\omega}$ ,  $\wp/ooo$ ,  $\oplus/ooo$ ,  $\otimes/ooo$ ,  $\rightarrow/ooo$ .
- 2) Syntéza konštrukcie vety:  
 $\lambda w \lambda t [{}^0\text{syn } {}^0\text{správať\_dobre}_w t \rightarrow$   
 $[ [{}^0\text{syn } [{}^0\text{vybrať}_w t {}^0\text{počítač}_w t] \otimes [{}^0\text{vybrať}_w t$   
 ${}^0\text{televízor}_w t] ] \wp [{}^0\text{syn } [{}^0\text{vybrať}_w t {}^0\text{kino}_w t] \oplus$   
 $[{}^0\text{vybrať}_w t {}^0\text{nákupy}_w t] ] ] ]$
- 3) Typová kontrola vety: Ak sa (syn) budeš správať dobre, vyberieš si, či sa doma budeš hrať na počítači a pozerat’ televízor, alebo pôjdeš vonku do kina alebo na nákupy. $/ (o)_{\tau\omega}$ , je podrobne spracovaná na Obrázku 6.

B. Sémantika ZOTIL

Z rovnakých dôvodov, z akých bola sémantika PLL interpretovaná prostredníctvom Kripkeho modelu možných svetov, bude tento prístup aplikovaný aj na ZOTIL. Na rozdiel od PLL je ZOTIL logikou založenou na princípoch typovaného  $\lambda$ -kalkulu, preto je nutné pôvodný Kripkeho model zo zápisu 5 zmeniť na Kripkeho  $\lambda$  model:

$$M_{K-ZOTIL} = (W, \leq, \models, \{A_w^t\}, \{App_w^{t,t'}\}, \{i_{w,w'}^t\}) \tag{11}$$

kde

- ‘ $W$ ’ a ‘ $\leq$ ’ sú analogické s popisom v podkapitole III-B,
- ‘ $\{A_w^t\}$ ’ je skupina množín indexovaná na základe typov  $t$  a možných svetov  $w \in W$ ,
- ‘ $\{App_w^{t,t'}\}$ ’ skupina množín “aplikačných zobrazení”  $App_w^{t,t'} : A_w^{t \rightarrow t'} \times A_w^t \rightarrow A_w^{t'}$ , ktoré sú indexované na základe typov  $t, t'$  a možných svetov  $w \in W$ ,
- ‘ $\{i_{w,w'}^t\}$ ’ skupina množín “prechodových funkcií”  $i_{w,w'}^t : A_w^t \rightarrow A_{w'}^t$ , ktoré sú indexované na základe typov  $t$  a možných svetov  $w \leq w'$ ,

Zároveň platia nasledujúce pravidlá [34]:

- 1) prechod z  $A_w^t$  do  $A_w^t$  sa nazýva identita:

$$i_{w,w}^t : A_w^t \rightarrow A_w^t \quad (\text{id}) \tag{12}$$



ktoré nám umožní pracovať so ZOTIL, ako keby bola prvorádovou logikou. Ide o zjednodušenie, bez ktorého by nebolo možné vytvoriť dôkazový strom skúmanej formuly, lebo logiky vyššieho rádu nemajú rekurzívne axiomatizovateľný úplný dôkazový systém. Aplikovaním navrhnutého pravidla a odvodzovacích pravidiel PLL z podkapitoly III-C vytvoríme dôkazový strom zachytený na Obrázku 7.

V dôkazovom strome sú použité nasledujúce kontexty:

- $\Gamma = \{S_{w_0t_0}^\perp, P_{w_0t_0}^\perp, T_{w_0t_0}^\perp, K_{w_0t_0}^\perp, N_{w_0t_0}^\perp\}$ ,
- $\Gamma_1 = \{P_{w_0t_0}^\perp, T_{w_0t_0}^\perp, K_{w_0t_0}^\perp, N_{w_0t_0}^\perp\}$ ,
- $\Gamma_2 = \{K_{w_0t_0}^\perp, N_{w_0t_0}^\perp\}$ ,
- $\Gamma_3 = \{P_{w_0t_0}^\perp, T_{w_0t_0}^\perp\}$ .

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash K_{w_0t_0}^\perp, K_{w_0t_0}^\perp} \\
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash T_{w_0t_0}^\perp, T_{w_0t_0}^\perp} \\
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash P_{w_0t_0}^\perp, P_{w_0t_0}^\perp} \\
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash N_{w_0t_0}^\perp, N_{w_0t_0}^\perp} \\
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash (P_{w_0t_0}^\perp \otimes T_{w_0t_0}^\perp), \Gamma_3} \\
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash ((P_{w_0t_0}^\perp \otimes T_{w_0t_0}^\perp) \wp (K_{w_0t_0}^\perp \oplus N_{w_0t_0}^\perp)), \Gamma_1} \\
 \frac{(id)}{S_{w_0t_0}^\perp, S_{w_0t_0}^\perp \vdash ((P_{w_0t_0}^\perp \otimes T_{w_0t_0}^\perp) \wp (K_{w_0t_0}^\perp \oplus N_{w_0t_0}^\perp)), \Gamma} \\
 \frac{(id)}{\lambda w \lambda t [{}^0S_{wt} \multimap [{}^0P_{wt}]] \wp [{}^0K_{wt} \oplus {}^0N_{wt}], \Gamma}
 \end{array}
 \end{array}$$

Obr. 7. Dôkazový strom ZOTIL formuly

## V. SÉMANTICKÝ STROJ ZOTIL

V tejto kapitole je popísaný teoretický návrh a implementácia prototypu sémantického stroja ZOTIL. Rozbor viet v TIL sa vykonáva v troch krokoch - typová analýza, syntéza konštrukcie a typová kontrola, vid' kapitola II-B3. Sémantický stroj opísaný v tejto kapitole umožňuje analyzovať vety v prirodzenom jazyku v prvých dvoch z uvedených krokov, a to z pohľadu logického systému ZOTIL. Keďže ZOTIL skúma význam viet v prirodzenom jazyku, nebolo potrebné zamerať sa na syntaktickú úroveň analýzy. Syntaktická analýza sa vykonáva pomocou externého analyzátor, ktorý bol starostlivo vybraný po porovnaní s konkurenčnými analyzátormi. Pred popisom našej vlastnej implementácie je však potrebné analyzovať podobné, už existujúce systémy.

### A. Rozbor existujúcich riešení

Väčšina počítačových aplikácií pracujúcich s TIL bola vo väčšej alebo menšej miere založená na Horákovom **normálnom translačnom algoritme** (NTA) [36]. NTA umožňuje automatizované spracovanie textov v českom jazyku a prevod do ich logickej reprezentácie s cieľom pokryť najfrekvencovanejšie jazykové fenomény. NTA pozostáva z dvoch krokov - v prvom je vytvorený syntaktický analyzátor českých viet, ktoré sú v druhom kroku sémanticky reprezentované ako TIL konštrukcie s významom zodpovedajúcim skúmaným vetám. Syntaktický analyzátor NTA nazývaný **SYNT** [37], z viet na vstupe generuje výstupy v tvare stromu gramatických závislostí, teda vykonáva gramatickú analýzu. Horák sa pritom sústredil nielen na analýzu klasifikácie slovných druhov, slovesných časov, vidov a pod. v už publikovaných prácach o TIL, ale pridal aj vlastné analýzy, ktorých výsledky sú ukladané do databáz a ďalej spracovávané. V nástroji SYNT následne začína evaluácia zo stromu gramatických závislostí vety, v ktorej sa postupuje od listov smerom ku koreňu, pričom vo vnútorných uzloch postupne prebieha syntéza hodnôt získaných z dcérskych uzlov. Listy sú vyhodnocované pomocou nástroja **Lexicon** [38]. Synt je možné považovať za doposiaľ jediný existujúci sémantický stroj TIL.

**TIL-Script** bol vyvinutý kolaboráciou členov Laboratória Inteligentných systémov na Technickej univerzite v Ostrave [39] ako multiplatformový deklaratívny programovací jazyk založený na syntaxi TIL. Podobne ako NTA, aj TIL-Script je použitý vo väčšine existujúcich implementácií TIL. Špeciálne symboly používané v TIL (písmená gréckej abecedy, kvantifikátory, logické spojky a i.) sú nahradené kľúčovými slovami s použitím znakov zo sady ASCII. Tabuľka VII obsahuje vybrané typy a logické objekty TIL prepísané do jazyka TIL-Script.

Doposiaľ existoval len jediný sémantický stroj TIL, ktorý je založený na NTA. Sémantické stroje založené na PLL nie je možné analyzovať, lebo aj napriek množstvu jej počítačových implementácií neexistuje žiadne podobné riešenie. Nasledujúce podkapitoly venujeme popisu návrhu a implementácie prototypu vlastného sémantického stroja založeného na ZOTIL.

TABUĽKA VII

PRVKY SYNTAXE TIL A ICH EKVIVALENTY V JAZYKU TIL-SCRIPT

TIL	TIL-Script	Popis
$\iota$	Indiv	individuum
$o$	Bool	pravdivostná hodnota
$\omega$	World	možný svet
$\tau$	Time/Real	čas/reálne číslo
$\wedge, \vee$	And/Or	konjunkcia, disjunkcia
$\supset, \equiv$	Implies/Equiv	implikácia/ekvivalencia
$\neg$	Not	negácia
$\forall, \exists$	ForAll/Exist	všeobecný/existenčný kvantifikátor

### B. Syntaktický analyzátor

Pre vytvorenie nášho sémantického stroja bola použitá knižnica **Stanford Core NLP** (SCN) [40] napísaná v jazyku Java, no používatelia môžu používať aj jej rozhrania pre prácu v jazykoch ako Python, C#, alebo JavaScript. SCN je viacúčelový multiplatformový syntaktický analyzátor, ktorého najväčšou výhodou je práve jeho škálovateľnosť. Viaceré jeho komponenty je možné integrovať s NLTK, no na rozdiel od neho dokáže spracovať veľké množstvo dát a to veľmi rýchlo (po SpaCy sa jedná o najrýchlejšie zo spomenutých riešení). Okrem spracovania a generovania textu umožňuje aj narábať s konverzačnými rozhraniami a z analyzovaného textu dokáže extrahovať nadštandardne veľa informácií. V rámci syntactickej analýzy poskytuje údaje získané z gramatickej analýzy, štatistiky a hlbokého učenia. Tým, že bol nástroj vytvorený elitnou výskumnou inštitúciou však primárne nie je určený pre komerčné účely, ale ako základ pre ďalší výskum a experimentovanie.

Dôvody, pre ktoré bol SCN vybraný ako externý nástroj generujúci vstup do sémantického stroja ZOTIL: voľne dostupné riešenie určené na akademické účely, podpora veľkého množstva prirodzených jazykov, rozsiahla projektová dokumentácia, aktívna komunita vývojárov vytvárajúca pravidelné aktualizácie, vysoká flexibilita a škálovateľnosť systému, integrácia rôznych typov analýzy textu, vizualizácia výstupov analýzy, vysoká rýchlosť analýzy aj pri veľkom množstve vstupných dát.

Pri implementácii sa používali informácie získané z “basic-dependencies” [41] - ide o informácie z modelov extrahujúcich gramatické vzťahy vo vetách. SCN vie spracovať viac než 50 binárnych gramatických vzťahov medzi governorom (riadiace slovo) a dependentom (slovo, ktoré je od governora závislé). Najdôležitejšie vzťahy použité pri implementácii ZOTIL sú:

- *advcl* – vzťah medzi governorom, ktorým je sloveso a časovou, dôsledkovou, podmienkovou alebo účelovou klauzulou, ktorá ho modifikuje (napr. “*if you know who Eleanor was, you are clever*”),
- *advmod* – vzťah medzi governorom a príslovkou, ktorá ho rozširuje (napr. “*successfully defeated*”),
- *amod* – vzťah medzi governorom a prídavným menom, ktoré ho rozširuje (napr. “*the old queen*”),
- *aux* - vzťah medzi pnovýznamovým a neplnovýznamovým slovesom, ktoré mu prináleží (napr. “*should win*”),

- *case* – vzťah medzi governorom a indikátorom privlastnenia ‘s (napr. “*queen’s*”),
- *conj* – vzťah medzi dvoma rovnocennými slovami spojenými vetnou spojkou “and” alebo “or”,
- *cop* – vzťah medzi slovom a neplnovýznamovým slovesom “be”, ktoré mu prináleží (napr. “*was old*”),
- *det* – vzťah medzi governorom v podobe podstatného mena a k nemu prislúchajúcim vetným členom (napr. “*the queen*”),
- *dobj* – vzťah medzi prísudkom a predmetom, kde governorom je predmet (napr. “*win the war*”),
- *mark* – vzťah medzi komplementárnou klauzulou a governorom, najčastejšie je komplementárna klauzula uvádzaná slovami “that”, “whether” alebo “if” (napr. “*Eleanor says that she won*”),
- *neg* – vzťah medzi negáciou slova a slovom, ktoré táto negácia ovplyvňuje (napr. “*was not a queen*”),
- *nmod* – vzťah medzi governorom a podstatným menom uvedeným predložkou (napr. “*the queen of France*”),
- *nmod:poss* – vzťah medzi objektom, ktorý vlastní jednotlivec, ktorý je buď priamo reprezentovaný menom alebo nepriamo privlastňovacím zámenom (napr. “*my queen*”),
- *nsubj* – vzťah medzi podmetom a prísudkom, pričom prísudok, ktorý je governorom, môže byť slovesný alebo menný (napr. “*the queen was old*”),
- *nsubjpass* – vzťah typu *nsubj*, no prísudok je v tvare pasívu (napr. “*be defeated by Eleanor*”),
- *poss* – vzťah vyjadrujúci privlastnenie resp. priradenie medzi governorom a objektom, ktorý mu prislúcha (napr. “*Eleanor’s victory*”).

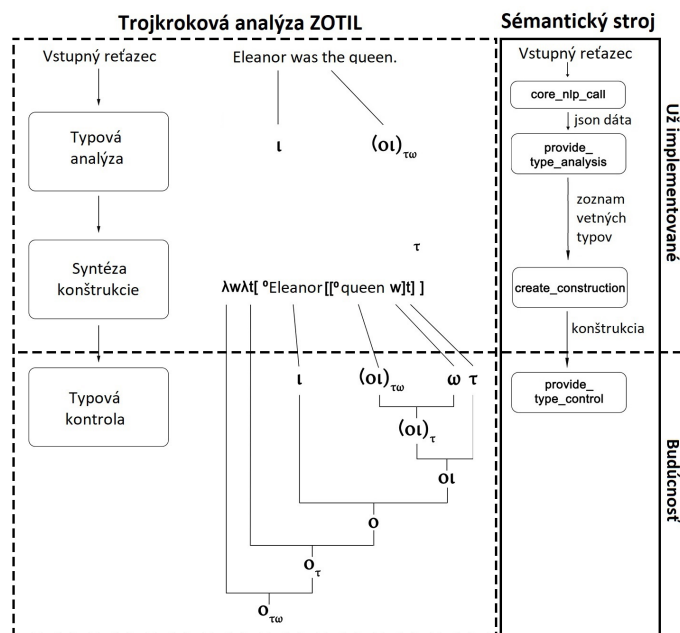
### C. Návrh a implementácia prototypu sémantického stroja ZOTIL

Sémantická analýza viet je druhým krokom logickej analýzy prirodzeného jazyka. Výstupom sémantickej analýzy ZOTIL je veta reprezentovaná konštrukciou tejto logiky. Syntaktický stroj vykonáva logickú analýzu v troch krokoch tak, ako to bolo popísané v kapitole II-B3.

Na Obrázku 8 je schéma znázorňujúca koreláciu medzi teoretickými princípmi ZOTIL a ich praktickou realizáciou. Ľavá strana obrázka predstavuje formálnu analýzu vety v ZOTIL. Pravá strana zachytáva postup spracovania vstupného textu. Vstupná veta resp. blok viet je najprv odoslaný do SCN. SCN poskytne syntaktickú analýzu textu a výstup analýzy vracia vo formáte json. V module **provide\_type\_analysis** sémantického stroja sa vykoná typová analýza, pričom všetky identifikované typy objektov sa uložia do zoznamu, s ktorým pracuje modul **create\_construction**. Úspešne vygenerovaná konštrukcia sa zobrazí na výstupe sémantického stroja. Údaje, ktoré vznikli pri syntéze konštrukcie sú poslané na ďalšie spracovanie do modulu **provide\_type\_control**.

Keďže typová kontrola je nepovinný krok sémantickej analýzy viet, modul **provide\_type\_control** v prezentovanom riešení zatiaľ nie je plne implementovaný. Ďalšie podkapi-





Obr. 8. Porovnanie trojkrokovej analýzy viet pomocou ZOTIL na teoretickej a implementačnej úrovni.

toly preto budú zamerané na podrobnú analýzu funkcionality modulov `provide_type_analysis` a `create_construction`.

1) *Automatizovaná typová analýza*: Typová analýza je prvým krokom vedúcim k implementácii sémantického stroja. Zoznam typov používaných v module `provide_type_analysis` a spôsob ich identifikovania prostredníctvom výstupu z SCN je nasledovný:

- **Indivídium**  $\iota$  - jeden zo základných typov v ZOTIL. Vždy ide o konkrétnu entitu (meno človeka, názov mesta, inštitúcie) a preto začína veľkým písmenom. SCN označuje indivídium v procese tokenizácie ako NNP – vlastné podstatné meno.
- **Propozícia**  $o_{\tau\omega}$  - rozšírený typ v ZOTIL. Vo vete “The queen was old.” slovo “old” vyjadruje pravdivosť vzhľadom na stav objektu “queen” v možnom svete a časovom okamihu. Pravdivostnú hodnotu je možné získať ako governora vo vzťahu nsubj.
- **Atribút**  $(u)_{\tau\omega}$  - rozšírený typ v ZOTIL. Je potrebné nájsť vzťah case medzi podstatným menom a indikátorom “s”. Iným variantom určenia typu atribút je nájdenie vzťahu nmod:poss – governorom je atribút, ktorý vlastní jednotliviec, ktorý môže byť buď priamo reprezentovaný menom alebo nepriamo privlastňovacím zámenom.
- **Vlastnosť objektu**  $(oi)_{\tau\omega}$  - rozšírený typ v ZOTIL. Je potrebné nájsť vzťah nsubj podobne, ako sa to robilo pri type propozícia. Objekt, ktorému sa priradí typ v tomto prípade nebude celá veta, ale len jej prísudková časť.
- **Vlastnosť vlastnosti objektu**  $((oi)(oi)_{\tau\omega})_{\tau\omega}$  - rozšírený typ v ZOTIL. Je potrebné nájsť vzťah amod, kde je prídavné meno dependentom rozširujúcim objektu typu vlastnosť objektu.

- **Binárny vzťah medzi indivíduami**  $(ou)_{\tau\omega}$  – rozšírený typ v ZOTIL. Je potrebné nájsť vzťah nsubj alebo nsubj-pass, medzi governorom v podobe prísudku a indivíduom, na ktoré sa prísudok vzťahuje. Súčasne musí platiť, že ten istý governor je vo vzťahu dobj alebo nmod s iným indivíduom, ktoré je podmetom vety.
- **Binárny vzťah všeobecne**  $(o\alpha_1\alpha_2)_{\tau\omega}$  – rozšírený typ v ZOTIL. Varianta predošlého typu, kde však podmetom a predmetom nie je indivídium, ale ľubovoľný typ.
- **Hodnota**  $\tau$  – jeden zo základných typov v ZOTIL. Je potrebné identifikovať číslovku vo vete – počas tokenizácie sú číslovky priradené do kategórie CD. Alternatívou je nájsť špecifické slová, ktoré vyjadrujú číselnú hodnotu (weigh, height, length, temperature, depth, width, distance, speed, count\_of, number\_of, amount\_of a i.), a ktoré sú tiež typu hodnota.
- **Vlastnosť hodnoty**  $(o\tau)_{\tau\omega}$  - rozšírený typ v TIL. Po identifikácii typu hodnoty vo vete je potrebné nájsť vzťah nsubj medzi governorom, ktorým je objekt typu hodnota a slovom, ktoré ho rozvíja.

Každý typ špecifikovaný v tejto kapitole sme implementovali do modulu `provide_type_analysis` sémantického stroja ZOTIL. Po tom, čo boli všetkým lexikálnym objektom analyzovaných viet priradené zodpovedajúce typy, je možné prejsť do druhej fázy sémantickej analýzy - vytvorenie konštrukcie reprezentujúcej význam vety.

2) *Automatizovaná syntéza konštrukcií*: Vo výstupe zo SCN je pri analýze každej vety nájdená vlastnosť ROOT. Gramatický vzťah ROOT je falošným uzlom s indexom 0, ktorý ukazuje na koreň vety. Keďže sa ROOT nachádza v každej vete, ide o východiskový bod, z ktorého sú vytvárané konštrukcie. Po dokončení typovej analýzy je vytvorený zoznam všetkých identifikovaných typov lexikálnych jednotiek, čo umožňuje určiť, aký typ je priradený slovu v koreni vety.

Po identifikovaní typu koreňa vety je zisťované, s akými slovami je koreň vety vo vzťahu – ide o klúčovú vlastnosť pre budovanie kompozície konštrukcie. Vo vete “Eleanor was the queen.” je koreňom vety slovo “queen”, ktoré je typu vlastnosť objektu. Tento typ je intenzionálny, z čoho je možné určiť, kde vo vete sa bude nachádzať uzáver. Následne je nájdený súvisiaci lexikálny objekt “Eleanor”, ktorý je typu indivídium. Výsledná konštrukcia vygenerovaná ZOTIL sémantickým strojom vyzerá nasledovne:

$$\lambda w \lambda t \ [ [ [ ^0 \text{queen } w ] t ] ^0 \text{Eleanor} ] \quad (19)$$

Pri automatizovanej typovej kontrole vznikali kolízie, kedy to isté slovo zdanlivo patrilo do viacerých kategórií typov. Napríklad vo vete “Eleanor had 10 children.” bolo slovo 10 identifikované ako číslovka a teda by malo byť typu hodnota. V skutočnosti to nie je pravda, veta hovorí o tom, že konkrétne indivídium má určitú vlastnosť. Medzi “Eleanor” a “children” je vzťah nsubj, ktorý je príznačný pre typ vlastnosť objektu a na základe vzťahu medzi “10” a “children” je zrejmé, že “10” je typu vlastnosť vlastnosti objektu. Medzi lexikálnymi jednotkami, ktoré sú spolu vo vzťahu je preto

robená základná typová kontrola, ktorá vylúči možnosť neadekvátnej typovej analýzy.

Pri vytváraní konštrukcie vety boli nad jednotlivými slovami budované objekty. U určitých prípadoch (vyplývajú z typovej analýzy a základnej typovej kontroly) nebol pridelený jeden typ k jednému slovu, ale k objektu, ktorý napriek tomu, že pozostával z viacerých slov, predstavoval jeden typ (napr. vo výraze “*number\_of\_something*” je typ hodnota pridelený celému výrazu, nie každému slovu samostatne).

Posledným krokom, ktorý bolo potrebné spracovať v rámci syntézy konštrukcií, bolo použitie logických spojok. Pre identifikáciu spojok  $\otimes$ ,  $\otimes$ ,  $\oplus$ ,  $\&$ , ktoré sú vždy v koreňovom uzle, bol využitý vzťah conj. Conj umožňuje určiť aj to, o či ide o konjunkciu alebo disjunkciu. Konkrétny typ spojky je zistený na základe analýzy ostatných vzťahov vo vete. Spracovanie spojok umožňuje vytvárať sémantické reprezentácie veľmi komplexných viet – napr. vetu “*Louis VII was the husband of Eleanor of Aquitaine, Constance of Castile and Adele of Champagne.*” znázorňuje nasledujúca konštrukcia:

$$\begin{aligned} & \lambda w \lambda t [^0 \text{Louis} [[^0 \text{Eleanor\_of\_Aquitaine} [[^0 \text{husband} w] t]] \\ & \text{OTIMES} [^0 \text{Constance\_of\_Castile} [[^0 \text{husband} w] t]] \\ & \text{OTIMES} [^0 \text{Adele\_of\_Champagne} [[^0 \text{husband} w] t]]] \end{aligned} \quad (20)$$

Na identifikáciu implikácie  $\rightarrow$  boli použité vzťahy mark a advcl - medzi governorom a slovom “if” musí byť vzťah mark a zároveň musí byť medzi tým istým governorom a časovou, dôsledkovou, podmienkovou alebo účelovou klauzulou vzťah advcl. Sémantickú reprezentáciu vety “*If Eleanor is the wife of Louis, then she is the queen of France.*” znázorňuje nasledujúca konštrukcia:

$$\begin{aligned} & \lambda w \lambda t [[^0 \text{Eleanor} [[^0 \text{wife\_of\_Louis} w] t]] \\ & \text{MULTIMAP} [^0 \text{Eleanor} [[^0 \text{queen\_of\_France} w] t]]] \end{aligned} \quad (21)$$

Posledným logickým objektom, ktorý bolo potrebné pri vytváraní konštrukcií spracovať, boli negácie vo vetách. Negácia sa vo vete nachádza vtedy, ak je medzi nejakými dvoma slovami vzťah neg. Sémantickú reprezentáciu vety “*Eleanor was not a queen of Spain.*” znázorňuje nasledujúca konštrukcia:

$$\lambda w \lambda t [^0 \text{Eleanor} \text{NOT} [[^0 \text{queen\_of\_Spain} w] t]] \quad (22)$$

Konštrukcie 19, 20, 21 a 22 sú príkladmi výstupov generovaných sémantickým strojom ZOTIL. Ich špecifická syntax bude vysvetlená v nasledujúcej podkapitole.

#### D. Porovnanie Synt SS a ZOTIL SS

V tejto kapitole sme predstavili funkčnú implementáciu sémantického stroja ZOTIL. Celosvetovo ide iba o druhú implementáciu sémantického stroja založeného na intenzionálnych logických princípoch. Porovnať ju teda možno len so systémom Synt (viď kapitola V-A). Tabuľka VIII predstavuje porovnanie výstupov ZOTIL SS a Synt SS pri analyzovaní tej istej vstupnej vety.

Veta	If Eleanor is the wife of Louis, then she is the queen of France.
ZOTIL	$\lambda w \lambda t [[^0 \text{Eleanor} [^0 \text{wife\_of\_Louis} w] t] \rightarrow [^0 \text{Eleanor} [^0 \text{queen\_of\_France} w] t]]$
Synt SS	$[\backslash w [\backslash t [\text{Implies} [^0 \text{Eleanor} [^0 \text{wife\_of\_Louis} w] t] [^0 \text{Eleanor} [^0 \text{queen\_of\_France} w] t]]]$
ZOTIL SS	$\lambda w \lambda t [[^0 \text{Eleanor} [[^0 \text{wife\_of\_Louis} w] t]] \text{MULTIMAP} [^0 \text{Eleanor} [[^0 \text{queen\_of\_France} w] t]]]$

TABUĽKA VIII  
POROVNANIE VÝSTUPOV SYNT SS A ZOTIL SS.

Na základe tohto porovnania je zjavné, že obe sémantické stroje generujú rovnaký výstup, aj keď používajú rozličnú syntax. Výstup generovaný zo Synt-u je zapísaný v jazyku TIL-Script. ZOTIL SS výstup vychádza priamo zo syntaxe ZOTIL - na rozdiel od symbolu  $^0$  pre trivializáciu používa  $^0$ , logické spojky sú v ňom zapisované veľkými písmenami (MULTIMAP, OTIMES, BINDNASREPMA, OPLUS, BINAMPERSAND) a nepoužíva sa skrátenejší tvar zápisu pre svetamihy.

Funkčnosť implementovaného riešenia je demonštrovaná prostredníctvom autentického výstupu zo ZOTIL SS (zачytený na Obrázku 9), v ktorom sú analyzované vety z kapitoly V-C2.

Prezentované riešenie však obsahuje aj určité nedostatky súvisiace s tým, že sa nejedná o plnú implementáciu potenciálu ZOTIL, ale len o prototyp. Znamená to, že zatiaľ čo prostredníctvom systému Synt je možné analyzovať väčšinu jazykového korpusu českého jazyka, použitie ZOTIL SS je čiastočne obmedzené. Na projekte NTA a Synt sa začalo pracovať koncom 90. rokov minulého storočia a napriek tomu, že jeho vývoj prebieha do dnešného dňa, kvôli rozsiahlosti problematiky intenzionálnej analýzy ním stále nie je možné odhaliť všetky sémantické nejednoznačnosti viet. Sémantický stroj ZOTIL slúži v prezentovanom stave primárne na demonštračné účely – cieľom jeho vytvorenia bolo predviesť funkcionality a možnosti novovytvoreného logického systému ZOTIL. V prípade budúceho pokračovania vývoja ZOTIL SS je možné dopracovať niektoré z aktuálne neimplementovaných funkcionalít ZOTIL (rozlíšenie extenzionálneho, intenzionálneho a hyperintenzionálneho kontextu vo vetách; spracovanie kvantifikátorov  $\forall^\alpha$  a  $\exists^\alpha$  ako objektov typu  $(o(o\alpha))$ ; substitučnosť premenných a konštrukcií; komplexná typová kontrola a i.). Toto rozšírenie aktuálneho riešenia by umožnilo používať výstupy zo ZOTIL SS ako základ pre inferenčný stroj danej logiky, čo je na rozdiel od implementácie sémantického stroja možnosť, ako využiť výhody veľkej vyjadrovacej sily ZOTIL. Okrem väčšej vyjadrovacej sily má ZOTIL SS oproti implementácii Synt ešte jednu nespornú výhodu – jeho zdrojovým prirodzeným jazykom je angličtina, čo umožňuje používať tento nástroj aj vo výskumoch, ktoré nie sú lokálne<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>Tento problém si uvedomujú aj vývojári systému Synt, ktorí nedávno začali pracovať na vývoji nového nástroja AST (z angl. automated semantic analysis) [42], ktorý by umožnil sémantickú analýzu anglických viet.

```

Run: sm x
D:\programs\Python\Python38-32\python.exe C:/Users/kikos/bc-sm-master/sm.py
*****
*   Semantic machine of Source-oriented transparent intensional logic   *
*                                                                 *
*****
Enter sentece or sentences for analyzing: Eleanor was the queen. Louis VII was the husband of Elean
*** Construction ***
λwλt[[[^0queen w]t] ^0Eleanor]
λwλt[^0Louis_VII [[^0Eleanor_of_Aquitaine [[^0husband w]t]] OTIMES [^0Constance_of_Castile [[^0husb
λwλt[[^0Eleanor [[^0wife_of_Louis w]t]] MULTIMAP [^0Eleanor [[^0queen_of_France w]t]]]
λwλt[^0Eleanor NOT [[^0queen_of_Spain w]t]]]

Process finished with exit code 0
|

```

Obr. 9. Kópia obrazovky sémantického stroja ZOTIL.

## VI. ZÁVER

Tento článok popisoval rozličné metódy využívané v oblasti LAPJ. Jej cieľom bolo vytvoriť návrh nového logického systému schopného formalizovať zmysel výrazov prirodzeného jazyka, ktorý by zároveň dokázal odhaľovať a riešiť bežné sémantické nejednoznačnosti prirodzeného jazyka.

Z porovnania najrozšírenejších intenzionálnych mechanizmov - Montagueovej intenzionálnej logiky a transparentnej intenzionálnej logiky vyplýva, že transparentná intenzionálna logika je efektívnym a univerzálnym systémom s mimoriadnou vyjadrovacou silou. Niektoré z jej nedostatkov (komplikovanosť technického aparátu, nemožnosť vytvorenia komplexného logického kalkulu, nemožnosť plnej automatizácie) by mohli byť aspoň čiastočne odstránené prepojením transparentnej intenzionálnej logiky s iným logickým systémom, ktorý by navyše umožnil zväčšiť vyjadrovaciu silu pôvodného aparátu. Vhodným systémom sa ukázala byť predikátová lineárna logika, ktorá navyše umožňuje použiť novovytvorený systém v oblasti informatiky. Predikátová lineárna logika obsahuje až štyri logické spojky pre disjunkciu a konjunkciu, jej konštanty zachytávajú nielen pravdivosť, ale aj zmysel skúmaných výrazov a lineárna implikácia umožňuje popísať meniace sa stavy sveta prostredníctvom spotreby zdrojov. Novovytvorený aparát sme nazvali zdrojovo-orientovaná transparentná intenzionálna logika, ide teda o rozšírenie transparentnej intenzionálnej logiky o vlastnosti predikátovej lineárnej logiky. Kvôli zachovaniu pôvodnej vyjadrovacej sily a možnosti jej zvýšenia, musel byť nový logický systém nutne navrhnutý ako logika vyššieho rádu, ktorej jazykom je  $\lambda$ -kalkul aplikovaný na predikátové lineárne formuly. Kvôli tomu, že logiky vyššieho rádu neumožňujú formulovať rekurzívne axiomatizovateľný korektný a úplný dôkazový systém, sme navrhli zjednodušujúci postup,

umožňujúci vytvárať dôkazy v zdrojovo-orientovanej transparentnej intenzionálnej logike. Možnosti uplatnenia ZOTIL v informatike demonštrovali prostredníctvom implementácie sémantického stroja zdrojovo-orientovaných transparentných intenzionálnych formúl, ktorý umožňuje automatizovanú formalizáciu významu viet prirodzeného jazyka.

Vedecký prínos predloženého článku je nasledovný:

- 1) Rozbor najrozšírenejších logických systémov používaných v oblasti LAPJ - MIL a TIL. MIL je analyzovaná na syntaktickej (popis jej slovníka, základných a odvodených kategórií) a sémantickej roviny (syntax a sémantika intenzionálnej logiky, sémantické pravidlá). TIL je charakterizovaná ako typovaná a aj ako procedurálna logika s trojkrokovou metódou vetného rozboru. Analýza MIL a TIL je spojená z ich hĺbkovým porovnaním, ktoré je realizované okrem teoretickej roviny aj na tej praktickej, prostredníctvom aplikovania princípov MIL a TIL na tú istú vetu prirodzeného jazyka.
- 2) Netriviálna analýza PLL z hľadiska možnosti jej použitia ako nástroja LAPJ (resp. nástroja kompatibilného s iným nástrojom LAPJ) - z tohto dôvodu bolo v rámci definície syntaxe rozhodnuté PLL nefragmentovať, aby bola zachovaná jej plná vyjadrovacia sila a jej sémantika bola následne vyjadrená prostredníctvom Kripkeho modelu netradične pre všetky tvary formúl PLL.
- 3) Vytvorenie nového logického systému vyššieho rádu, ktorý rozširuje TIL o vlastnosti PLL. Charakteristika ZOTIL je spojená s úplnou formálnou definíciou jej syntaxe, sémantiky a s návrhom dokazovacieho kalkulu.
- 4) Úspešný návrh a implementácia prototypu sémantického stroja ZOTIL. Sémantický stroj ZOTIL bol implementovaný po komplexnej analýze všetkých existujúcich implementácií TIL, ktoré boli vytvorené v oblasti LAPJ.

Lexikálnym jednotkám vety sú priradené ZOTIL typy na základe gramatických vzťahov, ktoré sú identifikované pomocou syntaktického analyzátoru SCN. Pomocou koreňového uzlu ROOT a základnej typovej kontroly sú vytvárané konštrukcie ZOTIL, ktoré formalizujú zmysel skúmaných viet. Adekvátnosť riešenia je demonštrovaná prostredníctvom vety, ktorá je analyzovaná sémantickými strojmi ZOTIL a Synt.

#### ACKNOWLEDGMENT

Táto práca bola podporená nasledujúcimi projektami:

- Fakulta elektrotechniky a informatiky na Technickej univerzite v Košiciach, No. FEI-2020-70: Behavioral model of component systems based on coalgebras and linear logic.
- SSlovenská agentúra pre výskum a vývoj, No. SK-AT-2017-0012: Semantics technologies for computer science education.

#### REFERENCES

- [1] R. Montague *Pragmatics and Intensional Logic*. In: Synthese, Vol. 22, No. 1/2, 1970, ISSN 0039-7857, pp. 68-94
- [2] R. Montague *English as a Formal Language*. In: Bruno Visentini (ed.), *Linguaggi nella società e nella tecnica*. Edizioni di Comunità, Milan, 1970, pp. 188-221
- [3] R. Montague *The proper treatment of quantification in ordinary English*. In: Hintikka, K.J.J., Moravcsik, J.M.E., & Suppes, P. (eds.) *Approaches to Natural Language*. Dordrecht: Reidel, 1970, pp. 221-242
- [4] P. Tichý *The Foundations of Frege's Logic*. De Gruyter, Berlin and New York, 1988, ISBN 3110116685, pp. 333
- [5] D. R. Dowty *Word Meaning and Montague Grammar. The Semantics of Verbs and Times in Generative Semantics and in Montague's PTQ*. Berlin, 1979, ISBN 9789027710093, pp. 448
- [6] F. Gáher *Anafora a pojmové postoje*. In: *Filozofia Ludwiga Wittgensteina*. Bratislava : Veda, 2002, ISBN 13350668, pp. 130-155
- [7] D. Gallin *Intensional and Higher-Order Modal Logic, with Applications to Montague Semantics*. North-Holland Mathematics Studies, 1975, ISBN 9780444110022, pp. 158
- [8] N. Cocchiarella *Richard Montague and the logical analysis of language*. In: G. Floistad (ed.), *Contemporary Philosophy: A New Survey I*, Vol. 2, *Philosophy of Language*. Philosophical Logic, The Hague Boston Mass.London, 1981, pp. 113-154
- [9] A. Kulacka *Intensional Logic for a Montague Grammar*. In: *LingVaria*, Vol. 2, No. 12, ISSN 1896-2122, 2011, pp. 9-22
- [10] Ch. Bassac, B. Mery, Ch. Retoré *Towards a Type-Theoretical Account of Lexical Semantics*. In: *Journal of Logic, Language and Information*, Vol. 19, No. 2, ISSN 0925-8531, 2009, pp. 229-245
- [11] K. Kortá, J. M. Larrazbal *Formal Semantics for Natural Language*. In: *ASJU*, Vol. 27, No. 2, 1993, pp. 271-393
- [12] M. Duží, P. Materna *Logical Form*. In: G. Sica, *Essays on the Foundations of Mathematics and Logic*, Monza: Polimetria International Scientific Publisher, ISBN 9788876990143, 2005, pp. 115-153
- [13] P. Tichý, V. Svoboda, B. Jespersen and C. Cheine *Pavel Tichý's Collected Papers in Logic and Philosophy*. Filosofia, New Zealand, Czech Republic: Otago University Press, ISBN 9788070071892, 2004, pp. 902
- [14] B. Jespersen *Predication and Extensionalization*. In: *Journal of Philosophical Logic*, Springer, Vol. 37, No. 5, 2008, pp. 479-499
- [15] M. Duží, B. Jespersen, P. Materna *Procedural Semantics for Hyperintensional Logic: Foundations and Applications of Transparent Intensional Logic (Logic, Epistemology, and the Unity of Science)*. Springer, ISBN 9789048188116, 2010, pp. 550
- [16] P. Materna, M. Duží *Co je a co není kontextualismus*. In: M. Zouhar (ed.), *Kontext a význam*, Bratislava: Aleph, 2010, pp. 11-21
- [17] J. Raclavský *Explicace a dedukce: od jednoduché k rozvětvené teorii typů*. In: *Organon F*, Vol. 20, No. 2, ISSN 1212-9097, 2013, pp. 37-53
- [18] A. Church *A Formulation of the Simple Theory of Types*. In: *The Journal of Symbolic Logic*, Vol. 5, No. 2, ISSN 0022-4812, 1940, pp. 56-68
- [19] M. Duží *Do we have to deal with partiality?*. In: K. Bendová and P. Jirků (eds.), *Miscellanea Logica V*, Prague: Karolinum, ISBN 9788024607999, 2003, pp. 45-76
- [20] F. Gáher *Tichého dielo - zdroj ďalších výskumov*. In: *Filosofický časopis*, Vol. 64, No. 6, ISSN 0015-1831, 2016, pp. 849-868
- [21] J. Raclavský, P. Kuchýňka, I. Pezlar *Transparentní intenzionální logika jako charakteristica universalis a calculus ratiocinator*. Masarykova univerzita, Brno, ISBN 9788021079731, 2015, pp. 322
- [22] P. Materna, M. Duží *'Parmenides principle' (The analysis of aboutness)*. In: *Philosophia*, Netherlands: Springer, Vol. 32, No. 1-4, ISSN 0048-3893, 2005, pp. 155-180
- [23] J. Y. Girard *Linear logic*. In: *Theoretical computer science*, Vol. 50, No. 1, ISSN 0304-3975, 1987, pp. 1-101
- [24] E. Demeterová *The role of predicate linear logic in computer science*. In: *SCYR 2014: 14th Scientific Conference of Young Researchers*, Košice, 2014, ISBN 9788055317144, pp. 273-274
- [25] K. Došen *Nonmodal classical linear predicate logic is a fragment of intuitionistic linear logic*. In: *Theoretical Computer Science*, Vol. 102, No. 1, Beograd, Yugoslavia, 2002, ISSN 0304-3975, pp. 207-214
- [26] J. Perhák, D. Mihályi, V. Novitzká *Between syntax and semantics of resource oriented logic for IDS behavior description*. In: *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, Vol. 15, No. 2, 2016, ISSN 2299-9965, pp. 111-124
- [27] W. Steingartner, A. Poláková, P. Prazňák, V. Novitzká *Linear logic in computer science*. In: *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, Vol. 14, No. 1, 2015, ISSN 2299-9965, pp. 91-100
- [28] V. Novitzká, R. Hahn, D. Mihályi *Solving problems in programming language by linear logic*. In: *Computer Science and Technology Research Survey*, Košice: FEI TU, Vol. 4, 2010, ISBN 9788055305158, pp. 119-124
- [29] D. Mihályi, V. Novitzká *Towards the Knowledge in Coalgebraic Model of IDS*. In: *Computing and Informatics*, Vol. 33, No. 1, 2014, ISSN 1335-9150, pp. 61-78
- [30] K. Zdanowski *On second order intuitionistic propositional logic without a universal quantifier*. In: *The Journal of Symbolic Logic*, Vol. 74, No. 1, 2009, ISSN 0022-4812, pp. 157-167
- [31] Ch. Hampson *Decidable first-order modal logics with counting quantifiers*. In: *Advances in Modal Logic*, Vol. 11, 2016, pp. 382-400
- [32] D. Miller *Sequent Calculus and the Specification of Computation*. In: *Computational Logic, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Computational Logic*, Marktobendorf, Germany, 1999, ISBN 9783642636707, pp. 399-444
- [33] V. Novitzká, D. Mihályi, W. Steingartner, R. Hužvár *Resources in linear logic proofs*. In: *Computer Science and Technology Research Survey*, Vol. 2, Košice 2007, ISBN 9788080860714, pp. 1-8
- [34] J. C. Mitchell, E. Moggi *Kripke-style models for typed lambda calculus*. In: *Annals of Pure and Applied Logic*, vol. 56, no. 1-2, ISSN 0168-0072, 1996, pp. 99-124
- [35] J. H. Gallier *Kripke Models for the Second-Order Lambda-Calculus*. In: *Technical Report (CIS)*, 1993, pp. 55
- [36] A. Horák *The Normal Translation Algorithm in Transparent Intensional Logic for Czech*. Dizertačná práca, Brno, Czech Republic: Masaryk University, 2001, pp. 155
- [37] A. Horák, V. Kadlec *New Meta-grammar Constructs in Czech Language Parser SYNT*. In: *Text, Speech and Dialogue: 8th International Conference, TSD 2005*, Karlovy Vary, Czech Republic, ISBN 9783540287892, 2005, pp. 85-92
- [38] A. Horák, K. Pala *Lexicons in TIL and Verb Valency Frames*. In: *Proceedings of the International Conference on Communications in Computing (CIC 2004)*, Las Vegas, Nevada, USA: CSREA Press, ISBN 978193241536X, 2004, pp. 255-261
- [39] N. Ciprich, M. Duží, M. Košinár *TIL-Script : Functional Programming Based on Transparent Intensional Logic*. In: *RASLAN 2007*, P. Sojka, A. Horák, (Eds.), Masaryk University Brno, 2007, pp. 37-42
- [40] Ch. D. Manning, M. Surdeanu, J. Bauer, J. Finkel, S. J. Bethard, D. McClosky *The Stanford CoreNLP Natural Language Processing Toolkit*. In: *Association for Computational Linguistics (ACL) System Demonstrations*, 2014, pp. 55-60
- [41] M.- C. de Marneffe, Ch. D. Manning *Stanford typed dependencies manual*. In: *System Demonstrations*, 2016, pp. 28
- [42] M. Medved', T. Šulganová, A. Horák *Multilinguality Adaptations of Natural Language Logical Analyzer*. In: *Proceedings of the Eleventh Workshop on Recent Advances in Slavonic Natural Language Processing, RASLAN 2017*, 2017, pp. 51-59.

# Automatické spracovanie akustických signálov pre bezpečnostné a priemyselné aplikácie

Dávid Čonka

Dept. of Electronics and Multimedia Communications  
FEI TU of Košice  
Kosice, Slovak Republic  
david.conka@tuke.sk

Anton Čizmar

Dept. of Electronics and Multimedia Communications  
FEI TU of Košice  
Kosice, Slovak Republic  
anton.cizmar@tuke.sk

**Abstract**—Tento článok pojednáva o neurónových sieťach aplikovaných v systémoch rozpoznávania akustických udalostí (AER). Zaoberá sa teoretickou analýzou a popisom viacerých techník predtrénovania, či trénovania. Úvodná kapitola je zameraná na všeobecnú charakteristiku AER a jeho základných komponentov. Jadro práce možno rozdeliť do štyroch kapitol, ktoré vznikli na základe použitej databázy. Dôležitým faktorom pri práci s týmito databázami bolo predspracovanie signálu. Predspracovanie dát je dôležité z hľadiska dosiahnutia lepších inicializačných hodnôt, pretože znižuje variabilitu vzoriek. Pri návrhu detektora bola použitá hlboká štruktúra neurónovej siete (DNN). DNN aplikované v praxi využívajú rôzne možnosti, ktoré im napomáhajú k získaniu lepšieho počiatočného alebo konečného bodu. Výsledné hodnoty sú porovnané na konci každej kapitoly a zhrnuté v závere práce.

**Keywords**—predspracovanie, algoritmus spätného šírenia chyby, zúžená vrstva, vyhladzovanie

**Abstract**—This paper focus on neural networks applied in Acoustic Event Recognition (AER). It theoretically analysis and describes many techniques of pre-training, whether training. The introduction chapter is focused on the general characterization of the AER and its basic components. The core of the work can split into four parts, which are based on the used database. An important factor when working with these databases was the pre-processing of input data. Data pre-processing is important from the standpoint of keeping better initialization values because it reduces values variability. For the detector design, we have used a deep neural network structure (DNN). The DNN applied in practice uses more options, which helped them to keep better initialization or final point. Final values are compared at the end of each chapter and summarized in the conclusion of the work.

**Keywords**—Pre-processing, Backpropagation Algorithm, Bottleneck layer, Smoothing

## I. ÚVOD

Zvuk je jednou z najzákladnejších vecí, ktoré dokážeme vnímať už pár dní po narodení. Väčšine z nich neprpisujeme veľký význam, avšak sú medzi nimi aj také, ktoré sú pre nás dôležité. To, či je daná informácia pre nás podstatná alebo nie, sa učíme rozpoznávať od mala. Učením sa nových zvukov, rozširujeme kapacitu nášho mozgu a tým dokážeme jednotlivým zvukom priradovať úroveň dôležitosti.

V oblasti rozpoznávania je zvuk označovaný ako akustická udalosť. Systém pracujúci na princípe rozpoznávania resp. detekcie akustických udalostí nazývame detektor. V dnešnej

dobe sú tieto systémy relatívne spoľahlivé, no stále vznikajú nové riešenia, ktoré ich zdokonaľujú.

Jedným z takýchto riešení sú aj neurónové siete. Tak ako ľudia, aj tieto systémy využívajú proces učenia. Štruktúra neurónovej siete je tvorená z vrstiev (vstupnej, skrytej, výstupnej). Počet skrytých vrstiev závisí od nárokov aplikácie. Ak neurónová sieť pozostáva z dvoch alebo viacerých skrytých vrstiev, hovoríme o hlbokoj (deep) štruktúre. Hlboká neurónová sieť (DNN) použitá na rozpoznávanie, častokrát prevýšila konvenčné prístupy. V súčasnosti sú využívané hybridné prístupy neurónových sietí, ktoré v niektorých prípadoch zvyrazňujú odstup od konvenčných systémov. Práca je orientovaná na vytvorenie spoľahlivého klasifikátora použitím neurónovej siete. Za tým účelom sú aplikované rôzne techniky predspracovania a trénovania.

Druhá kapitola popisuje základné charakteristiky akustických udalostí a prináša prehľad ich využitia. Tieto udalosti sú rozdelené podľa oblasti použitia. Všeobecná charakteristika detektora akustických udalostí spolu s blokovou schémou, sú taktiež súčasťou tejto sekcie. Tretia kapitola je venovaná neurónovým sieťam a ich rozšírenej štruktúre. Charakterizovaný je postupný vývoj neurónových sietí ako perceptrón, dopredná a rekurentná sieť, či sieť s úzkym profilom.

V experimentálnej časti je popísaná príprava dát pred samotným experimentom, architektúra siete a miery hodnotenia. Predstavené a porovnané sú aj rôzne metódy trénovania, ktorých úlohou bolo zvýšiť mieru úspešnosti detekcie. Ďalej je časť rozdelená podľa použitej databázy. V prvej časti, kde bola použitá databáza akustických udalostí, je výskum venovaný dvom udalostiam signalizujúcim potenciálnu hrozbu: výstrelu a rozbitiu skla. Neskôr sú dáta akustických udalostí orientované na detekciu výstrelu z rôznych typov zbraní. V druhej polovici je popísaný detektor spravodajských relácií, ktorého úlohou bola detekcia 10 tried. Následne boli tieto triedy zjednotené do troch skupín (reč, hudba, pozadie) a experiment prebehol odznova. Posledná sekcia zaznamenáva proces klasifikátora založeného na jednovýstupových sieťach. Každá kapitola experimentálnej časti je na záver zhodnotená a porovnaná s podobnými výskumami. Časť pôvodných vedeckých prínosov dizertačnej práce obsahuje celkový progres počas tvorby klasifikátora.

## II. ROZPOZNÁVANIE AKUSTICKÝCH UDALOSTÍ

Vedu, zaoberajúcu sa zvukom od jeho vzniku, prenosu priestorom, až po vnímanie ľudskými zmyslami nazývame akustika.

Pod pojmom akustická udalosť rozumieme zvuk, v určitých prípadoch nesúci užívateľsky dôležitú informáciu. Táto udalosť je často označovaná ako zriedkavá (rare sound) a doba jej trvania, ba dokonca samotný výskyt, nie je vopred známy [1], [2]. Systém slúžiaci na zachytávanie resp. rozpoznávanie akustických udalostí nazývame detektor. Primárnou úlohou detektora akustických udalostí je upozorniť používateľa na nastatie určitej udalosti. Najdôležitejšou vlastnosťou detektora je jeho adaptabilita. Čím viac je detektor prispôsobiteľný, tým viac relevantnej informácie dokáže zachytiť.

Podľa miesta použitia rozdeľujeme detektory na:

- interiérové - školy, banky, obchodné centrá, verejné budovy, a iné,
- exteriérové - ulice, námestia, záhrady, športoviská a iné.

Existuje nespočetné množstvo akustických udalostí a preto sú detektory zväčša prispôbené na rozpoznávanie rozdielnych zvukových aspektov. Podľa oblasti použitia ich môžeme rozdeliť na:

- bezpečnostné,
- priemyselné,
- a iné.

Detektory aplikované v bezpečnostných aplikáciách sú naprogramované na rozpoznávanie zvukov indikujúcich určitý druh nebezpečnej situácie resp. zvukov, ktoré majú na niečo upozorniť. Z hľadiska rôznych situácií ich možno ďalej deliť na: zvuky rozbitia skla [3], zvuky výstrelov [4], krik [5], plač [6], tep srdca [7], pád tela na zem [8], zmiešaná databáza [9].

Zvukové nahrávky ako napr. spravodajské relácie, firemné stretnutia, či osobné rozhovory nesú zvuky, ktoré môžu byť rozdelené do viacerých tried. Tieto akustické udalosti obsahujú ľudské zvuky ako reč, smiech, kašeľ, ale aj zvuky nevytvorené ľuďmi ako napr. pohyby stoličiek, vŕzganie dverí [10] a iné. Spomínané triedy možno zaradiť do oblasti priemyselného rozpoznávania. Patria sem: kancelárske prostredie [10], mediálne prostredie [11], verejné priestranstvá [12], detekcia rečovej aktivity (VAD - Voice Activity Detection) [13] a iné.

### A. Detektor akustických udalostí

Systém zachytávajúci akustické udalosti nazývame detektor akustických udalostí (AED - Acoustic Event Detector) [14]. V dnešnej dobe je opatrnosť na prvom mieste. Strach a obavy postupne prevyšujú nad pokojom a šťastím. Práve kvôli týmto aspektom, výskum v oblasti AED rýchlo napreduje. Tieto detektory sú väčšinou prispôbené pre rozpoznávanie určitého typu udalosti. Napríklad taký detektor rozbitia skla, slúži na vyhodnotenie poplachu rozbitím sklenenej výplne dverí, okien, výkladov a pod. Vyniká vysokou odolnosťou voči falošným poplachom, ktoré môžu spôsobiť zvuky podobné triešteniu skla. Detektor analyzuje dve frekvencie zvuku:

- nízku (úder) a

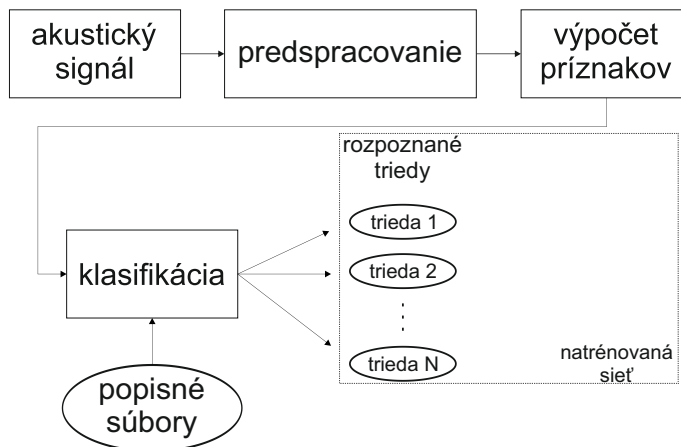


Fig. 1. Bloková schéma systému detekcie akustických udalostí.

- vysokú (rozsypenie skla).

Až po zachytení oboch frekvencií bude zahlásený alarm. Umožní to eliminovať signalizáciu udalostí, ktoré neznamenajú nebezpečie, ako sú napríklad údery konárov na okno pri silnom vetre. Častokrát sú detektory vyvíjané práve pre detegovanie udalostí znamenajúcich potenciálnu hrozbu [4], [15], [16].

Detektor akustických udalostí pozostáva z niekoľkých funkčných blokov:

- akustický signál,
- predspracovanie,
- extrakcia príznakov,
- klasifikácia,

a jeho schéma môže vyzeráť nasledovne (Obr. 1).

Prvý blok je priamo spojený so získavaním akustických údajov, t.j. nahrávok. V princípe ide o odolnosť mikrofónu voči ruchu okolia. V súčasnosti sa tento problém môže riešiť aj mikrofónovými poľami. Čím je mikrofón odolnejší, tým viac relevantnej informácie dokáže zachytiť.

Predspracovanie akustického signálu značí nastavenie parametrov ako je Hammingovo okna, jeho dĺžka, počet kanálov, segmentácia a iné. V prostredí HTK je na to vytvorený konfiguračný súbor, v ktorom sa nastavujú všetky spomínané premenné.

V ďalšom kroku sú počítané príznaky pre všetky časové úseky (rámce). Efektívnosť výpočtu príznakov zaisťuje správne zadelenie triedy v poslednom bloku, ktorým je klasifikácia.

Klasifikácia je jadrom celého detekčného systému, pretože práve tu detektor rozhoduje o výskyte vopred definovanej udalosti a upozorňuje naň. Bunka popisného súboru vstupujúca do bloku klasifikácie obsahuje označenia tried jednotlivých rámcov na základe ich obsahu. Podľa informácie o triede (označenie triedy), blok klasifikácie rozhoduje o výstupe. Porovnáva percentuálny podiel rôznych udalostí v danom časovom úseku a volí najlepšiu možnosť. Výstupom klasifikátora sú triedy rozpoznávaných akustických udalostí.

Trénovanie klasifikátora za prítomnosti popisných súborov nazývame učenie s dohľadom (supervised learning). Po tomto procese, natrénovaná resp. naučená sieť je schopná klasifikovať

akustické udalosti, ktoré ešte nepozná. Opakom učenia s dohľadom, je učenie bez dohľadu (unsupervised learning), v ktorom absentuje popisný súbor a udalosti sú klasifikované na základe skrytých premenných.

Najdôležitejšou úlohou detektora akustických udalostí je "byť v strehu" 24 hodín denne, 7 dní v týždni, 365 dní v roku. Možnosť akéhokoľvek výpadku a s tým spojeného ochromenia systému, je neprípustná.

V nedávnej dobe sa riešenie systému AED posunulo od tradičných metód ako Gaussovský model zmesí (GMM - Gaussian Mixture Model) v kombinácii so skrytými Markovými modelmi (HMM - Hidden Markov Model) ku hlbokému učeniu (deep learning) založenému na dopredných (FNN), rekurentných (RNN), konvolučných (CNN) a konvolučných rekurentných neurónových sieťach [17], [18]. Kombináciou konvulčnej a rekurentnej neurónovej siete (CRNN - Convolutional Recurrent Neural Network) pre detekciu zriedkavých akustických udalostí, sa zaoberali v [19].

Výhodou FNN oproti konvenčným systémom GMM-HMM je vyššia expresívna schopnosť (higher expressional capability) nad nelineárnymi funkciami. Jej nevýhodou je, že obsahuje fixné spojenia, takže každá váha je pevne spojená s párom neurónov. To robí sieť FNN menej robustnou voči miernym spektrálnym posunom akustických vlastností v tej istej akustickej triede. Tieto nepatrné posuny sú hlavným faktorom vnútornej premenlivosti akustických tried. Spomínaný problém bol prekonaný s príchodom konvulčných neurónových sietí aj napriek tomu, že časový kontext je dosť krátky. CRNN kombinuje dlhšie modelovanie vrstiev RNN a robustnosť CNN na malé zmeny spektrálneho posunu.

Pri vývoji akustických detektorov využívaných v reálnom prostredí, existuje niekoľko ťažkostí:

- prirodzená akustická premenlivosť zvukov patriacich do tej istej triedy udalostí,
- prekrývajúce sa udalosti (overlapping),
- šum prostredia,
- premenlivosť akustických vlastností pozadia akustickej scény,
- zriedka sa vyskytujúce akustické udalosti (rare sounds).

Hlavným problémom detekcie zriedkavých udalostí pri použití neurónových sietí je nerovnováha ich časového trvania. Princíp činnosti AED je v tom, že sieť sa učí vzťah medzi označujúcou triedou (0, 1,..) a vstupnou reprezentáciou (vektor, matica,..). Počas učenia, klasifikátor počítá pravdepodobnosti pre každý časový rámec. Avšak pri zriedkavých zvukov, označenia tried vo väčšej miere absentujú. Pokiaľ je tréningový proces vhodne upravený, klasifikátor bude predpovedať výskyt zriedkavej udalosti. Nerovnováha dát je veľmi častým a bežným problémom pri strojovom učení (machine learning) riešená rozširovaním dát pomocou časového rozťahovania zmiešavania blokov, prevzorkovaním, syntézou nových vzoriek pomocou generatívnych metód.

### III. NEURÓNOVÁ SIEŤ

Nasledujúce kapitoly sa zaoberajú neurónovými sieťami a ich praktickým použitím.

Pôvod neurónovej siete (NN - Neural Networks) možno hľadať v biologickom nervovom systéme, ako je mozog. Sieť napodobňuje procesy prebiehajúce v nervových bunkách človeka [20], [21]. Niekedy je nazývaná aj ako mozog bez mysle [22]. V posledných rokoch bol často používaný názov umelé neurónové siete (ANN - Artificial Neural Network), ktoré boli implementované v elektronickom zariadení. ANN od ich vzniku, považujeme za jeden z najslubnejších technologických konceptov pre informačné systémy akými sú rozpoznávanie vzorov (pattern recognition), rozpoznávanie reči, či rozpoznávanie akustických udalostí (AER - Acoustic Event Recognition).

ANN sú skutočne založené na biologickom nervovom systéme. Sú zložené z viacerých kľúčových vlastností biologického systému ako napríklad: distribuovaný výpočtový mechanizmus, prispôbitelnosť, nelinearita a jednoduchosť výpočtu. Napriek veľkým pokrokom v oblasti biológie, celková funkčnosť nervového systému, hlavne mozgu, nebola zatiaľ úplne objasnená. Preto boli ANN spočiatku definované ako systémy produkujúce výstup, transformáciou vstupného signálu. To všetko pomocou paralelného spracovania v sieti.

#### A. Architektúra neurónovej siete

Štruktúra neurónovej siete pozostáva z veľkého množstva uzlov, ktoré koncepčne predstavujú neurónovú bunku v reálnom biologickom nervovom systéme a zo vzájomných prepojení, ktoré korešpondujú s axónmi. Každý uzol pozostáva z dvoch častí:

- jedna pre počítanie bázeckej (basis) funkcie  $\beta()$  - prijíma signál, ktorý môže byť vstupom do siete alebo výstupom iného uzla, navyše počítá vstupný signál do aktivačnej funkcie
- druhá pre počítanie aktivačnej funkcie  $\alpha()$  - produkuje výstupný signál, ktorý môže byť konečným výstupom siete, alebo vstupom do iného uzla

1) *Perceptrón*: Najjednoduchšou formou umelej neurónovej siete je perceptrón. Perceptrón pozostáva z viacerých vstupov, bunky sčítania a jedného výstupu  $O$ . Spojenia, v biológii nazývané axóny, ktoré sú viazané na váhy  $w_k$ , prenášajú vstupné elementy signálu  $i_k$  do sčítacej bunky. Tu sú podľa vzťahov 3, 4 počítané bázecké a aktivačné funkcie. Váhy prislúchajú všetkým spojeniam siete a v niektorých prípadoch sú časovo premenlivé III-A3.

$$\frac{\delta W}{\delta t} \neq 0 \quad (1)$$

Váhy všetkých prepojení môžu byť usporiadané nasledovne:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & \dots & w_{1N} \\ \cdot & \dots & \cdot \\ w_{N1} & \dots & w_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Potom bázecká funkcia  $\beta()$  počítá vstupný signál do aktivačnej funkcie podľa

$$\beta(i) = \sum_{k=1}^N w_k i_k \quad (3)$$

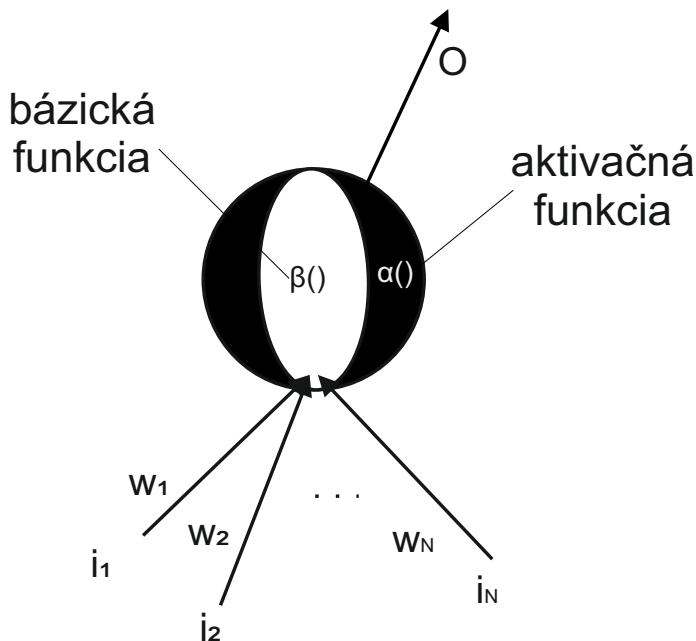


Fig. 2. Perceptrón.

a aktivačná funkcia počíta výsledný výstup neurónu  $O$

$$O = \alpha(\beta(i)). \tag{4}$$

Na Obr. 2 je znázornený výpočtový mechanizmus v neurónovej sieti, pozostávajúci z  $N$  vstupov,  $N$  váh,  $N$  spojení a jedného výstupu. Vo väčšine prípadov je výstup v rozmedzí  $0 - 1$ . To zabezpečuje počítanie aktivačnej funkcie [23], [24]. Výstup aktivačnej funkcie je zároveň výstupom perceptrónu podľa rovnice 4.

Poznámka: šípky vychádzajúce z tmavej časti, ktoré sú výsledkom aktivačnej funkcie, putujú do svetlej elipsy ako vstup ďalšieho neurónu, kde je počítaná bázická funkcia.

Nemenej dôležitou súčasťou neurónovej siete je jej architektúra. Neurónová sieť pozostáva z minimálne troch vrstiev:

- vstupnej
- skrytej
- a výstupnej

Všeobecná teória uvádza, že existuje trojvrstvová sieť, ktorá aproximuje prakticky akúkoľvek nelineárnu funkciu. Neuvádza však, koľko vrstiev by mala mať sieť pre riešenie zložitých problémov. Presný počet neurónov potrebných na modelovanie je nevyriešenou otázkou. Hoci neexistuje jasná odpoveď, počet neurónov závisí od nelinearity a rozmernosti dát. Vysoko nelineárne problémy vyžadujú väčšie množstvo neurónov ako tie hladšie. Príliš veľa neurónov môže viesť k preučeniu (overlearning) siete. Na druhej strane, málo neurónov bráni sieti v správnom učení. Na efektívne určenie počtu neurónov je možné použiť nasledovné riešenia:

- skúsenosť - môže pomôcť určiť počet skrytých neurónov, alebo optimálnu veľkosť siete možno získať procesom známym ako pokus - omyl,

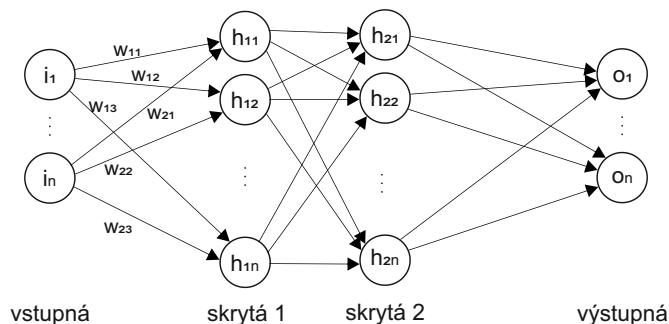


Fig. 3. Dopredná neurónová sieť.

- optimalizácia - pridáva resp. odstraňuje neuróny podľa potreby počas tréningu.

Prvý kontakt siete s vonkajšími dátami zabezpečuje vstupná vrstva. Množstvo neurónov, nachádzajúcich sa na vstupnej vrstve, je priamo úmerné veľkosti dát. Neuróny skrytej vrstvy sú vzájomne prepojené s neurónmi vstupnej vrstvy a zároveň s neurónmi výstupnej vrstvy. Neuróny patriace skrytej vrstve nazývame skryté neuróny. Ich počet je úmerný obtiažnosti riešeného problému. Rovnako počet skrytých vrstiev závisí od riešenia.

Klasická neurónová sieť pracuje s jednou skrytou vrstvou. Sieť s viac ako jednou skrytou vrstvou je označovaná ako hlboká (deep) [25], [26]. Hlboká neurónová sieť (DNN - Deep Neural Network) pôvodne označovala viacvrstvové perceptróny s viacerými (často viac než dvoma) skrytými vrstvami. Neskôr bol tento názov rozšírený na všetky neurónové siete s hlbokou štruktúrou. DNN má v moderných systémoch rozpoznávania dôležitú úlohu. Z pohľadu smeru prenosu informácie možno štruktúru NN rozdeliť do dvoch častí [27]:

- dopredné neurónové siete,
- rekurentné neurónové siete.

2) *Dopredná neurónová sieť*: Dopredná neurónová sieť (FNN - Feed-forward Neural Network) bola v minulosti označovaná ako viacvrstvový perceptrón (MLP - Multi Layer Perceptron). Tento typ neurónovej siete bol vytvorený hlavne kvôli odstráneniu limitov jednoduchého perceptrónu. V podstate, MLP využíva vrstvu neurónov, ktoré sú považované za extraktory vlastností. Súčasná terminológia nazýva danú vrstvu tiež skrytá a jej neuróny takisto skryté. Výstup produkovaný skrytými neurónmi nie je priamo výstupom siete, ale môže byť vstupom ďalšej skrytej vrstvy, alebo vstupom výstupnej vrstvy [28].

Dopredná neurónová sieť je tvorená jednou alebo viacerými vrstvami, nachádzajúcimi sa medzi vstupom a výstupom siete [29]. Jednotlivé neuróny sú medzi sebou navzájom prepojené a šípky prepojení ukazujú smer, ktorým bude informácia postupovať [30], [31], [32].

Typickým predstaviteľom FNN je Obr. 3. Táto sieť pozostáva zo štyroch vrstiev. Neuróny vstupnej vrstvy  $i_k$  priamo ovplyvňujú neuróny na prvej skrytej vrstve  $h_{1k}$ , s ktorou sú prepojené. Jednotlivé spojenia sú váhované pomocou koeficientov  $w_{1k}$ , uvedených v matici 2. Neuróny prvej skrytej



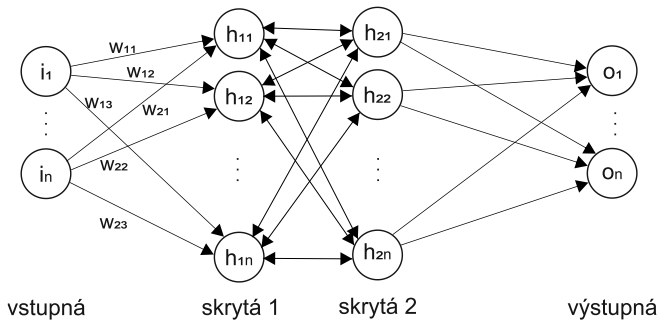


Fig. 4. Rekurentná neuronová sieť.

vrstvy sú vzájomne prepojené s neurónmi druhej skrytej vrstvy  $h_{2k}$  a spojenia sú váhované koeficientami  $w_{2k}$ . Výstup druhej skrytej vrstvy je prepojený s neurónmi výstupnej vrstvy  $o_k$ . Pre všetky uvedené koeficienty  $k$  platí, že ich počet môže byť rôzny  $k = 1, 2, \dots, n$ . Výstupná vrstva používa tzv. rozhodujúce pravidlo a prikláňa sa k výstupu s najväčšou hodnotou, teda najväčším percentuálnym podielom.

3) *Rekurentná neuronová sieť*: Rekurentná neuronová sieť (RNN - Recurrent Neural Network), ako to samotný názov indikuje, môže opakovane spracúvať tú istú udalosť. Výstupný signál neurónu nemusí postupovať iba priamo k nasledujúcemu neurónu (bližšie k výstupu), ako to bolo u spomínanej doprednej siete, ale môže ovplyvniť aj predchádzajúci (na predošlej vrstve), okrem neurónov vstupnej vrstvy. Niekedy, môže výstupný signál z neurónu aktivovať samého seba.

RNN označujeme aj úplne prepojená sieť, pretože všetky uzly sú prepojené. Hoci je počet neurónov pevne daný, táto sieť, narozdiel od čiastočne prepojenej siete, akou bola FNN, vie principiálne lepšie reprezentovať informáciu, kvôli väčšiemu počtu váh. Aj napriek tomu, dokonale prepojená architektúra nie je stále ideálnym riešením. Pre neuronové siete je teda nevyhnutné správne nastavenie parametrov spojení. RNN je obzvlášť vhodná pre časovo premenlivé dáta ako napr. reč. Nedávne výsledky ukázali, že FNN je vhodným kandidátom pre vzorovú klasifikáciu.

Obr. 4 znázorňuje rekurentnú neuronovú sieť, ktorá pozostáva zo štyroch vrstiev. Architektúra siete je veľmi podobná s FNN (Obr. 3) s tým rozdielom, že tu sú pridané aj rekurentné (spätne) spojenia, čo náramne zväčšuje kapacitu siete [27], [33], [34].

V [35] je znázornená architektúra plne rekurentnej neuronovej siete, ktorá bola navrhnutá Elmanom [36]. Neuróny medzi susednými vrstvami sú navzájom prepojené [20].

Rôzne rekurentné siete používajú časovo oneskorené slučky na skrytých a výstupných jednotkách doprednej siete. RNN môžu byť transformované do ekvivalentných dopredných sietí tak, že budú trénované čiastočne modifikovaným (EBP - Error Backpropagation) algoritmom.

- Všetky kópie rozprestretých váh sú nútene byť identickými.

- Požadovanými výstupmi sú funkcie času a chyby musia byť počítané pre každú kópiu výstupnej vrstvy. Ďalším riešením je definícia cieľovej funkcie iba v určitom čase (napríklad na konci slova alebo fonémi).

Čiastočne rekurentné siete primárne používajú dopredné spojenia, okrem obmedzenej sady spätých spojení. Tieto siete sú zvyčajne implementované rozšírením vstupného poľa prídavnými spätnými jednotkami, ktoré pozostávajú zo skrytých alebo výstupných jednotiek. Spätne jednotky si pamätajú niektoré aspekty minulosti. Stav celej siete v každom časovom okamihu závisí od zhromažďovania predošlých stavov [37].

### B. Vlastnosti s úzkym profilom

Vlastnosti s úzkym profilom sú konvenčne generované z neuronových sietí, v ktorých jedna zo skrytých vrstiev (obyčajne stredná) má veľmi málo skrytých jednotiek v porovnaní s ostatnými vrstvami. Z pohľadu špeciálnej štruktúry NN je táto vrstva nazývaná zúžená.

Neuronová sieť je vnútri zúžená tak, že vstupná informácia týkajúca sa klasifikácie alebo rekonštrukcie príznakov, bude nútene reprezentovaná v nižšom rozmere. Odkedy sú aktivačné funkcie na zúženej vrstve reprezentované nižším rozmerom vnútornej štruktúry zo vstupu, NN so zúženou vrstvou môže byť považovaná za prístup nelineárneho znižovania rozmeru.

V posledných rokoch sa zúžená charakteristika ukázala ako účinná vo vlastnom kódovaní. Toto kódovanie je trénované na predvídanie vstupných vlastností a zvyšovanie účinnosti rozpoznávača.

Nedávno boli zúžené charakteristiky odvodené vplyvom DNN predtrénovania a predvídaním kontextovo- závislých zviazaných stavov. Aj keď boli dosiahnuté dôležité zlepšenia DNN na základe použitia zúženej vrstvy oproti konvenčnej metóde, výkonnosť je stále o niečo horšia v porovnaní s hybridnými modelmi (CD-DNN-HMM). Neuronová sieť so zúženou vrstvou bola použitá na rozpoznanie rečníkov (speaker recognition) a jazykov (language recognition) v [38].

Obr. 5 znázorňuje architektúru NN so zúženou štruktúrou. Ide o typickú DNN s piatimi skrytými vrstvami a zúženou vrstvou v strede. Lineárne výstupy zo zúženej vrstvy sú považované za základné vlastnosti zúženia. Môžu byť priamo použité na trénovanie GMM-HMM.

## IV. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Neuronová sieť je podľa kapitoly III-A tvorená z veľkého počtu neurónov, ktoré sú vzájomne prepojené. Možno povedať, že tieto uzly sú situované na vrstvách. Základnou úlohou architektúry je jasne definovať hranice medzi jednotlivými vrstvami. Sieť použitá v nasledujúcich experimentoch bola tvorená štyrmi vrstvami: vstupnou, dvoma skrytými a výstupnou.

Na načítavanie vstupov bol navrhnutý algoritmus, v ktorom zo vstupných matic  $13 \times N$  a z riadkových vektorov  $1 \times N$ , kde  $N$  predstavuje počet stĺpcov (rámcov), boli vytvorené globálna matica a globálny riadkový vektor (Obr. 6). Globálny riadkový vektor bol následne upravený na príslušný počet výstupov. V

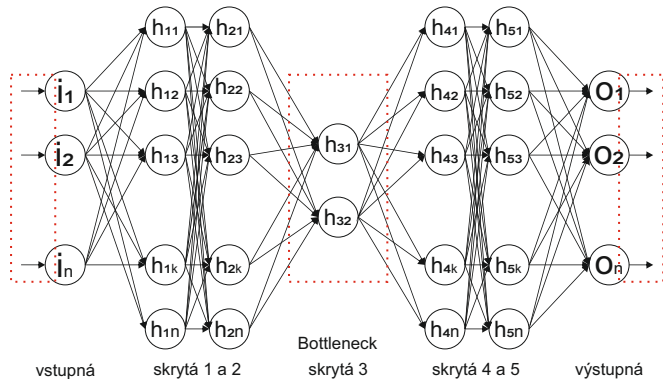


Fig. 5. Architektúra neurónovej siete so zúženou vrstvou.

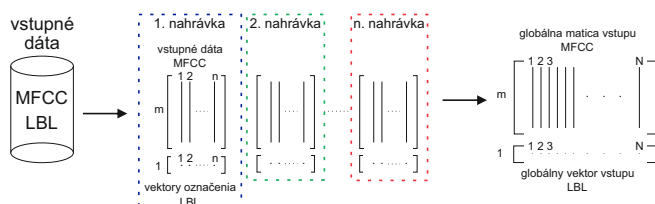


Fig. 6. Príprava vstupných dát pre ďalšie výpočty v neurónovej sieti.

prípade dvoch výstupov (trieda 1 a ostatné), obsahoval hodnoty (1, 0). Týmto sa sieť dokáže naučiť rozpoznávať dané udalosti.

Takto upravené dáta sú vhodné na tréning siete. Natrénovaná neurónka sa v ďalšom kroku otestovala s novou sadou dát, ktoré ešte nepoznala. Výstupom testovacieho procesu je matica, obsahujúca reálne čísla. Na výstup sme aplikovali funkciu *softmax*, ktorej úlohou je upraviť dáta tak, aby ich súčet predstavoval hodnotu 1. Názorná ukážka funkcie softmax je zobrazená na obrázku 7. Vstupom do funkcie softmax je v našom prípade výstupná matica získaná po testovaní. Výstup funkcie softmax reprezentuje prepočítané hodnoty, podľa pravidla uvedeného vyššie.

Aktuálny výstup neurónovej siete predstavuje percentuálne vyjadrenie nastatia tej - ktorej udalosti. Na túto maticu bola aplikovaná funkcia  $max(A)$ . Úlohou maximalizácie je vrátiť najvyššiu hodnotu v danom poli.

- Ak  $A$  predstavuje vektor, výstupom funkcie je najvyššia hodnota v danom vektore.
- Ak  $A$  je matica, výstupom je riadkový vektor reprezentujúci maximálne hodnoty v jednotlivých stĺpcoch.

Keďže sme po aplikácii funkcie softmax získali maticu hodnôt, po maximalizácii sme dostali riadkový vektor s maximálnymi hodnotami. Podľa toho, v ktorom riadku sa maximálna hodnota po softmaxe nachádzala, bola jej priradená príslušná trieda (pozri obrázok 8). Týmto úkonom dostávame vektor zachytávajúci triedy akustických udalostí, ktoré nastali v danom časovom úseku. Tento výstupný vektor bol porovnaný s predikovaným výstupom. Predikovaný výstup chápeme ako vektor vstupujúci do testovacieho procesu s označenými triedami akustických udalostí. Na základe daného porovnania vzniklo viacero prípadov. Ich počet je závislý od množstva ty-

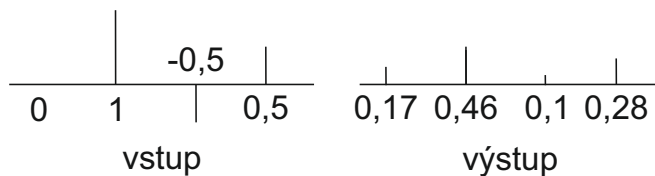


Fig. 7. Aplikácia funkcie softmax.

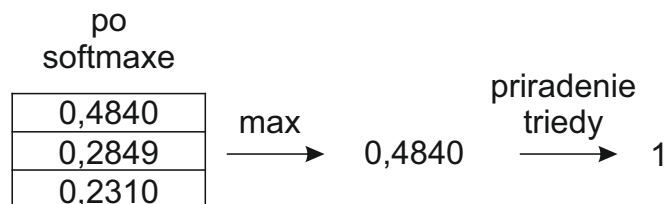


Fig. 8. Priebeh maximalizácie po funkcii softmax.

po akustických udalostí. V nasledujúcich častiach je popísané hodnotenie experimentov pri existencii dvoch tried.

Hodnotenie experimentov je dôležitou časťou výskumu. Na porovnanie predikovaného výstupu (trieda 1, trieda 2) a reálneho výstupu (správne alebo nesprávne rozpoznanie udalosti) je ideálne použiť stavy konfúznej matice (confusion matrix, error table). Matice resp. tabuľka je tvorená viacerými stavmi a ich počet závisí od počtu tried (tabuľka I).

- Ak detektor správne rozpozná triedu 1, ktorá bola na vstupe, hovoríme o tzv. pozitívnej klasifikácii (tp - true positive).
- Ak triedu 2 rozpozná ako triedu 1, ide o nesprávne klasifikovanú negatívnu udalosť (fn - false negative).
- (fp - false positive) značí zlé rozpoznanie triedy 1.
- Na záver (tn - true negative), znamená správne rozpoznanie triedy 2 [39].

Hlavná diagonála konfúznej matice, značí korektné rozpoznanie danej triedy a v ideálnom prípade, by na ostatných miestach mala byť 0. To by značilo plnohodnotnú detekciu všetkých tried. Podstatnou úlohou je vyhodnotenie precíznosti (vzťah 6) a úplnosti (vzťah 7) detekcie jednotlivých akustických udalostí, za pomoci získaných informácií.

Jedným zo základných hodnotiacich parametrov je presnosť (Acc - Accuracy). Táto miera je definovaná vzťahom:

$$presnosť = \frac{tp + tn}{tp + fp + fn + tn} \tag{5}$$

Parameter Acc hodnotí celkovú úspešnosť bez zamerania sa na jednotlivú triedu, čo môže byť v niektorých prípadoch nežiadúce. Avšak aj takýto nedostatok sa dá odstrániť. Parametre precíznosť (precision), úplnosť (recall) a F-miera (F-measure) určujú úspešnosť na báze rôznych tried.

$$precíznosť = \frac{tp}{tp + fp} \tag{6}$$

Precíznosť je funkcia pre správne rozpoznané vzory (tp - true positives) a nesprávne klasifikované pozitívne vzory (fp -

udalosť (trieda)	správne	nesprávne
trieda 1	tp	fp
trieda 2	fn	tn

TABLE I

KONFÚZNA MATICA PRE 2 TRIEDY, KDE RIADKY PREDSTAVUJÚ VSTUPY A STĽPCE VÝSTUPY

udalosť (trieda)	počet audio udalostí	trvanie [hod]
sklo	34	0:06:58
výstrel	85	1:05:56
pozadie	79	6:34:10

TABLE II

ROZSAH DATABÁZY AKUSTICKÝCH UDALOSTÍ A POZADIA

false positives).

$$\text{úplnosť} = \frac{tp}{tp + fn} \quad (7)$$

Úplnosť vyjadruje vzťah medzi správne rozpoznávanými vzormi (tp) a chybné klasifikovanými vzormi (fn). Úplnosť sa niekedy označuje aj ako citlivosť (sensitivity). Veľkosť citlivosti sa priamo odráža na rozpoznaní. Teda vyššia citlivosť zachytí viac relevantnej informácie.

$$F - \text{miera} = \frac{(\beta^2 + 1) \times \text{precíznosť} \times \text{úplnosť}}{\beta^2 \times (\text{precíznosť} + \text{úplnosť})} \quad (8)$$

F-miera vyjadruje celkovú podstatu precíznosti a úplnosti. Ak  $\beta = 1$ , F-miera je rovnomerne vyvážená a teda:

$$F - \text{miera} = \frac{2 \times \text{precíznosť} \times \text{úplnosť}}{\text{precíznosť} + \text{úplnosť}} \quad (9)$$

Precíznosť, úplnosť a F-miera sú zamerané na konkrétnu triedu tzv. pozitívny vzor [40].

### A. Akustické udalosti

V prvom výskume bola pozornosť venovaná dvom akustickým udalostiam (AE - Acoustic Event) signalizujúcim potenciálnu hrozbu: výstrelom a rozbitiu skla. Okrem týchto udalostí sú zastúpené aj úseky ticha, hudby či iné rušivé momenty, ktoré spolu vytvárajú tretiu triedu - triedu pozadia. Zvuky pozadia sú tvorené počnúc športovými podujatiami, hudobnými festivalmi, či divadelnými predstaveniami [3]. Tieto nahrávky sú súčasťou databázy JDAE TUKE [41]. Ich rozsah je uvedený v tabuľke II.

Pri tvorbe MFCC bol v konfiguračnom súbore nastavený formát ako MFCC\_E. Preto bolo vyprodukovaných 39 MFCC príznakov. Po vynechaní troch energetických koeficientov sme dostali 36 rozmerný vektor. Práve tieto príznaky boli privedené na vstup siete. Názorná ukážka siete, s ktorou sme pracovali v prvom výskume je na obrázku 9. Ako už bolo spomenuté vyššie, sieť pozostáva zo 4 vrstiev. Dve skryté vrstvy majú 10 a 5 neurónov. Výstupná vrstva nadobúda tri hodnoty (0, 1, 2) symbolizujúce pozadie, výstrel a rozbitie skla.

Podľa podkapitoly I sme vytvorili konfúznú maticu zodpovedajúcu počtu tried akustických udalostí. Keďže v tomto výskume riešime 3 triedy (sklo, výstrel, pozadie) počet parametrov v konfúznej matici stúpne na 9 (tabuľka III).

Tabuľka je reprezentovaná nasledovnými symbolmi:

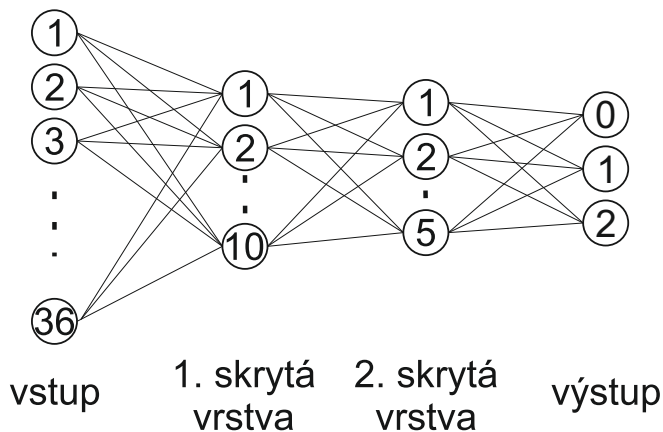


Fig. 9. Architektúra použitej siete

udalosť (trieda)	sklo	výstrel	pozadie
sklo	Ts	Fs1	Fs2
výstrel	Fv1	Tv	Fv2
pozadie	Fp1	Fp2	Tp

TABLE III

KONFÚZNA MATICA PRE 3 TRIEDY AKUSTICKÝCH UDALOSTÍ.

- T (true) - správne,
- F (false) - nesprávne,
- s - sklo,
- v - výstrel,
- p - pozadie,
- o - ostatné,
- čísla 1, 2 nemajú špeciálny význam, slúžia len na rozlíšenie udalostí (pozadie, výstrel, rozbitie skla).

Konfúzná matica s reálnymi hodnotami je zobrazená na obrázku IV. Táto matica bola vytvorená po testovaní, kedy boli porovnané požadovaný a reálny výstup. Ich hodnoty boli podstatné pre výpočet precíznosti a úplnosti výstrelom a skla.

Keď už máme jasno v konfúzných maticiach a ich koeficientoch, predstavíme si vzorové výpočty podľa rovníc 6 a 7. Precíznosť výstrelu vypočítame nasledovne:

$$\text{precíznosť} = \frac{Tv}{Tv + Fv} = \frac{2621}{2621 + 742} = 77,94\% \quad (10)$$

Úplnosť pre výstrel je daná takto:

$$\text{úplnosť} = \frac{Tv}{Tv + F0} = \frac{2621}{2621 + 197} = 93,01\% \quad (11)$$

Výsledná hodnota precíznosti výstrelu je 77,94% a úplnosti výstrelu 93,01%. Celkové rozpoznanie akustických udalostí bolo vyhodnotených F-mierou, podľa vzťahu 9. Vzorový výpočet F-miery pre výstrel vyzerá nasledovne:

$$F - \text{miera} = \frac{2 \times 0,7794 \times 0,9301}{0,7794 + 0,9301} = 84,81\% \quad (12)$$

Funkcia detektora akustických udalostí bola overená na troch neurónových sieťach: doprednej, rekurentnej a Elmanovej. Dosaiahnuté výsledky sú porovnané v grafe 10

udalosť (trieda)	sklo	výstrel	pozadie
sklo	835	136	183
výstrel	183	2621	559
pozadie	79	61	3223

TABLE IV

KONFÚZNA MATICA PRE 3 TRIEDY AKUSTICKÝCH UDALOSTÍ S REÁLNE NAMERANÝMI HODNOTAMI.

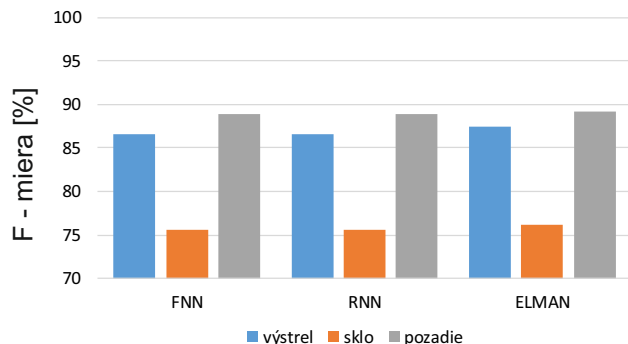


Fig. 10. Porovnanie dosiahnutej F-miery akustických udalostí.

Ako už vieme z tabuľky II, trvanie zvukov rozbitia skla nebolo ani zďaleka porovnateľné s ostatnými akustickými udalosťami. Neurónová sieť sa preto viac naučila rozpoznávať výstrely a pozadie. Z toho dôvodu je hodnota F-miery pre sklo najnižšia. F-miera výstrelu bola nameraná na 87,46 %. Pozadie, keďže rozdeľovalo tak výstrely ako aj rozbitie skla, bolo najpočetnejšou triedou a dosiahlo najlepšiu úspešnosť detekcie.

Obrovský nepomer rozsahu jednotlivých tried viedol k častému pretrénovaniu a skresleným výsledkom. Z tohto dôvodu boli globálne dáta (matica a vektor) rozdelené na tzv. "úseky triedy". Globálny riadkový vektor pozostával z troch tried označených číslami. To znamená, že obsahoval reťazec čísel 0, 1 a 2. Z tohto vektora (ako aj zo vstupnej matice mfcc príznakov) boli postupne vyberané úseky výstrel, skla a pozadia a náležite boli z týchto dát vytvorené samostatné matice a vektory. Výstupom popísaného procesu boli 3 matice (matica výstrel, skla a pozadia) a 3 riadkové vektory reprezentujúce spomínané triedy. Ďalší výskum v tejto časti bol nasledovný.

1) *Vplyv použitia tréningového algoritmu:* Jednou z prvých vecí pri návrhu neurónovej siete je voľba tréningového algoritmu. Používanie nevhodného algoritmu má za následok neuspokojivé výsledky a preto sme sa hneď v úvode zamerali na overenie vplyvu použitia rôznych tréningových algoritmov na celkovú úspešnosť detekcie.

Postupne boli použité tieto algoritmy:

- Levenberg - Marquardt backpropagation,
- Bayesian regularization backpropagation,
- Scale conjugate gradient backpropagation,
- Resilient backpropagation,
- Gradient descent backpropagation,
- Gradient descent with momentum backpropagation,

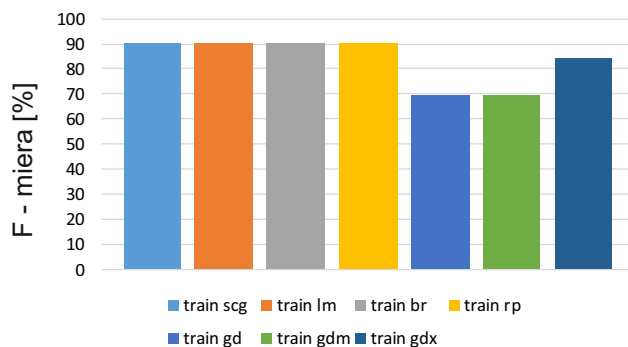


Fig. 11. Vplyv použitia rôznych tréningových algoritmov

- Gradient descent with momentum and adaptive learning rate backpropagation.

Podľa predošlých výpočtov F - miery bola pre tento experiment uprednostnená FNN. Vplyv použitia tréningového algoritmu na úspešnosť detekcie v doprednej neurónovej sieti zaznamenáva Obr. 11. Scale conjugate gradient backpropagation algoritmus dosiahol najlepšie výsledky a preto sme ho v ďalších postupoch uprednostnili pred ostatnými algoritmi. Výhodou daného algoritmu je rýchlosť tréningu. Tréning bolo zastavované pri dosiahnutí maximálneho validačného overenia.

2) *Vplyv použitia vyhladzovacieho okna:* V tejto časti sme skúmali vplyv použitia vyhladzovacieho okna na celkovú úspešnosť rozpoznania. Program bol navrhnutý na postupné inkrementovanie veľkosti vyhladzovacieho okna. Z týchto meraní sme vybrali 6 najproduktívnejších okien.

- bez - detekcia bez použitia vyhladzovacieho okna,
- med 7 - použitie vyhladzovacieho okna dĺžky 7,
- med 10 - okno dĺžky 10,
- med 10 a 20 - okno dĺžky 10 a následne 20,
- med 20 - okno dĺžky 20,
- med 39 - okno dĺžky 39.

Aplikácia vyhladzovacích okien odstránila nežiadúce zmeny signálu (peaks). V tomto prípade bola hodnotiacim parametrom úspešnosť (Acc - Accuracy) daná vzťahom 5.

Aj v tejto časti boli realizované merania pre všetky neurónové siete. Najlepšie tu pracovala Elmannova sieť, kde použitie vyhladzovacieho okna dĺžky 20 prinieslo o viac ako 0,4 % vyšší úspech ako proces bez použitia vyhladzovacieho okna. Hoci výpočtové procesy v Elmannovej sieti trvajú oveľa dlhšie v porovnaní s FNN a RNN, práve Elmannova sieť dosiahla najlepšie výsledky 12.

Zistili sme, že úspešnosť neurónových sietí možno zvýšiť aplikáciou vyhladzovacieho okna na otestované dáta pred samotným vyhodnotením. V doprednej sieti bola úspešnosť zvýšená použitím všetkých vyhladzovacích okien okrem okna s dĺžkou 39. Naopak v rekurentnej sieti nedosiahlo použitie vyhladzovania požadované zlepšenie. Elmannova sieť pracovala najlepšie s využitím vyhladzovacieho okna dĺžky 20.

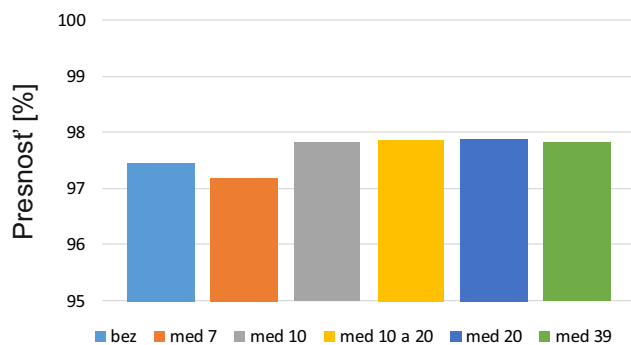


Fig. 12. Vplyv použitia rozdielnych vyhladzovacích okien pre ENN.

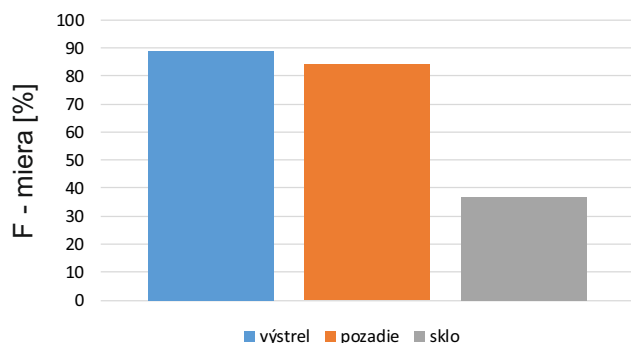


Fig. 13. Porovnanie dosiahnutých úspešnosti pri použití ENN so zúženou vrstvou.

Použitím vyhladzovania sme dokázali navýšiť úspešnosť rozpoznania v prípade doprednej a Elmannovej siete. Rekurentná sieť tu najlepšie pracovala bez vyhladenia.

3) *Vplyv použitia zúženej vrstvy:* Zúženou vrstvou (BN - Bottleneck) nazývame takú vrstvu, ktorá má oproti ostatným vrstvám výrazne nižšiu reprezentáciu neurónov. Táto vrstva je zväčša situovaná v strede neurónovej siete. Zúžená vrstva už bola prezentovaná v sekcii III-B.

Rovnako aj pri tejto snahe zvýšiť presnosť detekcie, dosiahla Elmannova sieť najlepšie výsledky (Obr. 13). Nanešťastie, nepodarilo sa prekonať doterajšie hodnoty namerané pre opisovanú sieť, dokonca tu bola získaná takmer 10% nižšia úspešnosť detekcie. Nadobudnutý nedostatok sme sa pokúsili vylepšiť dodatočnou aplikáciou vyhladzovania. Avšak použitím vyhladzovacieho okna neboli dosiahnuté lepšie hodnoty ako v prípade bez vyhladzovania. Z uvedeného možno konštatovať, že vyhladzovanie neurónovej siete so zúženou vrstvou pri detekcii akustických udalostí neprináša zlepšenie.

### B. Detekcia rôznych typov zbraní

V tejto sekcii je opísaný experiment založený na detekcii rôznych typov zbraní. Tieto akustické udalosti sú súčasťou databázy JDAE TUKE. Detektor pracuje na báze neurónovej siete s doprednými alebo rekurentnými spojeniami. Použité boli dve skryté vrstvy, pričom na prvej sa nachádzalo 10 a druhú tvorilo 5 neurónov.

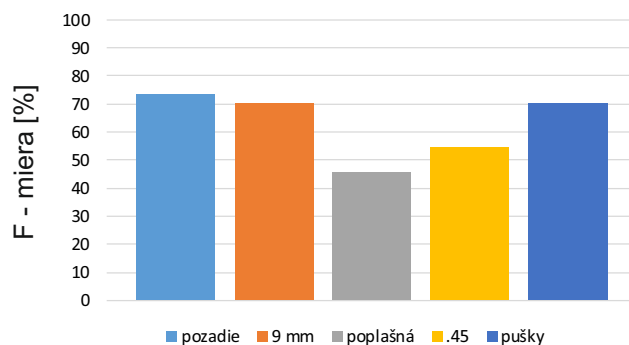


Fig. 14. Detekcia rôznych typov zbraní v RNN.

Akustické udalosti privedené na vstup neurónovej siete možno rozdeliť do piatich tried:

- zvuky pozadia - úseky ticha, vtáčí spev, šum,
- výstrely z 9 mm ráže (tzv. deviatka) - 9 mm Makarov a 9 mm Browning,
- výstrely z poplašnej zbrane,
- výstrely z guľovej zbrane - guľovnica, brokovnica, Winchester,
- výstrely z .45 (tzv. štyridsaťpäťka).

Množina dát použitá pri tejto realizácii má vyše 60 minútové trvanie. V prvej časti boli použité všetky dáta bez akýchkoľvek zmien, t.j. zmiešané. Teda jednotlivé výstrely boli oddelené zvukmi pozadia (tzn. ticho resp. šum pred a po výstrele) a nie všetky výstrely tej istej triedy nasledovali bezprostredne za sebou. Pri tomto experimente, takmer 100 % F - miera, bola rozpoznaná trieda pozadia. Mohol to spôsobiť nadmerný výskyt úsekov tejto triedy (20-násobne viac ako výstrely z 9 mm ráže). Tým pádom sa sieť pretrénovala.

Problém pretrénovania sme sa snažili odstrániť úpravou dát. Rovnomerné rozloženie jednotlivých akustických udalostí, vedie k zrovnoprávneniu tried a malo by upraviť výsledné hodnoty testovania.

Z toho dôvodu boli všetky dáta v tréningovej aj v testovacej časti upravené na rovnaký počet vektorov. Postupne sa vytvorili jasne rozpoznateľné úseky výstrelův rôznych typův zbraní a pozadia. Tieto upravené akustické udalosti boli privedené na vstup neurónovej siete.

Najlepšie hodnoty boli dosiahnuté pri použití rekurentnej siete (pozri Obr. 14). Tri triedy tu dosiahli pozitívne rozpoznanie okolo 70%. V ďalšom kroku sme sa sústredili na zistenie vplyvu použitia rôznych tréningových algoritmov.

1) *Vplyv použitia tréningového algoritmu na úspešnosť detekcie rôznych typův zbraní:* Proces bol spustený pre rekurentnú sieť, ktorá v predchádzajúcej časti pracovala najefektívnejšie. Na experiment týkajúci sa použitia rôznych tréningových algoritmov, sme zvolili triedu obsahujúcu výstrely z pušiek. Práve trieda označená pušky, dosahovala v doprednej a rekurentnej sieti (bez ohľadu na triedu pozadia) najvyššie hodnoty (Obr. 14).

Rozdiel prvých štyroch algoritmov podľa Obr. 15 je v rozmedzí 2%. Najefektívnejšie pracuje Resilient backpropa-

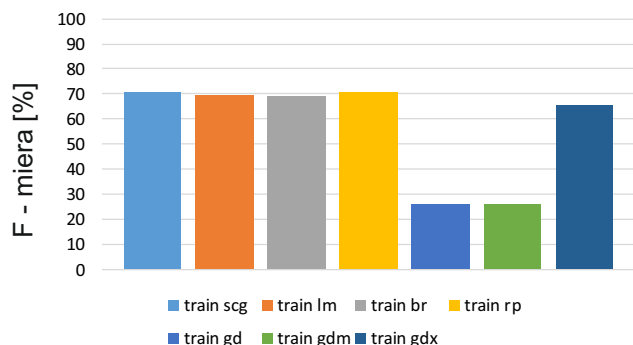


Fig. 15. Vplyv tréningového algoritmu na úspešnosť detekcie pri rozpoznaní rôznych typov zbraní.

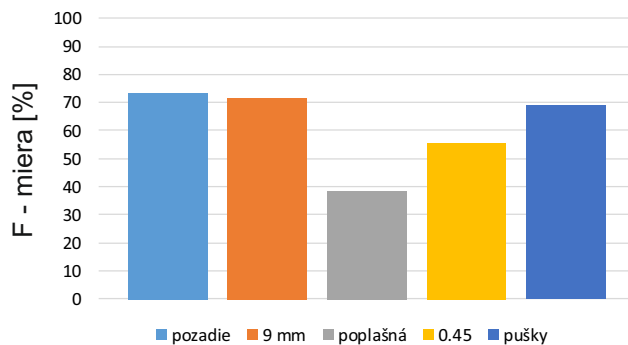


Fig. 17. Vplyv zúženej vrstvy na úspešnosť detekcie rôznych typov zbraní v ENN.

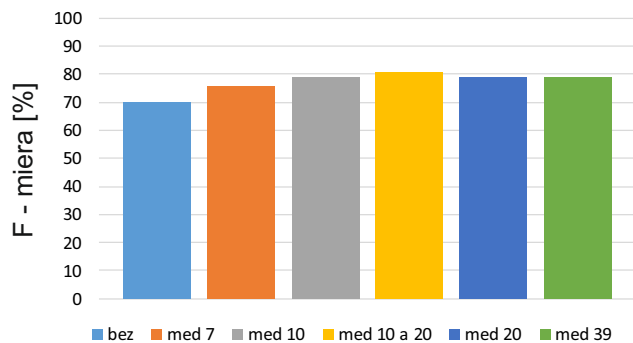


Fig. 16. Vplyv rôznych vyhladzovacích okien na úspešnosť detekcie rôznych typov zbraní v RNN.

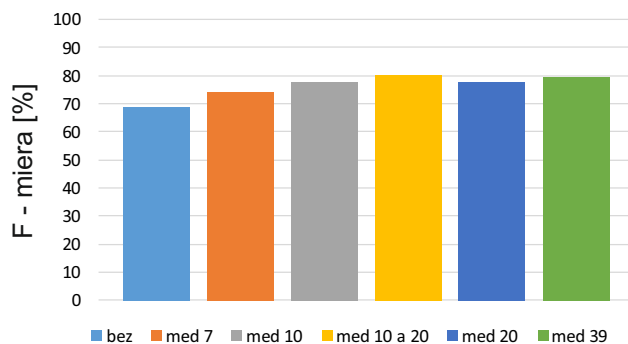


Fig. 18. Vplyv vyhladzovacích okien aplikovaných na ENN so zúženou vrstvou.

gation. Avšak, pri zohľadnení určitých aspektov, ako napr. čas potrebný na tréning, dosahuje Scaled conjugate gradient backpropagation veľmi porovnateľné hodnoty. Z toho dôvodu sme pre ďalší výskum zvolili druhý menovaný algoritmus.

2) *Vplyv použitia vyhladzovacieho okna:* Po nájdení najvhodnejšieho algoritmu sme prešli k zisteniu vplyvu použitia vyhladzovania. Úlohou vyhladzovania je zmierniť vplyv nežiadúceho signálu na celkovú úspešnosť detekcie. Po natrénovaní siete a následnom otestovaní, sme na zdetegovanú triedu pušiek, podľa časti IV-A2, aplikovali 6 vyhladzovacích okien.

Vyhladenie rekurentnej siete zachytáva Obr. 16, kde pri štyroch vyhladzovacích oknách bola dosiahnutá vyše 78 % úspešnosť. Navyše okno med 10 a 20 dosiahlo v tejto časti maximum, takmer 81 %.

Všetky vyhladzovacie okná viedli k zvýšeniu miery detekcie rôznych typov zbraní. Najväčší nárast úspešnosti sme zaznamenali pri aplikácii kombinovaného, resp. dvojitého vyhladzovania.

3) *Vplyv použitia zúženej vrstvy:* Úspešnosť detekcie výstrelov z rôznych zbraní bola verifikovaná aj pomocou uplatnenia zúženej vrstvy popísanej v časti III-B.

Vstupné dáta boli spočiatku upravené tak, aby doba trvania jednotlivých výstrelov z rôznych zbraní bola rovnaká.

Elmannova sieť dosiahla v tomto pokuse najlepšie výsledky

(pozri Obr. 17). Trieda pušiek tu bola rozpoznaná takmer na 70 % a F - miera pre výstrely z 9 mm pištole tu dokonca prevýšila 70 % úspešnosť.

Aplikácia zúženej vrstvy neprispela k zlepšeniu rozpoznania a teda nemá pozitívny vplyv na skvalitnenie miery detekcie, ktorá bola dosiahnutá v predchádzajúcich postupoch.

4) *Aplikácia vyhladzovacieho okna na sieť so zúženou vrstvou:* Napriek negatívne dopadu zúženej vrstvy na úspešnosť detekcie neurónových sietí, sme sa pokúsili tieto hodnoty vylepšiť. Použitie vyhladzovania na Elmannovu sieť so zúženou vrstvou fungovalo najlepšie a dosiahlo 6 - 10 % nárast úspešnosti (Obr. 18).

Pre všetky 3 siete sme vyhladením dokázali navýšiť úspešnosť detekcie o minimálne 6 %. Najväčší nárast oproti prípadu bez použitia vyhladzovania dosiahla rekurentná neurónová sieť (vyše 12,5 %). Použitím kombinovaného vyhladzovania (med 10 a 20) sme sa v Elmannovej sieti dopracovali k výslednej hodnote 80,23 %, ktorá bola najvyššia v tomto experimente.

### C. Spravodajské relácie

Druhá databáza, s ktorou sme pracovali obsahuje nahrávky zo spravodajstva. Tieto dáta sú súčasťou databázy kemtbn1\_ke1 a boli extrahované vo formáte .wav s Fz=16kHz a rozlíšením 16 bitov na vzorku. Nahrávky boli manuálne označované v programe Transcriber. Akustické udalosti

trieda	označenie	trénovacia časť	testovacia časť
čistá reč	0	45,55 min	31,28 min
čistá reč	1	17,65 min	9,15 min
telefónna reč	2	8.1 min	4.26 min
reč s hudbou	3	17.72 min	12.64 min
reč s pozadím	4	38.36 min	23.55 min
zašumená reč	10	61.49 min	46.7 min
hudba	6	16.87 min	6.58 min
hudba	7	5.25 min	0.36 min
pozadie	8	1.9 min	0.77 min
ticho	-1	2.66 min	1.96 min

TABLE V

ROZSAH PŔVODNEJ DATABÁZY SPRAVODAJSKÝCH RELÁCIÍ.

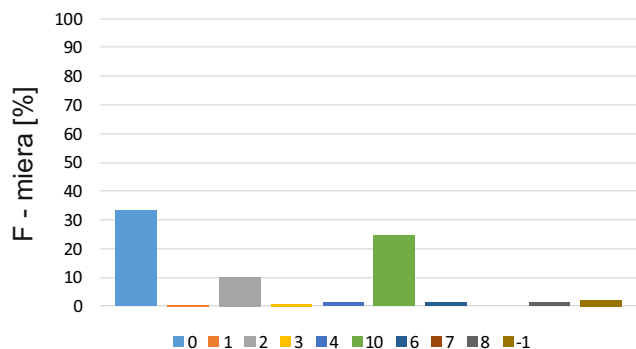


Fig. 19. Porovnanie detekcie 10 kategórií spravodajských relácií v FNN.

spravodajských relácií nachádzajúce sa v použitej databáze, ich označenia a rozsah zaznamenáva Tab. V.

Proces tréovania a testovania bol spustený viackrát za sebou. Aritmetický priemer výsledných hodnôt F - miery pôvodnej databázy v doprednej sieti, zobrazuje Obr. 19. Výsledok rozpoznania najpočetnejšej triedy bol sotva 35 %. To sa nedá povedať o ostatných triedach. Sedem z desiatich tried nedosiahlo ani 3 % úspešnosť.

Možno zhodnotiť, že pri takto nerovnomernom rozložení dát, nie je nami navrhnutá neurónová sieť schopná dostatočnej miery detekcie. Z toho dôvodu, sme sa ďalej zamerali na vytvorenie tzv. "triednych úsekov".

Usporiadané matice MFCC a im prislúchajúce označenia predstavovali vstup neurónovej siete. Použitá sieť pozostávala z dvoch skrytých vrstiev s 10 a 5 neurónmi. Ako tréovací algoritmus bol použitý Scaled conjugate gradient. Výsledky F - miery v doprednej sieti zobrazuje Obr. 20.

Z obrázku vidno, že vo väčšine prípadov sa úpravou dát vylepšila F - miera. Dokonca trieda telefónnej reči bola rozpoznaná na vyše 81 %.

1) *Vplyv použitia rôznych tréovacích algoritmov pri detekcii spravodajských relácií:* Telefónna reč, ktorá na Obr. 20 dosiahla najvyššie hodnoty, bola použitá v tomto experimente. Jej hodnoty sú porovnané na Obr. 21 pre všetky uvažované algoritmy.

Výsledné hodnoty 4 algoritmov sú v rozmedzí iba 0,64 %, pričom najefektívnejšie sa tu ukázal Resilient backpropagation, ktorý dosiahol vyše 82 %. Z toho dôvodu bol uprednostnený pri ďalších experimentoch.

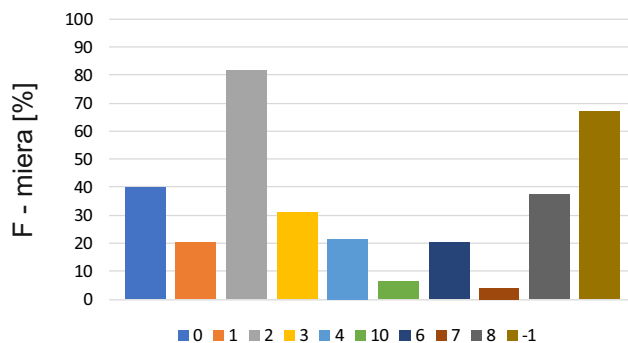


Fig. 20. Porovnanie F-miery nameranej pre detekciu 10 tried spravodajských relácií v FNN.

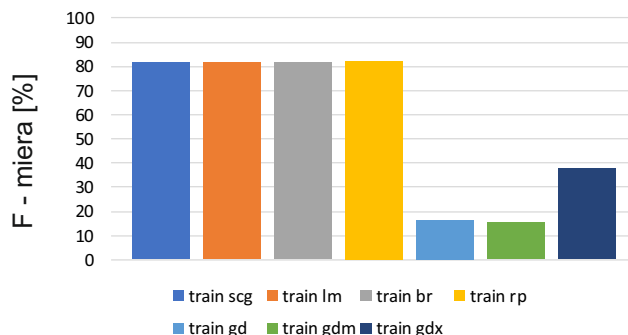


Fig. 21. Vplyv použitia rôznych tréovacích algoritmov pri rozpoznaní spravodajských relácií.

2) *Vplyv použitia vyhladzovacieho okna pri rozpoznaní spravodajských relácií:* V predchádzajúcich častiach vplývalo vyhladzovanie na výslednú hodnotu F - miery veľmi dobre. Aj v tejto časti je overený vplyv použitia 5 okien rôznych dĺžok.

F - miera získaná pre Elmannovu sieť sa nachádza na Obr. 22.

Všetky 3 siete tu pracovali veľmi podobne. Najmenej vhodné bolo použitie vyhladzovacieho okna s dĺžkou 10. Naopak najlepšie výsledky dosiahli siete s použitím vyhladzovacieho okna dĺžky 7. Najperspektívnejšia bola Elmannova sieť, ktorá dosiahla vyše 89,7 %. Táto hodnota je o necelú desatinu percenta vyššia ako dosiahli dopredná a rekurentná sieť pri použití rovnakého vyhladzovacieho okna.

3) *Vplyv použitia zúženej vrstvy pri rozpoznaní spravodajských relácií:* Rovnako ako v časti IV-C, aj tu bola najlepšie rozpoznaná trieda telefónnej reči. Druhou najlepšie rozpoznanou triedou bola trieda pušiek, ktorá v Elmannovej sieti dosiahla vyše 70,5 %.

Porovnanie výsledkov s časťou upravených dát v IV-C, kde boli použité dopredná, rekurentná a Elmannova sieť s dvoma skrytými vrstvami zaznamenáva Obr. VI. Aplikácia zúženej vrstvy tu vo väčšine prípadov pracovala lepšie ako v prípade IV-C.

F - miera telefónnej reči dosiahla maximum 82,26 % v RNN. Z dôvodu získania lepšieho výsledku, bolo na sieť so

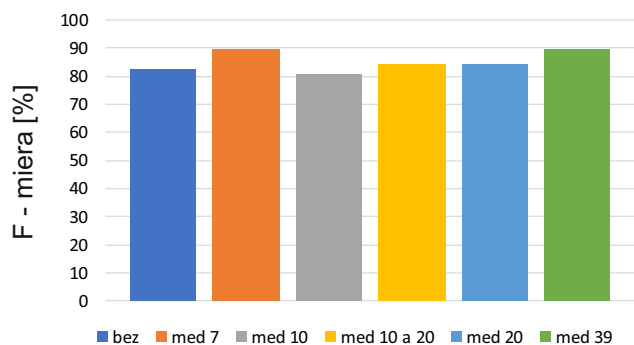


Fig. 22. Vplyv použitia rozdielnych vyhladzovacích okien pri rozpoznaní spravodajských relácií v ENN.

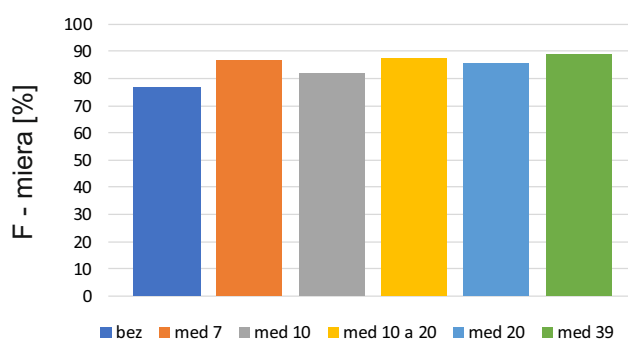


Fig. 23. Vplyv použitia rozdielnych vyhladzovacích okien pre RNN so zúženou vrstvou.

časť	sieť	trieda									
		0	1	2	3	4	10	6	7	8	-1
IV-C	FNN	39,85	20,16	81,76	30,85	21,63	6,31	20,36	4,27	37,44	67,06
	RNN	44,33	19,87	81,44	31,77	21,7	1,72	26,23	6,17	31,84	66,91
	ENN	43,15	17,71	81,63	34,9	24,14	-	24,7	3,7	47,05	68,4
IV-C3	FNN	33,9	23,08	80,96	29,75	28,83	4,51	32,9	6,4	23,99	67,96
	RNN	36,6	24,03	82,26	34,41	34,35	3,87	41,81	6,04	28,35	70,53
	ENN	37,1	24,63	82,18	36,61	37,65	2,88	39,74	4,76	28,29	70,58

TABLE VI

POROVNANIE F - MIERY MEDZI ČASŤOU IV-C A ČASŤOU IV-C3.

zúženou vrstvou aplikované vyhladzovanie.

Hodnoty F - miery po vyhladovaní FNN znázorňuje Obr. 23. Z grafu vidno, že všetky dĺžky vyhladzovania boli pre zlepšenie F - miery prospešné. Najideálnejšie je použitie vyhladzovacieho okna dĺžky 39.

Vyhladzovanie neurónových sietí so zúženou vrstvou v tejto časti, prispelo k zlepšeniu F - miery vo všetkých prípadoch. V doprednej a rekurentnej sieti dominovalo vyhladzovacie okno dĺžky 39, ktoré prevýšilo výsledok testovania bez vyhladzovania o 9 - 12 %.

V Elmannovej sieti sme dosiahli vyše 12 % nárast F - miery. Pri použití 4 vyhladzovacích okien sme zaznamenali vyše 90 % F - mieru.

#### D. Klasifikátor založený na jednovýstupových sieťach

Klasifikácia je druh problému, ktorého cieľom je začleniť vzorku signálu do jednej alebo viacerých známych kategórií. K tomuto úkonu slúži tréningová množina obsahujúca pozorovacie (target) - známe dáta. Systém založený na klasifikácii udalostí nazývame klasifikátor.

Blokovú schému použitého klasifikátora zobrazuje Obr. 24. Tento klasifikátor je založený na tzv. tréningu N jedno - výstupových sietí, pričom platí, že pre každú triedu je zvolená samostatná sieť. Novinkou tejto časti je rozdelenie dát do skupín popísaných nižšie.

Blok predspracovania signálu pozostáva z:

- usporiadania rámcov s rovnakými vlastnosťami -> vytvorenie tzv. triednych úsekov a
- redukciu vektorov v týchto úsekoch -> optimálne natréningovanie siete.

Takto upravené dáta boli načítané do pamäte a následne rozdelené do troch skupín:

- pozitív,

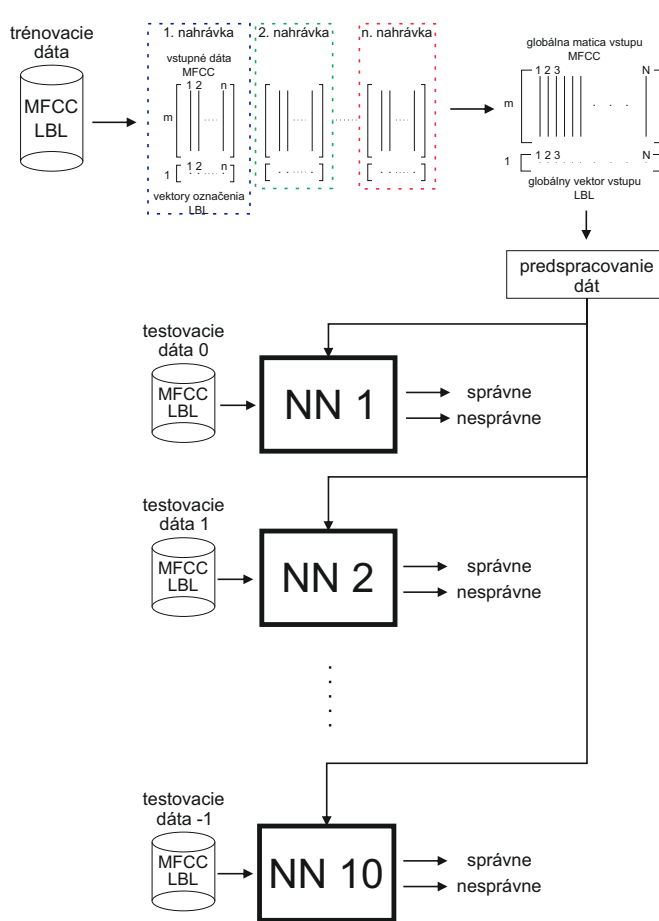


Fig. 24. Bloková schéma jednovýstupového klasifikátora.

- negatív a
- spolu.

Ak by sme používali dve triedy (rečová a nerečová), skupina **pozitív** by obsahovala iba rečovú časť. Skupina **negatív** by obsahovala všetky ostatné úseky okrem rečovných (hudba, šum, zvuky pozadia). A nakoniec skupina **spolu** by obsahovala zjednotenie predchádzajúcich dvoch množín pozitív a negatív, tzn. všetky dostupné zvuky. Aby sme predišli nežiadúcemu pretrénovaniu siete, pomer množín pozitív a negatív bol zre-



dukovaný tak, aby obsahovali rovnaké množstvo rámcov.

1) *Vplyv použitia rôznych tréningových algoritmov pri použití binárneho klasifikátora:* Prvou úlohou pri práci s binárnym klasifikátorom bolo zistenie vplyvu tréningového algoritmu na úspešnosť systému. Tak ako v predchádzajúcich častiach, aj tu sme uvažovali 7 algoritmov. Novinkou tejto časti je tréningovanie a testovanie v dvoch rôznych variantoch:

- použitie jedného cyklu a
- použitie viacerých cyklov.

Použitie **jedného cyklu** znamená, že počas jedného globálneho cyklu sa natrénujú a otestujú všetky siete. Najprv je vytvorená jedna sieť, ktorá je natrénovaná všetkými dostupnými dátami (skupina spolu) na klasifikáciu jednej triedy. Pri zohľadnení rozdelenia do troch skupín popísaného vyššie, je túto sieť možné otestovať pre klasifikáciu pozitívnej, negatívnej a spoločnej triedy. Teda výsledkom testovania sú tri hodnoty zapísané do matice. Tento cyklus pokračuje až do vyčerpania tried (v našom prípade 10).

Vo variante **viacerých cyklov** je počet cyklov rovný počtu tried (10). Namiesto jedného globálneho cyklu je v tejto časti pre každú sieť (triedu) navrhnutý vlastný cyklus.

Algoritmus Bayessovskej regularizácie vynikal v rozpoznaní 5 z 10 tried. Pri porovnaní algoritmov, takmer polovicu najlepších hodnôt pre uvažované varianty a skupiny, dosiahla Bayessovská regularizácia. Konkrétne v 29 zo 60 prípadov. Nevýhodou tohto algoritmu sú jeho časové nároky, ktoré boli niekoľkonásobne vyššie ako u ostatných algoritmov. Keďže klasifikátor by nemal byť iba výkonný, ale i dynamický, tento algoritmus sme v nasledujúcich častiach neuvažovali.

Pri porovnaní troch najrýchlejších a zároveň najspoľahlivejších algoritmov:

- Scale conjugate gradient backpropagation,
- Levenberg - Marquardt backpropagation,
- Resilient backpropagation,

bol zvolený prvý menovaný: Scale conjugate gradient backpropagation.

2) *Vplyv použitia vyhladzovacieho okna na úspešnosť klasifikátora:* Táto časť je zameraná na overenie vplyvu použitia vyhladzovacieho okna na úspešnosť klasifikácie. Vyhladzovanie bolo aplikované na triedu telefónnej reči, ktorú klasifikátor v predchádzajúcej časti rozpoznal najlepšie.

Oproti prípadu bez vyhladenia tu siete dosiahli nasledovné zlepšenia:

#### Dopredná

- pozitív: +7,27 %,
- spolu: +5,13 %,
- negatív: +2,56 %.

#### Rekurentná

- pozitív: +7,27 %,
- spolu: +5,08 %,
- negatív: +2,51 %.

#### Elmannova

- pozitív: +10,96 %,
- spolu: +7,09 %,

trieda	sieť	skupina	bez	med 7	med 10	med 10 a 20	med 20	med 39
trieda 2	FNN	pozitív	92,61164	97,80736	98,84482	99,4854	99,32529	99,88315
		spolu	94,30304	97,77976	98,67495	99,30016	99,13295	99,42822
		negatív	95,9945	97,75215	97,70125	98,0728	98,5583	98,52524
	RNN	pozitív	92,62488	97,86106	98,92905	99,53263	99,36241	99,89688
		spolu	94,37494	97,85225	98,74889	99,31864	99,16145	99,4525
		negatív	96,12489	97,84336	97,79326	98,21297	98,63773	98,55503
ENN	pozitív	88,3657	96,0442	97,79724	98,8938	98,66007	99,3274	
	spolu	92,04717	96,91014	98,19758	99,00001	98,81056	99,13718	
	negatív	95,72867	97,7745	97,64764	98,16866	98,69576	98,5029	

TABLE VII

POROVNANIE PRESNOSTI KLASIFIKÁCIE PO VYHLADENÍ.

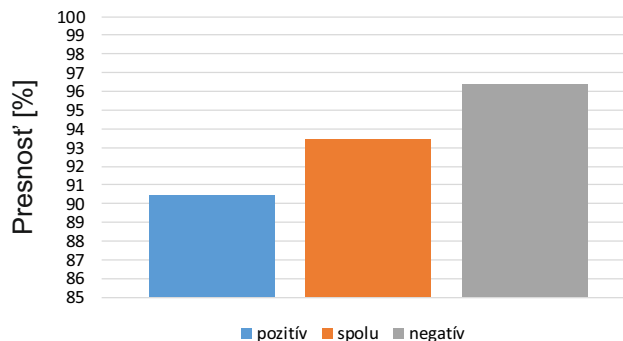


Fig. 25. Presnosť klasifikátora so zúženou vrstvou v FNN.

- negatív: +2,97 %.

Táto časť bola zameraná na nájdenie optimálnej dĺžky vyhladzovacieho okna. V Tab. VII vidno, že najvyššie hodnoty pri skupine pozitív a spolu boli získané po aplikácii okna s dĺžkou 39 a presnosť skupiny negatív najviac navýšila aplikácia okna s dĺžkou 20. Najlepšie tu pracovala rekurentná sieť.

3) *Vplyv použitia zúženej vrstvy na úspešnosť klasifikátora:* V určitých prípadoch môže zmena architektúry znamenať výrazne vyšší výkon klasifikátora. Úlohou tejto časti je zistenie vplyvu použitia zúženej vrstvy charakterizovanej v III-B.

Presnosť klasifikátora pracujúceho na princípe doprednej siete so zúženou vrstvou je zachytená na Obr. 25. Graf zobrazuje hodnoty presnosti klasifikácie triedy telefónnej reči, ktorá dosahovala najlepšie výsledky. Tri uvažované skupiny dát tu v priemere nadobudli 93,4 % presnosť klasifikácie. Skupina negatív bola rozpoznaná najlepšie a to na 96,35 %.

Zúžená vrstva aplikovaná v rekurentnej sieti mala na celkovú presnosť klasifikátora takisto dobrý vplyv. V priemere troch skupín bola zaznamenaná presnosť takmer 93 %. Najlepšie bola klasifikovaná skupina pozitív a to 94,4 %.

Elmannova sieť so zúženou vrstvou dosiahla v priemere 92,13 % presnosť. Najúspešnejšie tu bola klasifikovaná skupina negatív a to 96,2 %.

V tejto časti, kedy bol skúmaný vplyv použitia zúženej vrstvy na presnosť klasifikácie, dosiahli dopredná, rekurentná a Elmannova sieť minimálne 88 % pre triedu telefónnej reči. Najvyššia presnosť pre skupiny spolu a negatív bola získaná v doprednej sieti. Rekurentná sieť so zúženou vrstvou zaznamenala prvenstvo pri klasifikácii skupiny pozitív. Spriemerovaním výsledkov troch skupín v jednotlivých sieťach (FNN, RNN, ENN) sme dospeli k záveru, že najlepšie v tomto experimente pracovala dopredná sieť, ktorá dosiahla 93,4 % presnosť klasifikácie. Porovnaním získanej presnosti s časťou o tréningoch

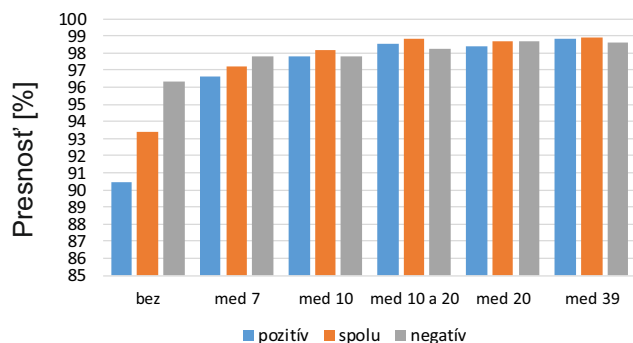


Fig. 26. Presnosť klasifikátora po vyhladzovaní v FNN so zúženou vrstvou.

algoritmov (IV-D1), pri dodržaní rovnakých nastavení siete (dopredná sieť, Scaled conjugate gradient algoritmus, topológia 10/5, tréning v jednom globálnom cykle, 100 opakovaní), že použitie doprednej siete so zúženou vrstvou vykazuje veľmi podobné výsledky (o 0,6 % horšie) ako sieť bez zúženej vrstvy.

4) Aplikácia vyhladzovacieho okna na sieť so zúženou vrstvou: Vo väčšine prípadov predchádzajúcich častí bolo použitie vyhladzovacieho okna na výstup klasifikátora prospešné. Experiment založený na vyhladzovaní bol overený aj v tejto časti.

Presnosť klasifikátora pri skupinách pozitív, spolu a negatív v doprednej sieti dosiahla najvyššie hodnoty (vyše 98 %) po aplikácii kombinovaného vyhladzovania 10 a 20, vyhladzovacieho okna dĺžky 20 a okna 39 (26). Spriemerovaním týchto hodnôt sme dospeli k záveru, že vyhladzovacie okno dĺžky 39 pracuje najlepšie. V rekurentnej sieti so zúženou vrstvou sa najviac osvedčilo okno dĺžky 39, ktoré pri každej skupine dosiahlo najvyššiu presnosť klasifikácie. Elmanova sieť so zúženou vrstvou prevýšila presnosť doprednej siete v dvoch prípadoch (skupina pozitív - vyhladzovanie 10 a 20, skupina negatív - vyhladzovanie 20).

Celkovo bola v tejto časti dosiahnutá priemerná presnosť od 95,27 % v rekurentnej sieti po 98,79 % v doprednej sieti. Teda pri použití zúženej vrstvy najlepšie pracuje dopredná sieť.

## V. ZÁVER

V rámci práce sme sa zaoberali riešením tvorby komplexného systému automatického rozpoznávania akustických udalostí, vo všeobecnosti nazývaného aj detektor. Detektory akustických udalostí sú v dnešnej dobe veľmi aktuálnou témou, ktorá je neoddeliteľnou súčasťou bezpečnostných a priemyselných aplikácií. To, ako spoľahlivo detektor pracuje, môže veľmi výrazne ovplyvniť ľudský život. Preto sú detektory aplikované v týchto oblastiach tak dôležité.

Gro práce pozostáva zo štyroch hlavných častí, ktorej každá je venovaná určitému výskumu, založenom na použitých akustických udalostiach. V tejto práci boli použité dve databázy. Databáza akustických udalostí a databáza spravodajských relácií.

V úvode experimentálnej časti bol navrhnutý detektor na rozpoznávanie troch udalostí - výstrelu, rozbitia skla a pozadia. Neskôr bola práca s databázou akustických udalostí rozšírená na rozpoznávanie rôznych typov zbraní. Táto sekcia pozostáva z výstreliv tzv. deviatky (9 mm), tzv. štyridsaťpäťky (.45 mm), pušiek (guľové a brokové), poplašnej zbrane a samozrejme aj pozadia. Pri databáze spravodajských relácií bol navrhnutý detektor s desiatimi výstupmi, ktoré reprezentovali počet tried danej databázy. Tieto dáta možno zhrnúť do troch hlavných množín - reči, hudby a pozadia. Keďže v tejto časti prevažovala trieda reči a zjednotením dát sa pomer oproti ostatným triedam (hudby a pozadia) ešte viac prehĺbil, neurónová sieť sa pretrénovala. Preto sme sa v práci venovali rôznym technikám úpravy dát a experimentálne overovali ich funkčnosť. Vo väčšine prípadov bol najlepší kandidát toho - ktorého experimentu uprednostnený pred ostatnými a následne postúpený do ďalšieho experimentu, až sme sa dopracovali k ideálnemu modelu pre dané nastavenie siete. Jednou z vlastností, ktorá tento postupný progres siete brzdila bola časová náročnosť potrebná na tréning. V takomto prípade bola do nasledujúceho experimentu uprednostnená druhá najlepšia možnosť. Týmto spôsobom sa nám podarilo vytvoriť výkonný a zároveň dostatočne dynamický klasifikátor. V poslednej vypracovanej kapitole na databáze spravodajských relácií bol použitý odlišný koncept predspracovania a tréningu dát oproti ostatným častiam. Navrhli sme desať jedno - výstupových klasifikátorov, kde každý výstup predstavoval samostatnú sieť, podľa triedy na ktorú bol trénovaný.

Veríme, že táto práca obsahuje dostatočne množstvo informácií a experimentov pre pokračujúci vývoj systémov rozpoznávania akustických udalostí.

## ACKNOWLEDGMENT

Tato práca vznikla vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja realizáciou výskumných projektov APVV-15-0517 a APVV SK-TW-2017-0005 a vďaka podpore MŠVVaŠ SR realizáciou projektu VEGA 1/0511/17.

## REFERENCES

- [1] Xiaodan Zhuang, Xi Zhou, Thomas S Huang, and Mark Hasegawa-Johnson. Feature analysis and selection for acoustic event detection. In *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 17–20. IEEE, 2008.
- [2] Jozef a kol JUHÁR. *Rečové technológie v telekomunikačných a informačných systémoch*. Equilibria, ISBN 978-80-89284-75-7, 2011.
- [3] Matúš Pleva, Eva Vozáriková, Stanislav Ondáš, Jozef Juhár, and Anton Čižmár. Automatic detection of audio events indicating threats. In *IEEE International Conference on Multimedia Communications, Services and Security, Krakow*, volume 6, 2010.
- [4] Martin Hrabina and Milan Sigmund. Acoustical detection of gunshots. In *2015 25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, pages 150–153. IEEE, 2015.
- [5] J-L Rouas, Jérôme Louradour, and Sébastien Ambellouis. Audio events detection in public transport vehicle. In *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 733–738. IEEE, 2006.
- [6] Yizhar Lavner, Rami Cohen, Dima Ruinskiy, and Hans IJzerman. Baby cry detection in domestic environment using deep learning. In *2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE)*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [7] Stefan Wiens, Elizabeth S Mezzacappa, and Edward S Katkin. Heartbeat detection and the experience of emotions. *Cognition & Emotion*, 14(3):417–427, 2000.

- [8] Do-Dat Tran, Thi-Lan Le, et al. Abnormal event detection using multimedia information for monitoring system. In *2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, pages 490–495. IEEE, 2014.
- [9] Eva Vozáriková, Matúš Pleva, Jozef Vavrek, Stanislav Ondás, Jozef Juhár, and Anton Cizmár. Detection and classification of audio events in noisy environment. *Journal of Computer Science and Control Systems*, 3(1):253, 2010.
- [10] Andrey Temko, Climent Nadeu, Dušan Macho, Robert Malkin, Christian Zieger, and Maurizio Omologo. Acoustic event detection and classification. In *Computers in the human interaction loop*, pages 61–73. Springer, 2009.
- [11] JUHAR Jozef VAVREK, Jozef and Anton CIZMAR. The svm binary tree classification using mrmr and f-score feature selection algorithms. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 14(2):8–14, 2014.
- [12] Giambattista Parascandolo, Heikki Huttunen, and Tuomas Virtanen. Recurrent neural networks for polyphonic sound event detection in real life recordings. In *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 6440–6444. IEEE, 2016.
- [13] Ján Staš, Peter Vizslay, Martin Lojka, Tomáš Kocúr, Daniel Hládek, Eva Kítková, Matúš Pleva, and Jozef Juhár. Automatic subtitling system for transcription, archiving and indexing of slovak audiovisual recordings. In *Proceedings of the 7th Language & Technology Conference, LTC 2015*, pages 186–191, 2015.
- [14] Annamaria Mesaros, Toni Heittola, Antti Eronen, and Tuomas Virtanen. Acoustic event detection in real life recordings. In *2010 18th European Signal Processing Conference*, pages 1267–1271. IEEE, 2010.
- [15] Eva Vozáriková, Jozef Juhár, and Anton Čizmár. Acoustic events detection using mfcc and mpeg-7 descriptors. In *International Conference on Multimedia Communications, Services and Security*, pages 191–197. Springer, 2011.
- [16] Chloé Clavel, Thibaut Ehrette, and Gaël Richard. Events detection for an audio-based surveillance system. In *2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pages 1306–1309. IEEE, 2005.
- [17] Emre Cakir, Toni Heittola, Heikki Huttunen, and Tuomas Virtanen. Polyphonic sound event detection using multi label deep neural networks. In *2015 international joint conference on neural networks (IJCNN)*, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [18] Oguzhan Gencoglu, Tuomas Virtanen, and Heikki Huttunen. Recognition of acoustic events using deep neural networks. In *2014 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pages 506–510. IEEE, 2014.
- [19] Emre Cakir and Tuomas Virtanen. Convolutional recurrent neural networks for rare sound event detection. *Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE)*, 2017.
- [20] Peter Sinčák and Gabriela Andrejková. Neurónové siete inžiniersky prístup (1. diel). Technical report, ISBN 80-88786-42-8, 1996.
- [21] Vladimír Kvasnička, L'ubica Beňušková, Jiří Pospíchal, Igor Farkaš, Peter Tiňo, and Andrej Král'. Úvod do teórie neurónových sietí. In *Úvod do teórie neurónových sietí*. Iris, 1997.
- [22] John W Clark, Johann Rafelski, and Jeffrey V Winston. Brain without mind: computer simulation of neural networks with modifiable neuronal interactions. *Physics Reports*, 123(4):215–273, 1985.
- [23] Andrew Tch. An old school matrix nn. *UCI machine learning repository for datasets.*, 2017.
- [24] Qi-jun Zhang and Kuldip C Gupta. *Neural networks for RF and microwave design (Book+ Neuromodeler Disk)*. Artech House, Inc., 2000.
- [25] Joe Tebelskis. *Speech recognition using neural networks*. PhD thesis, Siemens AG, 1995.
- [26] Simon Haykin and Neural Network. A comprehensive foundation. *Neural Networks*, 2(2004), 2004.
- [27] Shigeru Katagiri. *Handbook of neural networks for speech processing*. Artech House, Inc., 2000.
- [28] Herve A Bourlard and Nelson Morgan. *Connectionist speech recognition: a hybrid approach*, volume 247. Springer Science & Business Media, 2012.
- [29] Richard P Lippmann. An introduction to computing with neural nets. *IEEE Assp magazine*, 4(2):4–22, 1987.
- [30] Christopher M Bishop. *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press, 1995.
- [31] Geok See Ng, SS Erdogan, and Pan Wei Ng. Neural networks for voice recognition. In *Networks, 1993. International Conference on Information Engineering '93: Communications and Networks for the Year 2000'*, *Proceedings of IEEE Singapore International Conference on*, volume 1, pages 383–387. IEEE, 1993.
- [32] Jürgen Schmidhuber. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61:85–117, 2015.
- [33] M. Ketrák. *Klasifikácia foném reči neurónovou sieťou*. PhD thesis, Dept. of Electronics and Multimedia Communications, Technical University of Košice, Slovak Republic, 2010.
- [34] Tomas Mikolov, Stefan Kombrink, Anoop Deoras, Lukas Burget, and J Cernocký. Recurrent neural network language modeling toolkit. In *ASRU, IEEE Workshop on*, 2011.
- [35] Sung Jun Lee, Ki Chul Kim, Hyunsoo Yoon, and Jung Wan Cho. Application of fully recurrent neural networks for speech recognition. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1991. ICASSP-91., 1991 International Conference on*, pages 77–80. IEEE, 1991.
- [36] Jeffrey L Elman. Finding structure in time. *Cognitive science*, 14(2):179–211, 1990.
- [37] Nelson Morgan and Herve A Bourlard. Neural networks for statistical recognition of continuous speech. *Proceedings of the IEEE*, 83(5):742–772, 1995.
- [38] Fred Richardson, Douglas Reynolds, and Najim Dehak. Deep neural network approaches to speaker and language recognition. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10):1671–1675, 2015.
- [39] Tom Fawcett. An introduction to roc analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8):861–874, 2006.
- [40] Marina Sokolova, Nathalie Japkowicz, and Stan Szpakowicz. Beyond accuracy, f-score and roc: a family of discriminant measures for performance evaluation. In *Australasian joint conference on artificial intelligence*, pages 1015–1021. Springer, 2006.
- [41] Matúš Pleva, Eva Vozáriková, L'ubomír Dobos, and Anton Cizmár. The joint database of audio events and backgrounds for monitoring of urban areas. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(1):185, 2011.

# Hierarchické smerovacie protokoly pre viacúrovňové viacpreskokové mobilné siete s využitím kognitívneho rádia

Dávid Hrabčák

Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky a multimediálnych technológií  
Univerzita Košice  
Letná 9. Košice, Slovensko  
Email: david.hrabcak@tuke.sk

Ľubomír Doboš

Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky a multimediálnych technológií  
Univerzita Košice  
Letná 9. Košice, Slovensko  
Email: lubomir.dobos@tuke.sk

**Abstrakt**—V tomto článku bude predstavený výskum viacvrstvových sietí s hierarchickým smerovaním a použitím princípov kognitívneho rádia. Viacvrstvové siete sa stanú dôležitým fenoménom v nadchádzajúcej novej generácii 5G sietí. Nové sieťové technológie, Internet vecí (IoT) a inteligentné mestá v blízkej budúcnosti odhalia svoje nové možnosti. Tieto siete spolu s IoT sa považujú za sľubnú technológiu, ktorá v budúcnosti prepojí rôzne typy sietí do jednej plne funkčnej siete. Súčasťou týchto sietí budú aj mobilné Ad-Hoc siete (MANET), bezdrôtové senzorové siete (WSN) a siete bezpilotných lietajúcich objektov (DRONET). Cieľom tohto príspevku je predstaviť koncept viacvrstvého sieťového modelu a jeho smerovania pozostávajúceho z vyššie uvedených sietí. Práca sa taktiež zaoberá problémom smerovania v MANET sieťach s využitím kognitívneho rádia. Táto technológia slúži na efektívne využívanie spektra, ktoré je aktuálne neefektívne pridelované a v budúcnosti hrozí jeho preťaženie. Spolu s viacvrstvom smerovaním preto bude prezentovaný koncept adaptívneho smerovania v MANET sietí, ktorý umožní využitie snímania spektra a inteligentných metód pre jeho pridelovanie a vyhnutie sa interferenciám signálu. Simulácie jednotlivých riešení zároveň ukážu ich budúcu perspektívu.

## I. ÚVOD

Svet pomaly ale isto speje k novej generácii 5G sietí, ktorú výrazne podporí aj nová komunikačná platforma, známa ako Internet vecí (IoT). Ten sa so stovkami a tisíckami komunikujúcich zariadení pričíní o to, že internet bude čoraz komplexnejší, inteligentnejší a všadeprítomný. Siete piatej generácie a platforma IoT sa však všeobecne považujú za sľubnú technológiu, ktorá prepojí rôzne typy heterogénnych sietí. Široká škála rôznych druhov zariadení bude sprostredkovať v tejto novej generácii sietí rôzne typy aplikácií a služieb [1]. Zariadenia, ako sú smartfóny, PC, senzory, RFID a rôzne sieťové zariadenia budú operovať a spolupracovať v mnohých oblastiach, ako sú inteligentné domy, priemyselná automatizácia, verejná zdravotná starostlivosť, verejná bezpečnosť a inteligentné mestá. Aby bolo možné vytvoriť takýto komplexný sieťový systém, bude sa vyžadovať spolupráca sietí ako sú napríklad mobilné Ad-Hoc siete (MANET), bezdrôtové senzorové siete (WSN), sociálne siete vozidiel (VSN) či siete

lietajúcich bezpilotných vozidiel (DRONET). Ich spolupráca sa bude vykonávať na rôznych hierarchiách, pričom spoločne vytvoria jednu funkčnú sieť.

Toto konvergenčné prostredie s heterogénnymi zariadeniami si takisto bude vyžadovať nový spôsob komunikácie medzi zariadeniami, ktorú môžeme poznať pod označením Device-to-Device (D2D). S príchodom 5G sietí sa počíta, že táto technológia bude tiež súčasťou IoT prostredia, kde bude známa pod označením Machine-to-Machine (M2M). Tieto technológie sú zamerané na efektívne využívanie komunikačného spektra rovnako ako technológia kognitívneho rádia. Zatiaľ čo D2D a M2M komunikácia sa používa v rámci vnútropásmovej komunikácie, pre technológie bezdrôtových MANET, WSN či DRONET sietí sa využije kognitívne rádio v rámci mimopásmovej komunikácie. Samotná technológia kognitívneho rádia je považovaná za sľubnú technológiu, ktorá môže v budúcnosti pomôcť vysporiadať sa s aktuálne nepružným a neefektívnym pridelovaním frekvenčného spektra, s čím súvisí aj jeho nedostatok.

Vyššie uvedené fakty boli preto použité pri vývoji viacvrstvého sieťového modelu VSM, ktorý hierarchicky prepojí WSN, MANET a DRONET siete. Takisto bude popísaný koncept adaptívneho smerovacieho protokolu ASP pre MANET siete, ktorý využije snímanie spektra a inteligentné metódy jeho pridelovania pre komunikáciu bez interferencie. Tieto koncepty budú spadať do oboru takzvaných odolných sietí a budú schopné reagovať na nepredpokladané situácie, ako sú napríklad prírodné katastrofy (zemetrasenia, požiare, povodne, hurikány), ľudské zlyhania (jadrové, chemické, biologické, rádiologické havárie alebo železničné či viacnásobné automobilové nehody) a trestá záškodná činnosť (teroristické alebo počítačové útoky) [2].

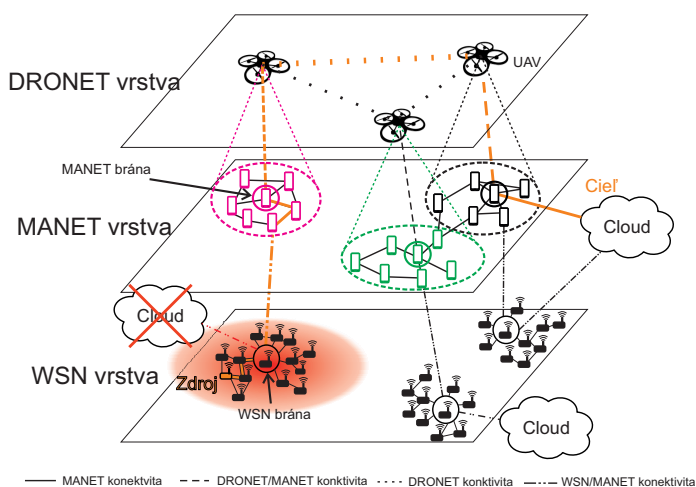
Koncept VSM bude preto schopný nahradiť funkcionality 5G a IoT sietí, pričom bude schopný prebrať úlohu funkcionality rôznych nevyhnutných aplikácií a služieb, ako je napríklad verejné zdravie a bezpečnosť. Pre budúcnosť bude nevyhnutné, aby tieto služby fungovali nepretržite. V prípade nepredpokladaných situácií popísaných vyššie však môže dôjsť k narušeniu

fixnej infraštruktúry a nechcenému prerušeniu funkcionality kritických aplikácií a služieb. Preto bude WSN sieť plniť úlohu IoT senzorov pre zber dát, MANET sieť zabezpečí zber kritických dát z WSN senzorov a ich rýchlejší prenos do fungujúcej časti pevnej siete, pričom DRONET sieť bude v tomto prípade slúžiť ako zálohová chrbticová sieť. V rámci MANET vrstvy môže byť využitý aj adaptívny smerovací algoritmus, ktorý zabezpečí prenos dát bez interferencie.

Nasledujúce kapitoly budú preto venované popisu samotného viacvrstvého sieťového modelu VSM a jeho hierarchii, spoločne s odporúčením vhodných komunikačných technológií a smerovacích protokolov pre každú vrstvu, resp. sieť. Takisto bude v rámci MANET vrstvy popísaný spôsob komunikácie prostredníctvom kognitívneho rádia pri návrhu adaptívneho smerovacieho protokolu. Všetky návrhy budú v závere práce simulačne overené a zhodnotené.

## II. KONCEPT VIACVRSTVOVÉHO SIET'OVÉHO MODELU

Navrhovaný koncept viacvrstvého sieťového modelu VSM je hierarchicky zložený z troch logických vrstiev. Každá z vrstiev predstavuje samostatný typ siete, ktoré dokážu fungovať nezávisle, no zároveň je možné naprieč jednotlivými vrstvami prenášať kritické dáta. Úlohou VSM bude nahradenie funkcionality pevnej infraštruktúry 5G a IoT siete v prípade, že dôjde k jej narušeniu v dôsledku nepredpokladaných udalostí. Koncept VSM sa tak pričíní o to, že kritické služby, ktorých dáta považujeme za kritické, zostanú naďalej funkčné. Predpokladom funkcionality modelu je situácia, pri ktorej sa IoT sieť zodpovedná za zber dát nahrádza WSN sieťou, ktorá zozbierané dáta prenáša prostredníctvom internetových prístupových bodov ( Access Point - AP) do dátových centier umiestnených v cloud. Celý koncept VSM je možné vidieť na Obr. 1.



Obr. 1. Koncept VSM

Obrázok 1 ukazuje situáciu, pri ktorej došlo vo WSN podsieti k prerušeniu spojenia s AP do cloudu, ktorý predstavuje pevnú časť infraštruktúry. Úlohou WSN senzorov je pri takejto situácii správna identifikácia kritických dát a ich presunutie prostredníctvom systému brán do druhej (MANET) vrstvy. V

prípade, že lokálne uzly MANET siete alebo celá MANET podsieť nemá k dispozícii funkčné pripojenie do cloudu, hľadá sa alternatívna cesta. Tá môže byť zabezpečená treťou (DRONET) vrstvou, ktorá je usporiadaná tak, aby sa kritické dáta mohli preniesť do MANET podsiete, ktorá disponuje funkčným pripojením do cloudu. Na obrázku je tak znázornená smerovacia cesta od zdrojového WSN senzora až k cieľovému AP do cloudu. Nasledujúce kapitoly tak budú venované popisu jednotlivých vrstiev, ich smerovacích protokolov a popisu konvergencie sietí do jedného fungujúceho VSM.

### A. WSN vrstva viacvrstvého modelu siete

Vo VSM bude WSN sieť preberať v prípade narušenia pevnej infraštruktúry rolu IoT siete senzorov, pričom výhodou WSN senzorov je fakt, že je ich možné nasaďiť veľmi rýchlo vo veľkom množstve a v akomkoľvek prostredí vďaka ich samokonfigurovateľným vlastnostiam. Bezdrôtová komunikácia zabezpečí, že namerané kritické dáta kritických aplikácií bude možné doručiť prostredníctvom pevného AP do internetu a následne zodpovednému dátovému centru podľa typu aplikácie.

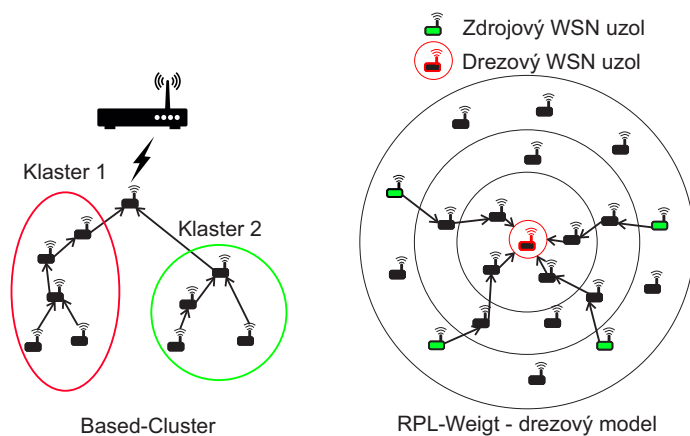
Nevýhodou WSN sietí a bezdrôtových senzorov je ich energetické obmedzenie. Z tohto hľadiska je potrebné, aby komunikačná technológia a smerovacie protokoly boli čo najviac energeticky efektívne. V rámci VSM je však potrebné, aby boli senzory okrem schopnosti komunikovať prostredníctvom rôznych typov komunikačných štandardov zameraných na nízku spotrebu energie, tiež kompatibilné s bezdrôtovým rozhraním mobilných zariadení na druhej vrstve. Najvhodnejšie sa tak pre WSN vrstvu z hľadiska VSM javia štandardy ako Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE)[3], Developers Alliance for Standards Harmonization of ISO 18000-7 (DASH7)[4] a ZigBee IEEE 802.15.4.

Pre VSM sa technológia ZigBee IEEE 802.15.4 javí ako najvhodnejších technológia, nakoľko je vhodná pre viacero aplikovaných domén. Dokáže komunikovať s rádiovým dosahom od 10 do 50 metrov a s maximálnou rýchlosťou prenosu dát na úrovni 250 Kbps. Najnovšie vstavané zariadenia dokážu komunikovať aj s nižšími prenosovými rýchlosťami na úrovni od 20 a 40 Kbps [5]. V rámci akademického výskumu je de facto štandardom, nakoľko bola podrobne analyzovaná. Na základe týchto analýz je tak možné naladiť jej parametre tak, aby sa prispôbili rôznym prostrediam, od PAN sietí po budovy až po monitorovanie životného prostredia. ZigBee ponúka symetrické vstupné a výstupné šírky pásma, čo z neho robí dobrú voľbu pre komunikáciu medzi strojmi (Machine-to-Machine M2M) a pre všetky scenáre, ktoré si vyžadujú nahrávanie aj zber dát [6].

V budúcnosti bude v rámci 5G sietí a z dôvodu vyčerpaného IPv4 adresného priestoru nevyhnutné adoptovanie protokolov využívajúcich IPv6 adresovanie. V tomto smere poskytuje technológii ZigBee výhodu protokol 6LoWPAN, ktorý predstavuje veľmi robustné riešenie nasadenia WSN siete v súčinnosti s internetom [7]. V rámci sieťovej topológie môže protokol 6LoWPAN umožniť pripojenie WSN senzorov s internetom prostredníctvom takzvaného okrajového smerovača.

Bez problémov tak kombinuje IPv6 protokol so štandardom IEEE 802.15.4 za pomoci kompresie hlavičiek, fragmentácie a opätovného zostavovania. Okrem toho podporuje konverziu medzi IPv6 a IPv4 protokolmi.

Autori v štúdiu [8] popísali prehľad smerovacích protokolov WSN založených na protokole 6LoWPAN z pohľadu ich vlastností a kritérií súvisiacich so samotným správaním siete. V rámci modelu VSM sa predpokladá, že senzory budú statické bez mobility a budú využívať IPv6 adresovanie, viacpreskokový prenos a topológiu siete v zmysle výstupných brán, takzvaných sensorových brán. To znamená, že je vhodné, aby podporovali buď klastrovacie prístupy, ktoré rozdelia sieť na klaster s jedným výstupným sensorom (sensorovou bránou), alebo takzvanú "dreзовú mobilitu" (sink mobility), pri ktorej sa všetka komunikácia zbíha do jediného senzora. Pre tieto požiadavky vyhovujú konceptu VSM smerovacie protokoly Based-Cluster [9] a RPL-Weight [10]. Znárodnenie ich smerovania je možné vidieť na Obr.2.

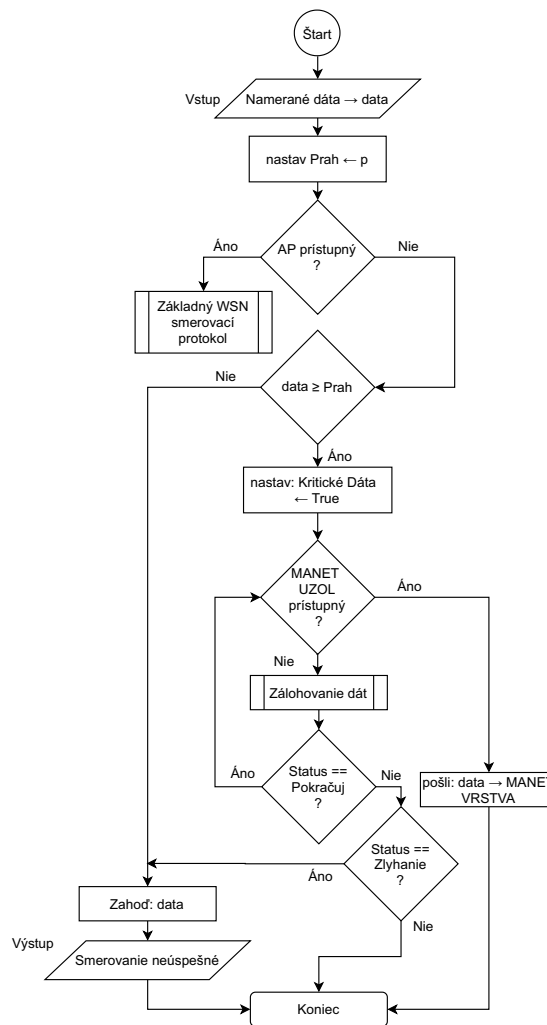


Obr. 2. Príklady smerovania a topológie smerovacích protokolov Based-Cluster a RPL-Weight

V prípade narušenia spojenia alebo výpadku konektivity s AP do internetu, uzly zmenia stratégiu a hľadajú alternatívne cesty pre doručenie dát. Smerovanie naliehavých údajov začína už vo vrstve WSN. Predpokladom smerovania týchto dát je fakt, že odosielať dáta medzi jednotlivými vrstvami je možné len v prípade kritických dát alebo dát kritických aplikácií. Senzory tak v prípade narušenia pevnej infraštruktúry musia už v počiatku smerovania vyhodnotiť, či ide o kritické alebo nepodstatné dáta. Smerovaním len kritických dát je možné vyhnúť sa zbytočnému zahltenu vyšších vrstiev nepodstatnými dátami.

Odporúčané protokoly pre VSM model však takúto vlastnosť neimplementujú. Z tohto dôvodu je potrebné navrhnúť mechanizmus, za pomoci ktorého bude možné v prípade narušenia siete poslať dáta mimo WSN vrstvy. Keďže jednotlivé vrstvy pracujú nezávisle a komunikácia medzi nimi je možná len v prípade kritických dát a v prípade narušenia pevnej infraštruktúry, mechanizmus pre zabezpečenie smerovania kritických dát bude implementovaný ako výnimka hlavného smerovacieho algoritmu pre daný smerovací protokol. Algoritmus výnimky pre medzivrstvové smerovanie kritických

dát zo siete WSN do siete MANET je popísaný vývojovým diagramom na Obr.3.



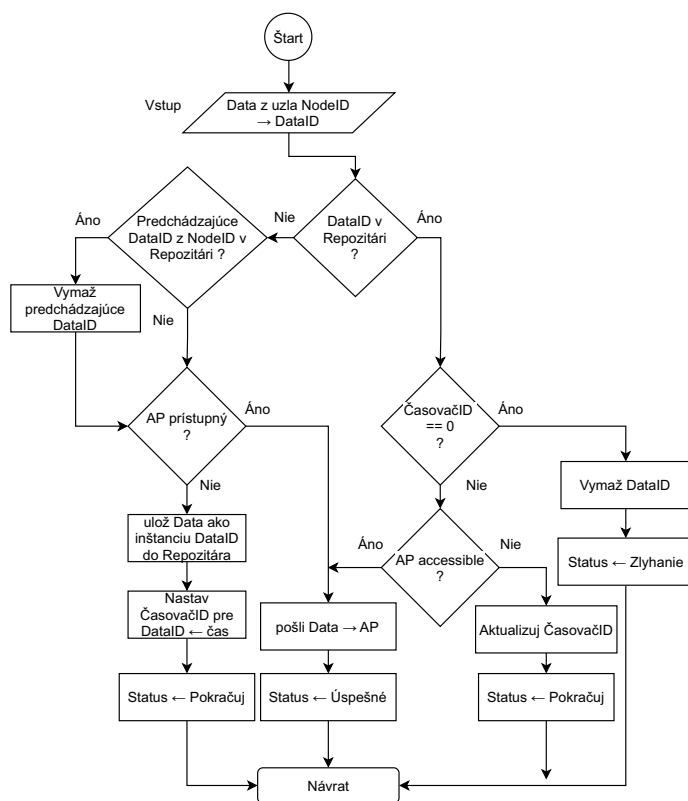
Obr. 3. Vývojový diagram algoritmu výnimky pre medzivrstvové smerovanie kritických dát zo siete WSN do siete MANET

Predpokladom spustenia algoritmu výnimky je stav, kedy daný senzor stratí spojenie s AP. Vstupom pre algoritmus sú dáta namerané senzorom. Podľa povahy nameraných dát (teplota, tlak, množstvo CO<sub>2</sub> a podobne) je potrebné nastaviť prahovú hodnotu *p*, ktorá je následne uložená ako premenná *PRAH*. Táto hodnota slúži v algoritme na určenie, či sú dané dáta kritické. Algoritmus sa hneď nazačiatku pokúsi zistiť, či je AP siete prístupný. Pokiaľ áno, spustí sa základný smerovací algoritmus. Pokiaľ nie, namerané dáta sú porovnané s prahovou hodnotou. Ak dáta nie sú kritické, považujú sa za irelevantné a sú zahodené.

Pokiaľ dáta spĺňajú kritérium kritických dát, sú zaslané k najbližšej WSN bráne. V tomto momente algoritmus zisťuje, či daná brána má spojenie s akýmkoľvek MANET uzlom. V prípade, že MANET uzol nie je prístupný, zavolá sa algoritmus zálohovania dát, aby nedošlo k ich zahodeniu. Algoritmus zálohovania dát dané dáta zálohuje a vyčkáva na spojenie s AP alebo MANET uzlom. Tento algoritmus má tri výstupné

statusy: Pokračuj, Úspešné a Zlyhanie. Na základe týchto statusov následne algoritmus výnimky určí, či odosielanie dát bolo úspešné, alebo neúspešné a dáta sa zahadzujú. V prípade, že MANET uzol je prístupný, dáta sa prenesú do MANET vrstvy.

Aby nedošlo ku strate kritických dát v dôsledku neprítomnosti MANET uzla, prípadne nedostupnosti AP, dáta budú zálohované oportunistickým (DTN) spôsobom, ktorý je popísaný vývojovým diagramom na Obr.4. To znamená, že dáta budú uložené v repozitári (pamäti) danej sensorovej brány po určitý čas, pričom sa bude čakať na vhodnú príležitosť pre ich odoslanie ďalej. Vstupom algoritmu sú dáta, ktoré nie je možné odoslať. Predpokladom je fakt, že daná sensorová brána má prístup k informácii o zdrojovom uzle označenom ako *NodeID*, ktorý dáta vytvoril. Dátam je následne na základe zdrojového uzla priradené *DataID* pre identifikáciu.



Obr. 4. Vývojový diagram algoritmu pre zálohovanie dát

V prvom kroku algoritmu sa zisťuje, či sa dáta už nachádzajú v repozitári. Pokiaľ nie, prichádza sa k zisteniu, či sa v repozitári nenachádzajú predchádzajúce dáta od daného uzla *NodeID*. Pokiaľ áno, znamená to, že algoritmus má k dispozícii aktuálnejšie dáta a preto predchádzajúce vymaže. Nasleduje pokus o spojenie sa s AP. V prípade že je úspešný, odošle sa návratový status "Úspešné". V opačnom prípade sa vytvorí nová inštancia v repozitári, ktorá uchová dáta ako *DataID*. Tejto inštancii je priradený časovač *ČasovačID* na základe času, po ktorý má uzol čakať na spojenie. Po uložení dát a priradení časovača je vrátený späť návratový

status "Pokračuj". Pokiaľ dáta označené ako *DataID* už v repozitári figurujú, algoritmus skontroluje *ČasovačID*. Pokiaľ čas uplynul, inštancia pre *DataID* v repozitári je vymazaná a vrátený je návratový status "Zlyhanie". Pokiaľ *ČasovačID* ešte neuplynul, dôjde k ďalšiemu pokusu o poslanie dát do AP. Pokiaľ AP dostupné nie je, *ČasovačID* je aktualizovaný a vracia sa návratový status "Pokračuj".

#### B. MANET vrstva viacvrstvového modelu siete

Výhodou MANET sietí je decentralizovaná architektúra siete, autonómnosť, samoorganizovateľnosť a viacpreskoková komunikácia v spojení s mobilitou. Všetky tieto charakteristiky sú vhodné pre VSM, nakoľko MANET siete je možné nasaďovať prakticky v každom prostredí, či už mestskom alebo prírodnom. Oproti WSN sieťam sú ich zdroje menej obmedzené, čo vedie k väčšiemu rádiovému dosahu a vyšším prenosovým rýchlostiam.

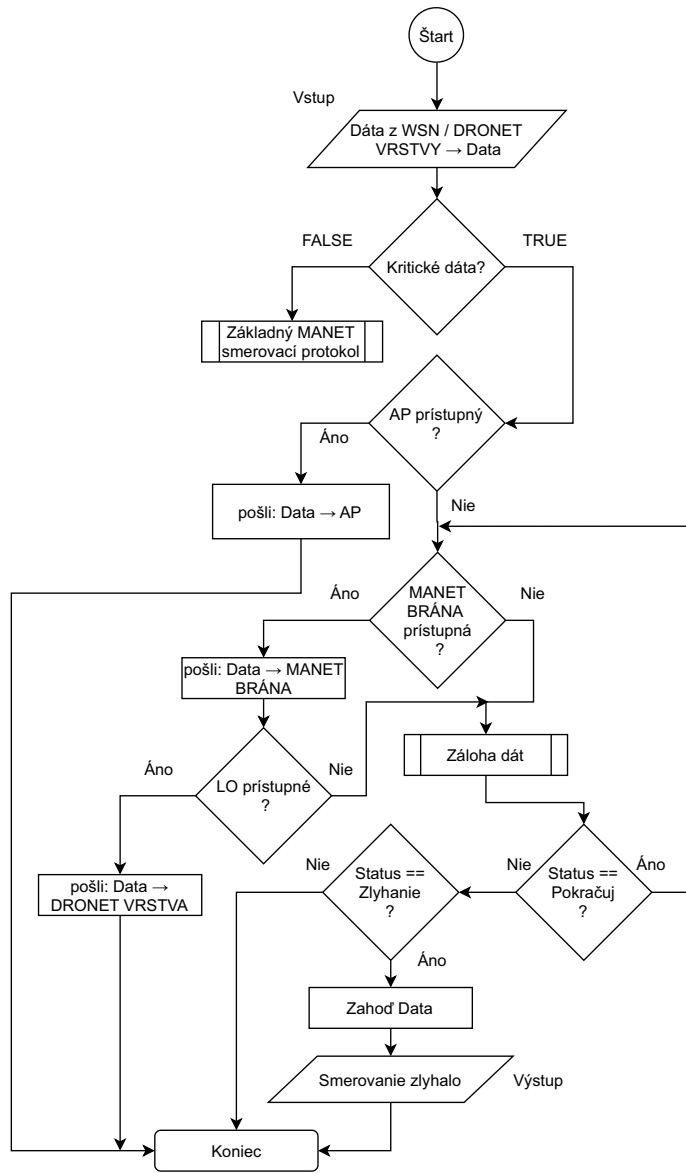
Spoločne s mobilitou existuje veľmi silný predpoklad, že v prípade narušenia existujúcej pevnej infraštruktúry 5G siete, môžu MANET zariadenia preniesť kritické dáta naprieč väčším vzdialenostiam k najbližšiemu fungujúcemu prístupovému bodu do internetu. Z hľadiska VSM hrajú MANET uzly rolu zbierania dát, pričom samotná sieť ponúka pomerne rýchle prenosové médium.

Koncept VSM bude vrámci MANET sietí využívať komunikačnú technológiu IEEE 802.11 Wi-Fi [11] v Ad-hoc móde. Štandardy ako 802.11n potom môžu ponúkať prenosovú rýchlosť od 54 do 600 Mbps, s rádiovým dosahom do 250 metrov vo vonkajšom prostredí [12].

Aby bola zabezpečená kompatibilná komunikácia medzi vrstvami WSN a MANET, ktoré navyše komunikujú s prístupovými bodmi do internetu, je potrebné, aby smerovacie protokoly použité v tejto vrstve implementovali IPv6 adresovanie. Medzi odporúčané protokoly sa radia upravené verzie protokolov ako sú DSR s IPv6 [13], AODV6 [14] alebo IPv6 OLSR [15]. Navyše, za určovanie výstupných brán zo siete MANET je zodpovedná DRONET sieť za pomoci lietajúcich objektov (LO). Tento mechanizmus bude popísaný bližšie v Kapitole II-C. K vykonaniu klastrovania je ale potrebný náhľad na topológiu siete, ktorou disponujú proaktívne protokoly. Z tohto hľadiska je najvhodnejší protokol IPv6 OLSR.

Podobne ako v prípade protokolov WSN vrstvy, ani protokoly MANET vrstvy nie sú vstavané na odosielanie kritických dát z iných sietí či vrstiev. Preto je potrebná implementácia algoritmu výnimky, ktorá v prípade narušenia pevnej infraštruktúry siete dokáže kritické dáta z iných vrstiev doručiť k fungujúcemu prístupovému bodu. Myšlienkou je fakt, že v prípade nefungujúceho prístupového bodu vo WSN vrstve chceme preniesť kritické dáta MANET vrstvou k inému prístupovému bodu s vyššou dátovou rýchlosťou a nižším oneskorením. V prípade, že daná MANET podsieť nemá konektivitu so žiadnym prístupovým bodom, hľadá sa konektivita s DRONET vrstvou, ktorá môže dáta preniesť do inej MANET podsiete, ktorá pripojením disponuje. Prvoradým cieľom smerovacieho protokolu MANET siete v modeli VSM

je doručenie kritických dát k najbližšiemu AP. Druhoradý cieľ je v prípade neexistujúcej konektivity so žiadnym prístupovým bodom prenesenie dát do vrstvy DRONET. V prípade, že ani tento pokus nie je úspešný, vykoná sa oportunistický prístup zálohovania dát, pričom sa po určitý čas čaká na príležitosť ku komunikácii s prístupovým bodom alebo s LO DRONET vrstvy. Algoritmus výnimky pre medzivrstvové smerovanie kritických dát siete MANET je popísaný vývojovým diagramom 5.



Obr. 5. Vývojový diagram algoritmu výnimky pre medzivrstvové smerovanie kritických dát siete MANET

Vstupom pre algoritmus sú dáta z WSN alebo DRONET vrstvy, keďže DRONET vrstva po prenesení vracia dáta späť do MANET vrstvy. Prvým krokom je kontrola, či sú na vstupe dáta, ktoré sú označené ako kritické. Smerovací protokol by takto mal kontrolovať všetky dáta. V prípade, že dáta nie sú kritické, pokračuje sa v základnom smerovaní protokolu.

Pokiaľ dáta sú kritické, nasleduje pokus o odoslanie dát do najbližšieho prístupového bodu. V prípade, že sa v danej MANET sieti nenachádza žiaden prístupový bod, MANET uzol, ktorý dáta obdržal sa ich pokúsi odoslať MANET bráne. Ak uzol MANET bránu nepozná, zálohuje dáta za pomoci algoritmu zobrazenom vývojovým diagramom na Obr.4, a po určitý čas pokus o odoslanie opakuje v prípade, že algoritmus zálohy odošle status "Pokračuj". V prípade statusu "Zlyhanie" sú dáta zahodené a v prípade statusu "Úspešné" sa algoritmu zálohy dát podarilo odoslať dáta do AP. V prípade dostupnosti MANET brány sú dáta pri dostupnej konektivitve s LO odoslané do vrstvy DRONET. V opačnom prípade, pokiaľ nie je LO dostupný, zavolá sa algoritmus pre zálohovanie dát.

1) *Adaptívny smerovací protokol s využitím kognitívneho rádia:* Napriek tomu, že v predchádzajúcej kapitole boli z hľadiska IPv6 adresovania navrhnuté vhodné smerovacie protokoly, ako napríklad DSR s IPv6, AODV6 alebo IPv6 OLSR, ani jeden z týchto protokolov nezahŕňa takzvanú D2D komunikáciu. Tá bude v budúcnosti rozhodujúcou súčasťou vrstvy MANET, nakoľko je schopná poskytnúť komunikáciu bez interferencie s vysokou spektrálnou účinnosťou, ktorá bude vo vysoko preťaženom 5G prostredí nevyhnutná. Autori v [16] rozdeľujú D2D komunikáciu na vnútropásmovú (licencované spektrum) a mimopásmovú (nelicencované spektrum) komunikáciu na základe spektra, v ktorom prebieha. Pri vnútropásmovej komunikácii sa interferencia medzi D2D zariadeniami ruší tak, že používatelia medzi sebou zdieľajú celulárne zdroje. Mimopásmová komunikácia však pre odstránenie interferencie medzi celulárnymi používateľmi a D2D používateľmi využíva prechod z licencovaného spektra do nelicencovaného. V nelicencovanom spektre komunikujú zariadenia za pomoci technológií ako je Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee. Pokiaľ ide o MANET siete, riešením týchto problémov môže byť kognitívne rádio (CRAHN) spolu s Adaptívnym smerovacím protokolom (ASP), ktorý bol predstavený v publikácii [17].

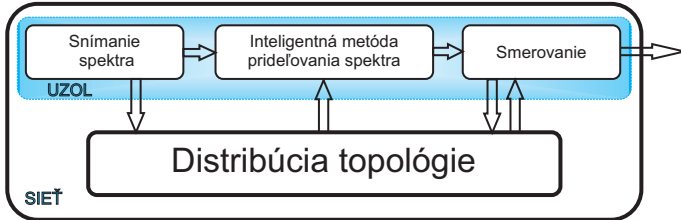
ASP je určený pre Ad-hoc siete využívajúce kognitívne rádio - CRAHN. Kognitívne rádio umožňuje používateľom nelicencovaného spektra (sekundárnym používateľom) oportunisticky využiť licencované spektrum, ktoré je vo väčšine vlastnené veľkými korporáciami a operátormi. Podmienkou je, aby sekundárny používateľ nijako neovplyvnil licencovaného (primárneho) používateľa. V dôsledku toho musí sekundárny používateľ (SU) opustiť využívané frekvenčné pásmo akonáhle sa objaví primárny používateľ (PU). To znamená, že SU musí neustále snímať a pozorovať svoje rádiové okolie, aby dokázal nájsť voľné frekvenčné pásmo a taktiež, aby dokázal detegovať PU a opustiť dané frekvenčné pásmo [18]. Kognitívne rádio je teda rádio, ktoré môže zmeniť parametre svojho vysielača na základe interakcie s prostredím, v ktorom pôsobí.

Kľúčovým faktorom pre efektívne smerovanie ASP je výber vhodných metód a technológií pre snímanie a prepínanie spektra. Cieľom bolo vytvorenie inteligentnej metódy, ktorá dokáže spracovať výsledky snímania spektra, posúdiť a vhodne



vybrať nasledujúce kroky v smerovaní. Týmto sa zabezpečí spolupráca smerovacieho protokolu s metódami pre snímanie a riadenie frekvenčného spektra.

Smerovací protokol ASP sa skladá z funkčných blokov, ktoré sú navzájom oddelené a spolupracujú medzi sebou odovzdávaním jednotlivých informácií. Princíp fungovania ASP je možné priblížiť pomocou blokovej schémy na Obr. 6.



Obr. 6. Blokovaná schéma ASP

Funkčné bloky predstavujú možnosti ASP vykonávať snímanie spektra, využívať inteligentnú metódu pridelovania spektra a na základe zhromaždených informácií a nadhľadu na topológiu siete aj smerovať komunikáciu. Informácie o topológii siete sa šíria medzi susednými uzlami v rámci funkčného bloku distribúcie topológie, ktorý operuje v sieti. Tento blok je zároveň zodpovedný aj za výmenu správ a informácií o snímaní spektra, ktoré sú dôležité z hľadiska kooperácie uzlov pri snímaní spektra.

Navrhovaný smerovací protokol využíva filozofiu smerovacieho protokolu DSDV (Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing) [19]. Tento smerovací protokol je postavený na báze proaktívneho smerovania, preto umožňuje uzlom a im jednoskokovým susedom vymieňanie si informácií o topológii. Táto výmena a smerovacie tabuľky však museli byť pre potreby ASP upravené do formy správ o budovaní topológie SBT. Ich štruktúru je možné vidieť na Obr. 7.

Čas	IDU	ID2	ID3	...	IDn
IDU	INF	7	2	...	0
ID2	53	INF	0	...	0
ID3	21	0	INF	...	0
...	...	...	...	INF	...
IDn	0	0	0	...	INF

Obr. 7. Štruktúra SBT správy

Správa SBT je v skutočnosti symetrická, štvorcová matica susednosti. Jednotlivé uzly v tejto správe sú identifikované identifikačným číslom  $ID1, ID2...IDn$ . Prvý riadok a prvý stĺpec patrí uzlu  $IDU$ , teda uzlu, ktorý správu SBT generuje. V správe sa ďalej nachádzajú všetky ostatné uzly, o ktorých uzol  $IDU$  vie. Nad diagonálou sa nachádza informácia o kanále, ktorý je nastavený na danej linke medzi dvoma uzlami. Pod diagonálou sa nachádza informácia o metrike na danej linke. V správe sa taktiež nachádza údaj označený ako čas. Tento údaj je potrebný pre to, aby uzol prijímajúci túto správu používal iba najaktuálnejšie správy a predišlo sa tak nesprávnym a zastaralým informáciám vedúcim k slučkám.

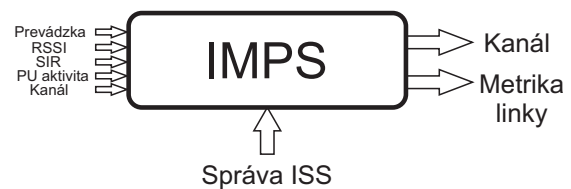
Funkčný blok snímania spektra má za úlohu aktívne snímať spektrum v okolí uzla. Okrem vlastných získaných údajov zo snímania spektra, každý uzol generuje správu o snímaní spektra SSS, ktorú distribuuje medzi svojich jednoskokových susedov. Tým sa zabezpečí kooperácia uzlov pri snímaní spektra a to, že uzly trpiace slabým alebo skresleným signálom obdržia aktuálne a presnejšie informácie o dostupnom spektre. Štruktúru správy SSS je možné vidieť na Obr. 8.

IDU	PU akt.	Kanál	Parameter 1	Parameter 2	...	Parameter N
ID1	0	7	X	X		X
ID2	0	4	X	X		X
ID3	0	1	X	X		X
ID4	1	13	X	X		X

Obr. 8. Štruktúra SSS správy

Správa SSS obsahuje informácie snímané v okolí uzla označeného  $IDU$ , ktorý túto správu generuje. Uzol sníma informácie o spektre svojich jednoskokových susedov  $ID1, ID2...IDn$ . Základné parametre odzrkadľujú informácie o aktivite PU a kanáli na linke s daným susedom. V tabuľke je taktiež priestor pre ďalšie parametre, ktoré sú závislé od druhu použitej inteligentnej metódy vo funkčnom bloku snímania spektra. Získané dáta zo snímania spektra sú následne odovzdané funkčnému bloku inteligentného priradzovania spektra.

Úlohou inteligentnej metódy pridelovania spektra (IMPS) je inteligentné a adaptívne pridelovanie kanálov vyšetovaných liniek daného uzla a produkcia výstupnej metriky, ktorou sú vyšetované linky ohodnotené. IMPS je implementovaná na každom uzle a samostatne rozhoduje o vhodnosti priradenia kanálov pre všetky linky daného uzla s jeho susedmi. Konečný najvhodnejší kanál na danej linke je zvolený na základe dohody so susedným uzlom, s ktorým daný uzol zdieľa danú linku. Vstupom pre IMPS sú informácie zo snímania spektra a SSS správy susedných uzlov. Výstupom je zoznam najvhodnejších kanálov pre danú linku a jej hodnotenie. Susedný uzol vyprodukuje obdobný zoznam na základe svojich informácií o spektre. Výsledný kanál na danej linke je zvolený na základe najideálnejšieho prieniku zoznamov najlepších kanálov oboch uzlov. Štruktúra IMPS je zobrazená na Obr.(Obr. 9).



Obr. 9. Štruktúra bloku IMPS

Vstupom pre IMPS sú parametre ako prevádzka, indikátor sily prijatého signálu (Received Signal Strength Indicator - RSSI), pomer signálu k interferencii (Signal to Interference ratio- SIR), aktivita primárneho používateľa PU a predchádzajúci priradený kanál. Tieto parametre následne IMPS blok vyhodnotí za pomoci Fuzzy logiky, čím získa

výstupné dáta. Podrobný opis vstupných parametrov a samotné nastavenia Fuzzy logiky sú bližšie popísané v publikácii [20].

Smerovanie je posledným funkčným blokom ASP. Tento blok je zodpovedný za výber zdrojovej cesty pokiaľ o ňu uzol požiada. Predpokladom funkčnosti tohto bloku je existencia IMPS bloku a periodická distribúcia topológie vo forme správy SBT. Za pomoci správ STB je možné zostaviť topológiu siete a za pomoci metriky z IMPS je možné linky topológie ohodnotiť. Na základe týchto informácií vzniká sieťový graf, v ktorom je možné na určenie najvýhodnejšej zdrojovej cesty použiť algoritmy ako Dijkstra, Bellman-Ford, Floyd-Warshall a podobne.

Po správnej implementácii je smerovací protokol ASP schopný v rámci komunikácie v mobilnej Ad-hoc sieti inteligentne pridelovať Wi-Fi kanály a obmedziť týmto spôsobom vzájomné rušenie susedných uzlov. Za aktivitu primárneho používateľa PU je možné považovať prenos kritických dát medzi uzlami. Pri zistení primárnej aktivity sa ostatné uzly snažia preladiť kanály a uvoľniť spektrum pre kritickú komunikáciu. Ako bolo spomenuté vyššie, protokol nie je navrhnutý na IPv6 adresovanie. Preto by pre jeho implementáciu v rámci konceptu VSM potrebné túto funkcionálnu implementovať. To však už spadá do budúceho výskumu.

### C. DRONET vrstva viacvrstvého modelu siete

Tretia DRONET vrstva hrá vo VSM úlohu záložnej alebo chrbticovej siete. Dôvodom je skutočnosť, že siete MANET sa môžu kvôli mobilite rozdeliť na viacero podsietí. Niektoré podsiete MANET preto nemusia byť pripojené k funkčnému prístupovému bodu. Hlavnou myšlienkou je pokrytie MANET podsietí za pomoci LO a vhodných komunikačných technológií. Potom je možné prenášať kritické dáta na veľké vzdialenosti z jednej MANET podsiete do druhej, ktorá disponuje funkčným pripojením k prístupovému bodu.

Samotné LO je možné vybaviť viacerými komunikačnými technológiami. Pre vyhľadávanie a komunikáciu s MANET uzlami môže LO využiť technológiu IEEE 802.11 Wi-Fi. Pre komunikáciu s ostatnými LO a centrálnym uzlom je možné použiť technológiu IEEE 802.16 WiMAX [21], ktorá ponúka spôsob, ako sa vyhnúť interferencii medzi zariadeniami druhej a tretej vrstvy. Štandard WiMAX totižto ponúka vzdušné rozhranie pri modulácii s jednou nosnou, známe tiež ako WirelessMAN-SC [22]. Pracuje v pásme 10 – 66 GHz s typickými šírkami pásma kanálov na úrovni 25 alebo 28 MHz. Rýchlosť prenosu dát sa tak môže pohybovať na úrovni 120 Mbps a rádiový dosah sa počíta radovo v kilometroch.

Predpokladom funkcionality DRONET siete vo VSM je prítomnosť centrálného bodu, ktorý bude v tomto prípade predstavovať takzvaný dok. LO majú podobne ako MANET uzly obmedzené energetické zdroje. Po určitom čase je teda potrebné, aby používaný LO nahradil nový LO s plnou kapacitou batérií. Dok bude teda slúžiť ako centrála DRONET siete, ktorá bude vysielať ale aj prijímať LO z danej oblasti. Predpokladom je tiež fakt, že dok bude rovnako ako LO implementovať komunikačnú technológiu WiMAX. Za pomoci nej bude možné LO organizovať a tiež vykonávať energeticky

náročné operácie, ako je napríklad klustrovanie. Príkladom doku pre LO prezentovali vo svojej práci autori štúdie [23].

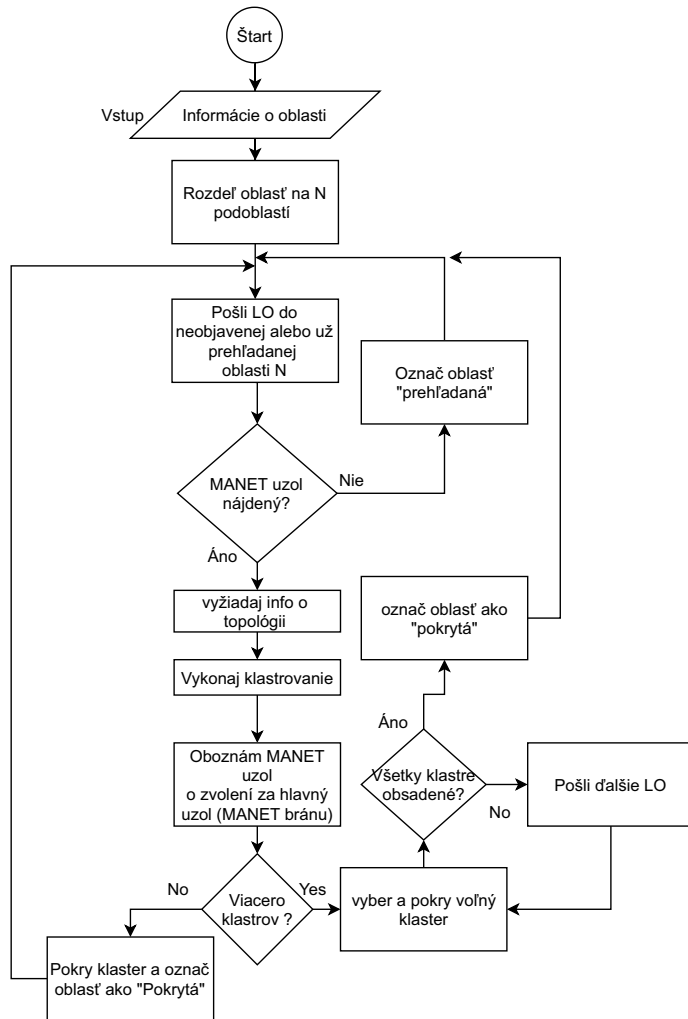
Keďže DRONET vrstva slúži ako zálohová alebo chrbticová sieť, predpokladom je fakt, že táto sieť nemusí byť vždy prístupná, pretože je funkčná len prípade narušenia pevnej infraštruktúry. Toto obmedzenie existuje z dôvodu, že nepretržité fungovanie DRONET siete a jej LO je energeticky náročné. Táto nevýhoda sa dá po dobu trvania narušenia siete odstrániť aj vyššie spomenutým dokom, ktorý slúži ako dokovacia stajňa pre LO, kde sa môžu jednotlivé LO dobíjať.

V prípade VSM sa rozlišujú dva štádiá fungovania DRONET siete:

- 1) *Inicializačné a vyhľadávacie štádium* – štádium, ktoré predchádza plne konvergovanej DRONET sieti. V tomto štádiu dochádza k prehľadávaniu oblasti a aktívnemu vyhľadávaniu MANET uzlov. V prípade vyhľadania MANET uzlov sa vykonáva klustrovanie siete a obsadzovanie klastrov.
- 2) *Štádium smerovania* – štádium, ktoré nastáva po konvergencii siete. V tomto štádiu je aspoň časť MANET siete pokrytá za pomoci LO a komunikácia medzi nimi je funkčná.

Hlavnou úlohou inicializačného a vyhľadávacieho štádia je v prvotnom okamihu inicializácie vyhľadávanie MANET uzlov a vykonávanie pokrytia danej oblasti. Po objavení jednotlivých MANET uzlov a sietí však toto štádium nekončí. K aktívnemu vyhľadávaniu MANET uzlov v neprebádaných či prázdnych oblastiach dochádza nepretržite, nakoľko pohyb MANET uzlov môže zapríčiniť odtrhnutie sa jednotlivých sietí MANET na podsiete, alebo môže dôjsť k objaveniu nových MANET uzlov, ktoré doteraz v sieti nefigurovali. Predpokladá sa, že oblasť operovania DRONET siete je vopred známa. Ďalším predpokladom je existencia doku a jeho vhodné umiestnenie v danej oblasti, z ktorej môže LO vysielať na prieskumné lety do jednotlivých podoblastí, resp. sektorov. Vývojový diagram na Obr.10 bližšie popisuje fungovanie inicializačného a vyhľadávacieho štádia.

Vstupom pre algoritmus sú informácie o oblasti, ktorá je následne rozdelená na  $N$  podoblastí. Predpokladá sa, že spočiatku sú všetky podoblasti neprebádané a dok postupne vysiela do každej LO. Na základe IEEE 802.11 Wi-Fi rozhrania LO skenuje oblasť a vyhľadáva Beacon signalizačné správy, na základe ktorých následne prebehne spojenie sa s nájdeným MANET uzlom. Pokiaľ sa v oblasti žiaden MANET uzol nenájde, oblasť je označená za „Prehľadanú“ a LO sa vráti do doku. Pokiaľ je MANET uzol objavený, LO požiada o smerovaciu tabuľku. Predpokladá sa, že na základe tejto tabuľky a pozícií uzlov v nej je možné vykonať klustrovací algoritmus. V tomto prípade je možné použiť viacero druhov klustrovacích algoritmov, od jednoduchých ako je algoritmus najmenších ID alebo algoritmus najvyššej konektivity (stupňa uzla) [24], až po komplexnejšie algoritmy ako je Particle Swarm Optimization (PSO) [25]. Klustrovanie DRONET vrstva vykonáva preto, aby sa väčšie MANET podsiete mohli rozdeliť logicky na menšie a boli pokryteľné rádiovým dosahom LO. Zároveň



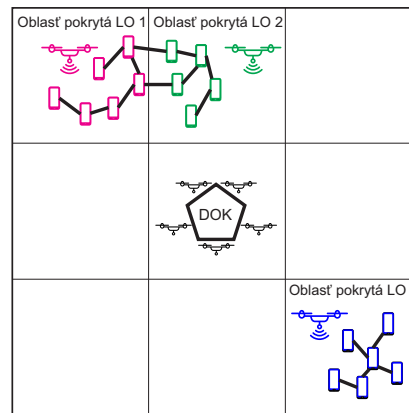
Obr. 10. Vývojový diagram algoritmu inicializačného a vyhľadávacieho štádia siete DRONET

je vedúci uzol (Cluster Head) určený klastrovacím algoritmom zvolený ako MANET výstupná brána.

Po vykonaní klastrovania sú známe vedúce uzly každého klastra, pričom túto skutočnosť LO MANET siete oznámi. Následne prichádza k pokrytiu klastra a navodeniu spojenia s MANET bránou, ktorá bola zvolená ako vedúci uzol klastra. Ako bolo spomenuté vyššie, môže sa však vyskytnúť aj situácia, kde je jedná veľká MANET sieť rozdelená na viacero klastrov. Táto situácia je zobrazená na Obr.11.

V tomto prípade LO obsadí prvý voľný klastre a dok následne vysiela ďalšie LO, kým nie sú pokryté všetky klastre. Následne sa príslušné oblasti označia ako „Pokryté“. Tento algoritmus tak v nekonečnej slučke skenuje prehľadane alebo neprehľadane oblasti, pretože aj v prehľadanej oblasti sa môže v priebehu času vyskytnúť nový uzol alebo podsieť.

Po úspešnom inicializačnom a vyhľadávacom štádiu je možné za pomoci DRONET siete počas narušenia pevnej infraštruktúry smerovať kritické dáta za pomoci štádia smerovania. Keďže táto vrstva nesmeruje kritické dáta do prístupových bodov k internetu, nevyžaduje sa IPv6 adresovanie. DRONET



Obr. 11. Znáznornenie oblasti s MANET sieťami rozdelenými na podsiete.

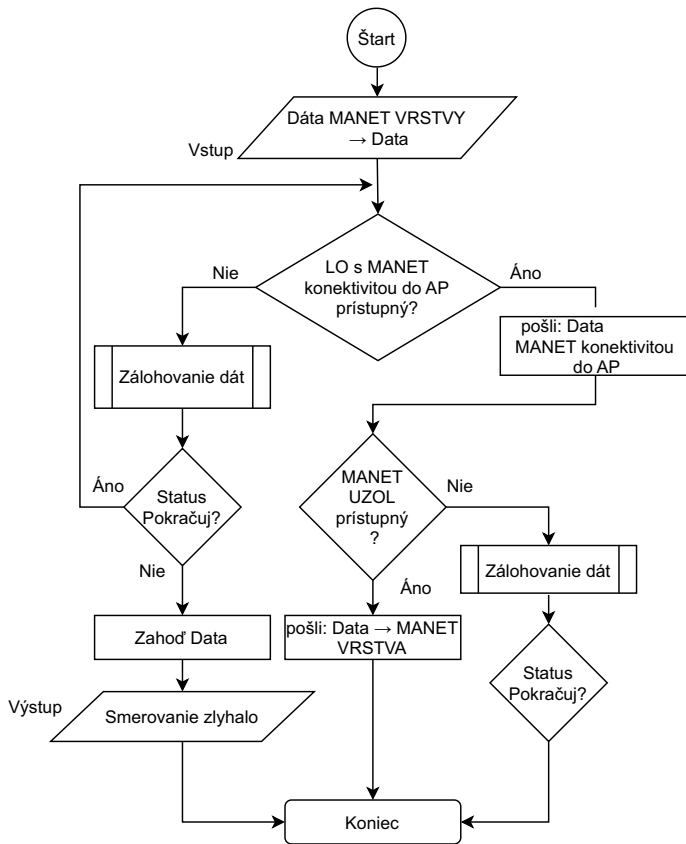
vrstva je len zálohová chrbticová sieť, ktorej úlohou je preniesť dáta z jednej časti oblasti do inej vzdalenej oblasti s vyššou dátovou rýchlosťou.

V posledných rokoch sa preto viacero štúdií zameralo na porovnanie výkonnosti smerovacích protokolov pre túto technológiu. V [26] autori porovnávajú smerovacie protokoly DSDV, DSR a AODV, kde protokol tabuľkovo-riadený protokol DSDV poskytuje najlepší výkon, pokiaľ ide o parameter frakcie dodania paketov. Naopak, v [27] autori naznačujú, že protokol AODV výkonnovo predčil smerovacie protokoly DSR a DSDV. Porovnanie výkonnosti v [28] ukazuje, že v mobilnom prostredí majú protokoly ZRP a AODV lepší výkon ako protokoly DSR a OLSR. Autori v [29] tiež zvažujú výkon smerovacích protokolov pri odosielaní údajov o zdravotnej starostlivosti prostredníctvom WiMAX siete. Výsledky ukazujú, že zo študovaných protokolov AODV, OLSR, ZRP a LAR1 môžu posledné dva uvedené poskytnúť lepšie výsledky pri odosielaní telemedicínskych dát cez bezdrôtový kanál s vysokou priepustnosťou a lepšou reprodukovateľnosťou.

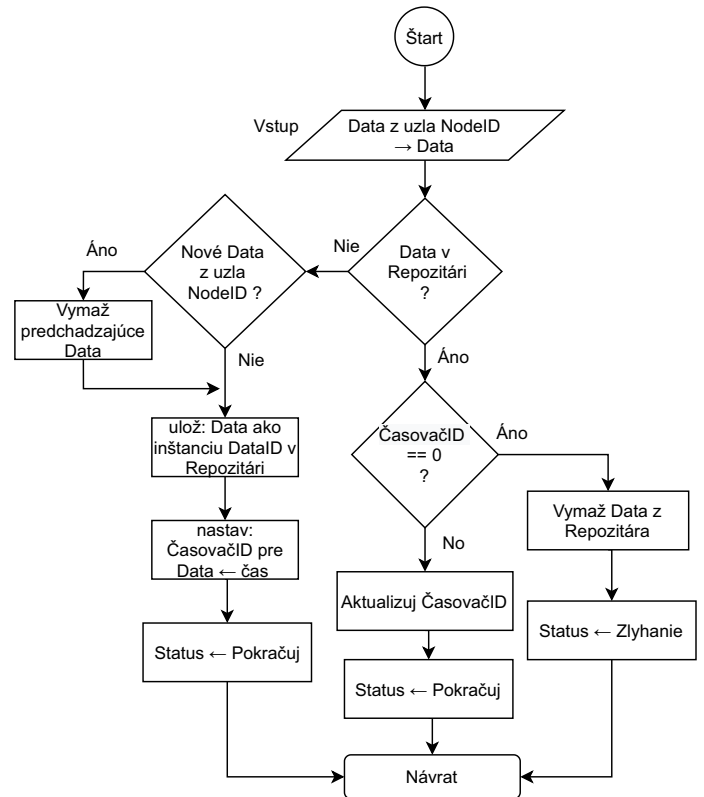
Vo vrstve DRONET konceptu VSM je vhodnejšie použiť reaktívny protokol, nakoľko periodické aktualizácie správy by mohli byť energeticky viac náročné pre obmedzené energetické zdroje LO. Z tohto hľadiska vyhovujú týmto požiadavkám protokoly AODV [19], prípadne hybridný protokol ZRP [30] alebo rektívno-lokačný protokol LAR1 [31]. Aj tieto protokoly je však potrebné upraviť, aby boli vhodné pre účely smerovania vo VSM. Vývojový diagram na Obr.12 preto popisuje priebeh smerovania v DRONET vrstve.

Vstupom sú kritické dáta z MANET vrstvy. Predpokladom je fakt, že pri vyzdvihnutí informácií o topológii MANET siete od MANET uzla sa v týchto informáciách nachádza aj údaj, ktorý hovorí o prítomnosti prístupového bodu AP v danej sieti. Preto po vyzdvihnutí kritických dát z MANET vrstvy je potrebné vo smerovacích informáciách tieto údaje zohľadniť.

Na základe toho je možné v druhom kroku algoritmu hľadať cieľové LO s konektivitou k MANET sieti, v ktorej je dostupný funkčný prístupový bod do internetu. Pokiaľ sa takéto LO nepodarí nájsť, zavolá sa funkcia zálohovania dát. Keďže táto vrstva dáta do prístupového bodu AP nesmeruje,



Obr. 12. Vývojový diagram algoritmu pre medzivrstvové smerovanie kritických dát siete DRONET



Obr. 13. Vývojový diagram funkcie zálohovania kritických dát siete DRONET

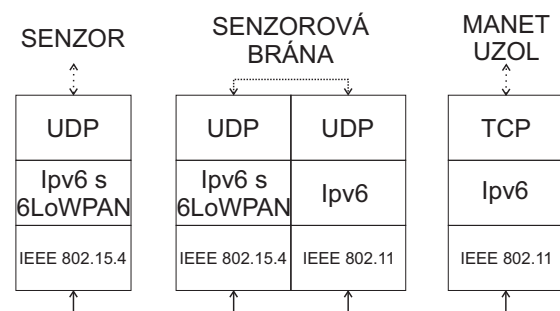
je potrebné pozmeniť predchádzajúcu funkciu zálohovania kritických dát. Táto zmena je popísaná vývojovým diagramom 13, ktorý je popísaný nižšie. Na základe výstupných statusov sú následne vykonané akcie pre opätovné vyhľadanie LO s konektivitou na MANET sieť s prístupným bodom pre status "Pokračuj", alebo zahodenie dát pre status "Zlyhanie" v prípade uplynutia času zálohovania dát.

V prípade, že sa LO s MANET konektivitou k prístupnému bodu našlo, kritické dáta sú posielané k tomuto LO. V poslednom kroku sa skontroluje dostupnosť MANET uzla k danej MANET sieti. V prípade jeho dostupnosti sú kritické dáta prenesené do MANET siete. V prípade jeho nedostupnosti je zavolaná funkcia zálohovania dát, ktorá dáta zálohuje a čaká na novú príležitosť k preneseniu dát.

#### D. Medzivrstvové smerovanie viacvrstvého modelu siete

V predchádzajúcich kapitolách boli postupne predstavené jednotlivé vrstvy konceptu VSM spoločne s náznakmi toho, ako a kedy je možné kritické dáta preniesť do vyšších vrstiev. WSN vrstva je rozdelená na 2 typy senzorov. Sú to klasické senzory využívajúce komunikačnú technológiu ZigBee IEEE 802.15.4, ktoré sú zodpovedné za zber dát a ich odosielanie k senzorovým bránam alebo k AP, ak je dostupný. Druhý typ senzorov sú senzorové brány. Tieto senzory okrem komunikačnej technológie ZigBee využívajú aj technológiu Wi-Fi

IEEE 802.11, ktorá im zabezpečí spojenie s MANET uzlami a prenesenie kritických dát do MANET vrstvy. Z tohto dôvodu musia senzorové brány implementovať dvojité protokolové zásobníky. Táto situácia je zobrazená na Obr.14

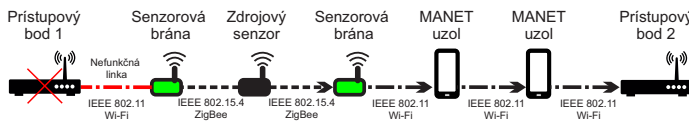


Obr. 14. Príklad použitia dvojitého protokolového zásobníka senzorovej brány v sieti WSN modelu VSM

Na Obr. 14 je možné vidieť, že klasický senzor a senzorová brána môžu v rámci transportnej vrstvy využívať protokol UDP, ktorý je na rozdiel od protokolu TCP menej spoľahlivý, no energeticky menej náročný. V rámci sieťovej vrstvy bude na strane senzora použitý protokol 6LoWPAN s podporou IPv6 rovnako ako na strane senzorovej brány. Tá ale musí implementovať aj druhý zásobník, ktorý už na sieťovej vrstve využije IPv6 protokol a na spojovej zas technológiu IEEE 802.11 Wi-Fi. Týmto spôsobom môže senzorová brána komunikovať s MANET zariadeniami, ktoré takisto používajú na

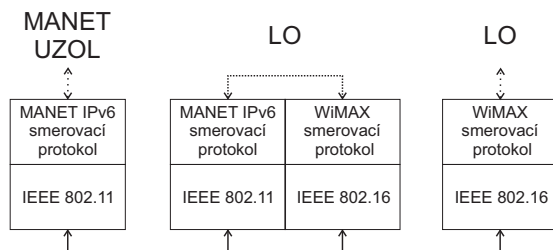
spojovej vrstve IEEE 802.11 Wi-Fi a na sieťovej zas protokol využívajúci IPv6.

Z hľadiska MANET vrstvy bude jedinou komunikačnou technológiou IEEE 802.11 Wi-Fi. Hoci do MANET vrstvy bude môcť odoslať dáta len WSN sensorová brána, kritické dáta z nej ale bude môcť prijať akýkoľvek MANET uzol, ktorý sensorovú bránu vidí. V rámci zachovania integrity týchto dvoch vrstiev je vhodné, aby MANET sieť využívala smerovací protokol postavený na IPv6 adresovaní. Týmto sa zabezpečí, že MANET uzol bude môcť doručiť kritické dáta do prístupového bodu v rámci 5G siete a tiež nebude potrebná spätná konverzia medzi IPv4 a IPv6. Komunikáciu medzi senzormi, sensorovými bránami, MANET uzlami a AP je možné vidieť na Obr.15



Obr. 15. Komunikácia medzi senzormi, sensorovými bránami a MANET uzlami.

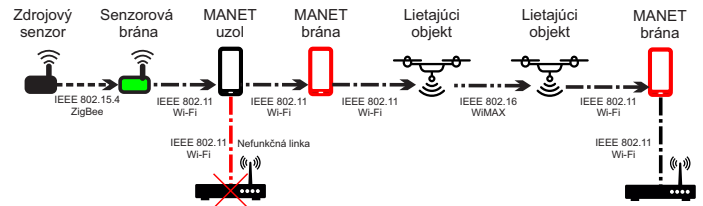
Tretia vrstva DRONET siete bude okrem technológie WiMAX IEEE 802.16 pre účely spojenia s MANET sieťou využívať technológiu IEEE 802.11 Wi-Fi. Týmto spôsobom bude možné zo vzduchu vyhľadať MANET uzly a nadviazať komunikáciu. Aby však bolo možné pokryť MANET sieť za pomoci LO, je potrebné, aby LO vykonali prieskum oblasti a identifikovali topológiu siete a následne ju rozdelili za pomoci klastrovacích algoritmov na jednotlivé podsiete, v ktorých bude zvolený jeden vedúci uzol (Cluster Head). Tento uzol bude zároveň pre MANET uzly bránou do DRONET siete. Pokiaľ sa teda v MANET sieti objavia dáta, ktoré budú identifikované ako kritické, budú automaticky smerované do prístupového bodu do internetu, alebo v prípade jeho nedostupnosti k zvolenému vedúcemu uzlu podsiete a následne do vrstvy DRONET. Aby bolo možné použiť oba komunikačné technológie, LO DRONET vrstvy budú používať dvojité protokolové zásobníky obdobne ako WSN sensorové brány. Ten je zobrazený na Obr.16.



Obr. 16. Príklad použitia dvojitého protokolového zásobníka LO v sieti DRONET modelu VSM

V prípade, že sa kritické dáta ocitnú v MANET vrstve bez funkčného AP, dáta sú smerované k MANET bráne a následne do DRONET vrstvy. Odtiaľ sa kritické dáta vrátia späť do inej MANET podsiete s prístupným AP. Dáta sú nakoniec

odovzdané cloudovej službe na internete prostredníctvom AP. Príklad tejto komunikácie je možné vidieť na Obr.17.



Obr. 17. Komunikácia medzi senzormi, sensorovými bránami, MANET uzlami a lietajúcimi objektami LO.

### III. SIMULÁCIE A VÝSLEDKY

Na základe teoretického rozboru bol navrhnutý koncept Viacvrstvého sieťového modelu testovaný za pomoci simulácií v prostredí Matlab rovnako ako Adaptívny smerovací protokol. Simulácie a výsledky ale budú rozdelené do dvoch častí, pričom prvá bude prezentovať dosiahnuté výsledky konceptu VSM a druhá protokolu ASP.

#### A. Simulácie a výsledky viacvrstvého sieťového modelu

Cieľom tejto sady simulácií je poukázať na fakt, že v prípade narušenia pevnej infraštruktúry 5G sietí a sietí IoT, môže navrhnutý koncept VSM prebrať úlohu kritických aplikácií a služieb. Snahou je poukázať na fakt, že prepojenie viacerých sietí do hierarchicky zloženého viacvrstvého modelu má oproti využitiu čisto sensorových sietí výhody v podobe prenesenia kritických dát k funkčným prístupovým bodom s vyššou prenosovou rýchlosťou a nižším oneskorením.

Simulácie konceptu VSM boli rozdelené do dvoch simuláčnych scenárov, ktoré majú ilustrovať výhodu použitia viacerých vrstiev modelu VSM oproti nasadeniu len WSN sietí v oblasti postihnutej výpadkom pevnej 5G a IoT infraštruktúry.

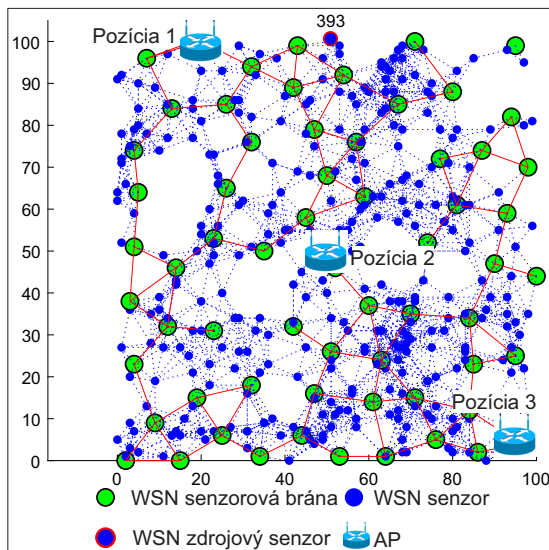
1) *Prvý simuláčny scenár:* Simulačný scenár má poukázať na výhody pridania MANET vrstvy k sieti WSN. Samotný scenár pozostáva zo simulačnej oblasti s rozlohou 100 x 100 metrov, ktorej je náhodne rozmiestnených 400 WSN senzorov s rádiovým dosahom 10 metrov. Predpokladom je využitie komunikačnej technológie IEEE 802.15.4 ZigBee so smerovacím protokolom RPL-Weighth využívajúcim protokol 6LoWPAN. Na základe technológie ZigBee bol zvolený rádiový dosah medzi WSN senzormi na 10 metrov s dátovou rýchlosťou 30 Kbps. Dátová rýchlosť bola náhodne vygenerovaná na každej linke medzi WSN senzormi v rozmedzí +/-50%. Toto rozmedzie má zohľadňovať nepredpokladané vplyvy prostredia na dátovú rýchlosť. V oblasti tiež bolo náhodne umiestnených 20 MANET senzorov tak, aby signálom rovnomerne pokryli oblasť. MANET uzly pre komunikáciu využívajú IEEE 802.11 Wi-Fi technológiu so štandardom 802.11n. Ten umožňuje uzlom nastaviť rádiový dosah na úrovni 40 metrov pri dátovej rýchlosti 100 Mbps. Podobne ako v prípade WSN siete, aj v MANET sieti boli dátové rýchlosti náhodne generované na každej MANET linke z rozsahu +/-50%. V sieti sa tiež

nachádza jeden prístupový bod AP, ktorý má ten istý rádiový dosah a dátovú rýchlosť ako MANET uzly.

Simulačný scenár počíta s výberom jedného zdrojového uzla, ktorý je zdrojovým uzlom a pokúša sa odoslať kritické dáta na spracovanie k príslušnej aplikácii či službe na internete. Úlohou smerovacích protokolov v oboch prípadoch je nájsť optimálnu smerovaciu cestu k prístupovému bodu, ktorá zohľadňuje počet skokov a dátovú rýchlosť. Pre ilustráciu výhod použitia ďalšej vrstvy v podobe MANET siete bol jediný prístupový bod v sieti strategicky umiestnený postupne v troch rôznych pozíciách:

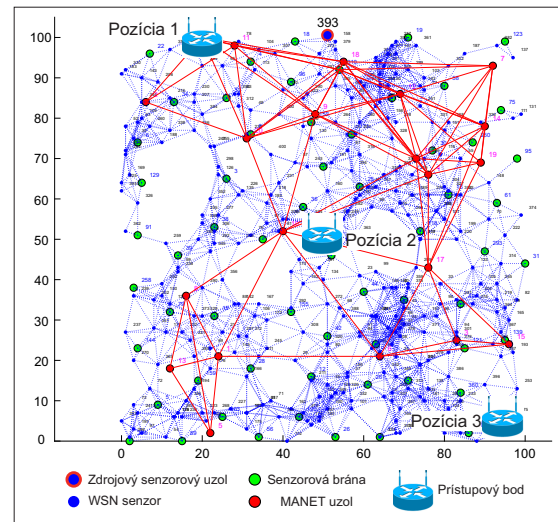
- *Pozícia 1* – umiestnenie v ľavom hornom rohu v pomernej blízkosti zdrojového WSN senzora
- *Pozícia 2* – umiestnenie v strede oblasti
- *Pozícia 3* – umiestnenie v pravom dolnom rohu oblasti, ktorá má simulovať najvzdialenejší bod od zdrojového WSN uzla

Rozloženie jednotlivých senzorov v prípade simulácie len s uzlami WSN siete spolu s pozíciou zdrojového sensorového uzla ako aj jednotlivé pozície prístupového bodu AP sú zobrazené na Obr.18. Druhý prípad simulácie s rozložením WSN a MANET uzlov, zdrojového uzla a pozícií AP je možné vidieť na Obr.19.



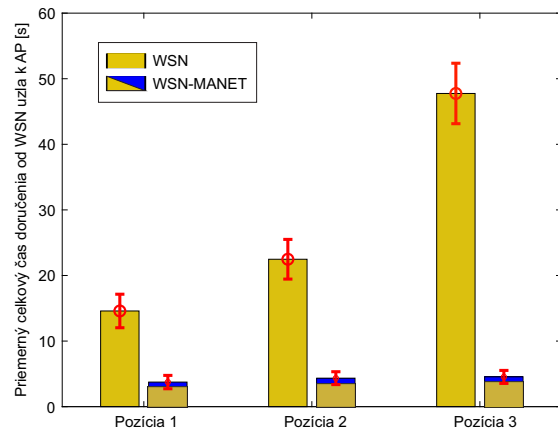
Obr. 18. Príklad simulačného scenára 1 s rozmiestnením WSN uzlov spoločne s jednotlivými pozíciami prístupových bodov.

Prvý výsledok je zameraný na celkový priemerný čas doručenia 100 Kb kritických dát zo zdrojového senzora k prístupovému bodu AP. Tento výsledok je zobrazený grafom na Obr.20. Graf zobrazuje celkový priemerný čas potrebný pre doručenie dát WSN sieťou a WSN-MANET sieťou v rámci viacvrstvého modelu siete, pričom je potrebné poznamenať, že pri týchto simuláciách nebol uvažovaný čas potrebný na presmerovanie dát na jednotlivých zariadeniach. V prípade WSN-MANET siete je možné pozorovať v stĺpcových grafoch dvojitú zložku času. Tento čas je zložený z času potrebného na prenos dát prostredníctvom WSN siete a následne



Obr. 19. Príklad simulačného scenára 1 s rozmiestnením WSN a MANET uzlov spoločne s jednotlivými pozíciami prístupových bodov.

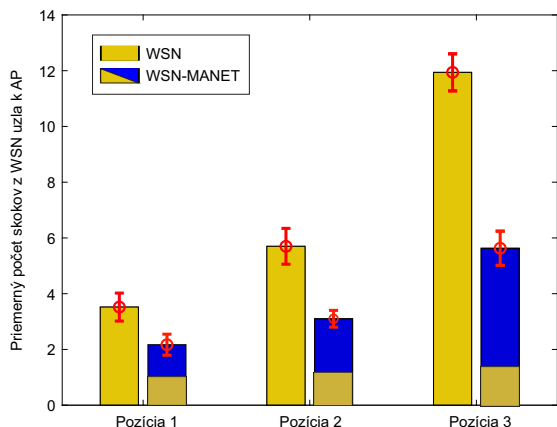
prostredníctvom MANET siete. Za pomoci tohto grafického vyjadrenia je možné vidieť, že väčšinová zložka celkového času potrebného na prenesenie dát je tvorená časom potrebným na prenos dát cez WSN sieť. Preto je možné tvrdiť, že MANET sieť výrazne urýchľuje prenos dát. Celkový výsledok pre všetky pozície umiestnenia prístupového bodu AP ukazujú výrazné zníženie času prenosu dát, pričom trend je výraznejší so vzdialujúcim sa prístupovým bodom. Celkovo je možné na základe dosiahnutých výsledkov povedať, že spojenie WSN a MANET výrazne prispieva k zníženiu oneskorenia pri doručovaní kritických dát.



Obr. 20. Priemerný celkový čas doručenia 100 Kb dát z WSN zdrojového uzla k prístupovému bodu AP.

Druhý výsledok zobrazený grafom na Obr.21 vyjadruje priemerný počet skokov od zdrojového WSN senzora k prístupovému bodu AP. Podobne ako pri prvom výsledku, tak aj v tomto prípade sú graficky znázornené jednotlivé zložky skokov v stĺpcoch prislúchajúcim WSN-MANET sieti. Na rozdiel od prvého výsledku je však vidieť, že napriek nevýraznému trendu zvyšujúceho sa času prenosu je trend

počtu skokov v MANET sieti výraznejší. Na rozdiel od WSN siete je však v každom prípade WSN-MANET siete počet skokov nižší. Pre pozíciu 1 je redukcia počtu skokov na úrovni približne 42%, zatiaľ čo pri ostatných pozíciách spojenie WSN a MANET sietí postupne redukuje počet skokov o viac ako 50%, pričom táto redukcia sa so vzdialujúcim sa prístupovým bodom zvyšuje. Dôvodom je fakt, že uzly MANET siete okrem vyšších prenosových rýchlostí poskytujú aj väčší rádiový dosah.



Obr. 21. Priemerný počet skokov od zdrojového WSN senzora k prístupovému bodu AP.

Tretí výsledok vo forme tabuľkového zobrazenia na Obr.22 uvádza priemerné hodnoty dátovej rýchlosti, ktorá bola dosiahnutá na jednotlivých nájdených optimálnych cestách pri odosielaní 100 Kb kritických dát. Táto hodnota bola dosiahnutá spriemerovaním dátových rýchlostí dosiahnutých na jednotlivých častiach nájdených optimálnych ciest. Na základe hodnôt je možné vidieť, že dátová rýchlosť pri prenose kritických dát WSN sieťou je mnohonásobne nižšia, ako v prípade prenosu dát prostredníctvom MANET siete. Zatiaľ čo vo WSN sieti sa priemerná dátová rýchlosť pohybuje na úrovni 26 až 28 Kbps, v prípade WSN-MANET siete je to už radovo od 45 po 82 Mbps. V prípade WSN-MANET siete je tiež možné pozorovať zvyšujúci sa trend priemernej dátovej rýchlosti. Tento fenomén je zapríčinený faktom, že na dlhšej prenosovej ceste sa prenos dát uskutočňuje v stále väčšej časti MANET siete, čo je deklarované aj výsledkom počtu skokov zobrazených na Obr.21.

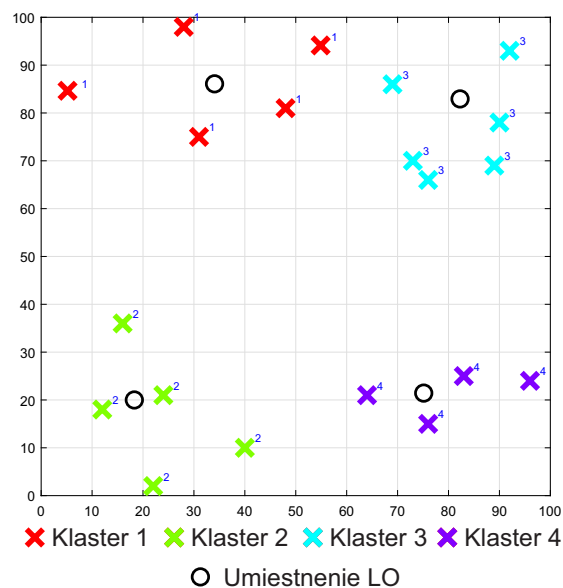
Poloha AP	Priemerná dátová rýchlosť pri prenose 100 Kb dát [Mbps]			
	WSN		WSN-MANET	
	Priemer	Štandardná odchýlka	Priemer	Štandardná odchýlka
Pozícia 1	0,0264	0,0035	45,41	17,74
Pozícia 2	0,0276	0,0035	68,97	14,17
Pozícia 3	0,0275	0,0025	82,00	10,29

Obr. 22. Priemerná dátová rýchlosť na zdrojových cestách od WSN senzora k prístupovému bodu AP.

2) *Druhý simulačný scenár:* Ďalší simulačný scenár pridáva k WSN-MANET sieti aj LO zariadenia DRONET

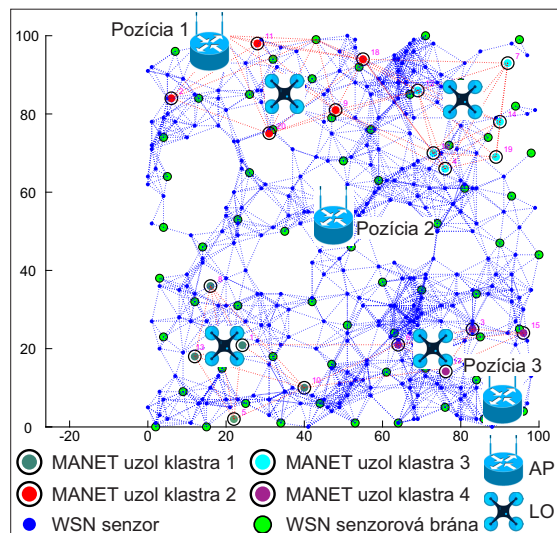
siete, ktoré doplnia celkový koncept VSM. Ten bude porovnávaný podobne ako pri prvom simulačnom scenári s WSN sieťou. V tomto prípade funguje model tak, že smerovacie protokoly sa primárne snažia doručiť kritické dáta za pomoci MANET vrstvy. Aj napriek prítomnosti LO zariadení, je v prípade dostupnosti prístupového bodu použitá MANET sieť. LO siete DRONET sú využité len vtedy, ak prístupový bod príslušnej MANET siete nie je dostupný.

Rozloženie WSN uzlov s ich parametrami a technológiami je rovnaké ako v prípade prvého simulačného scenára. Počet a parametre MANET uzlov zostali nezmenené, čiastočne ale boli upravené niektoré pozície MANET uzlov tak, aby bola pôvodná MANET sieť rozdelená na dve podsiete. Táto zmena bola vykonaná z dôvodu, aby bolo možné simulovať rozdelenie MANET siete na jednotlivé podsiete a existovala nutnosť využitia LO siete DRONET. Samotné LO využívajú na komunikáciu technológiu IEEE 802.16 WiMAX s protokolom AODV. Na základe toho bol rádiový dosah LO určený na 200 metrov s dátovou rýchlosťou 250 Mbps. Ich počet a rozmiestnenie v oblasti je určené na základe počtu klastrov a ich umiestnenia v oblasti. Pri tomto úkone bol použitý klastrovací algoritmus PSO, ktorý rozdelil jednotlivé MANET uzly do 4 klastrov, respektíve podsietí na základe pozícií. Výstup klastrovacieho algoritmu je možné vidieť na Obr. 23.



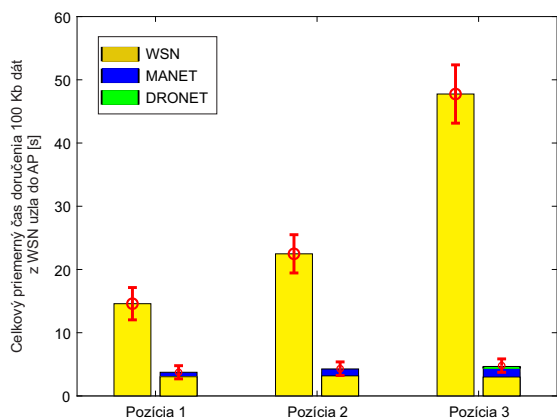
Obr. 23. Výstup z kastrovacieho algoritmu PSO pre MANET sieť.

Podobne ako v prípade predchádzajúceho simulačného scenára, aj pri ďalšom simulačnom scenári boli použité tri rôzne polohy prístupového bodu. Konkrétne umiestnenia sa zhodujú s prvým simulačným scenárom a spoločne s umiestnením WSN, MANET a LO uzlov je ich možné vidieť na Obr.24. MANET sieť je fyzicky oddelená na dva podsiete, nakoľko vrchná (pozdĺž osy Y) MANET podsieť nemá konektivitu so spodnou MANET sieťou. Zároveň je MANET sieť logicky rozdelená na 4 podsiete podľa klastrov na základe klastrovacieho algoritmu PSO.



Obr. 24. Príklad simulačného scenára 2 s rozmiestnením WSN, MANET a LO uzlov spoločne s jednotlivými pozíciami prístupových bodov.

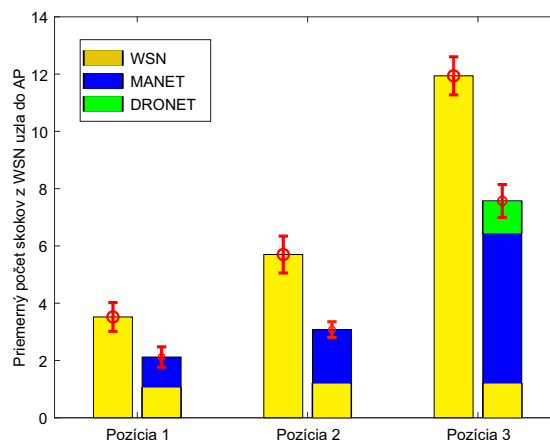
Prvý výsledok podobne ako v prvom simulačnom scenári zohľadňuje celkový priemerný čas doručenia 100 Kb kritických dát zo zdrojového senzora k prístupovému bodu AP. Tieto simulácie však okrem WSN a MANET siete zahrňujú aj sieť DRONET. Preto je možné na stĺpcovom grafe (Obr. 25) pre WSN-MANET-DRONET vidieť v rámci pozície 3 celkovo 3 zložky času. Zatiaľ čo v prípade pozícií 1 a 2 nebola DRONET sieť použitá v dôsledku priamej konktivity MANET siete s prístupovým bodom AP, pri pozícii 3 už LO siete DRONET využité boli. Na výsledku sa to prejavilo tak, že aj najvzdalenejší prístupový bod bol z hľadiska času dosiahnutý aj napriek použitiu troch vrstiev rýchlo. Pri pozícii 1 ide o takmer 70% skrátenie času potrebného na doručenie kritických dát, pričom pri pozícii 2 tento rozdiel narástol už na približne 79% a na tretej pozícii dokonca o 90%. Za skrátenie času pri pozícii 3 môže najvýraznejšie časová zložka DRONET siete vďaka najvyššej dátovej rýchlosti na linkách.



Obr. 25. Priemerný celkový čas doručenia 100 Kb dát z WSN zdrojového uzla k prístupovému bodu AP.

Druhý výsledok na Obr.26 zobrazuje priemerný počet sko-

kov na nájdených optimálnych smerovacích cestách zo zdrojového WSN uzla k prístupovému bodu AP. Tento výsledok dopĺňa výpovednú hodnotu prvého výsledku, nakoľko dosiahnuté časy závisia aj od počtu skokov. Pri pozícii 3 je možné vidieť, prečo bol časový príspevok MANET siete najvyšší. Ako bolo uvedené aj pri popise prvého výsledku, dôvodom je fakt, že väčšina prenosu dát bola vedená cez MANET sieť. Priemerne ide o takmer 6 preskokov v rámci MANET siete na pozícii 3, pričom pri pozíciách 1 a 2 šlo o 1, resp. 2 a v niektorých prípadoch 3 preskoky. V celkovom porovnaní s WSN sieťou je však stále počet skokov 40 až 45% nižší.



Obr. 26. Priemerný počet skokov od zdrojového WSN senzora k prístupovému bodu AP.

Tretí výsledok prezentovaný v tabuľkovom zobrazení uvádza priemerné dátové rýchlosti dosiahnuté na optimálnych smerovacích cestách pri prenose 100 Kb kritických dát spolu so štandardnými odchýlkami. V prípade WSN siete boli dosiahnuté dátové rýchlosti na úrovni približne 27-28 Kbps, pričom spojenie sietí WSN-MANET-DRONET sa pričínilo o priemernú dátovú rýchlosť na úrovni od 44 po 87 Mbps. Dôležitým faktorom tohto zvýšenia sú vyššie dátové rýchlosti MANET a DRONET sietí, čo spolu s časom doručenia kritických dát prináša veľkú výhodu oproti nasadeniu klasickej WSN siete v prípade narušenia pevnej infraštruktúry.

Poloha AP	Priemerná dátová rýchlosť pri prenose 100 Kb dát [Mbps]			
	WSN		WSN-MANET-DRONET	
	Priemer	Štandardná odchýlka	Priemer	Štandardná odchýlka
Pozícia 1	0,0278	0,0034	44,51	16,26
Pozícia 2	0,0274	0,0032	66,89	12,24
Pozícia 3	0,0279	0,0024	87,29	11,64

Obr. 27. Priemerná dátová rýchlosť na zdrojových cestách od WSN senzora k prístupovému bodu AP.

### B. Simulácie a výsledky adaptívneho smerovacieho protokolu

Simulácie ASP boli vykonané v prostredí Matlab a len pre MANET siete. Siete WSN a DRONET sa v simuláciách nevyskytujú. Pre simuláciu siete a pohybu uzlov bol použitý sociálny model pohybu SSBMM [32]. Cieľom simulácií bolo



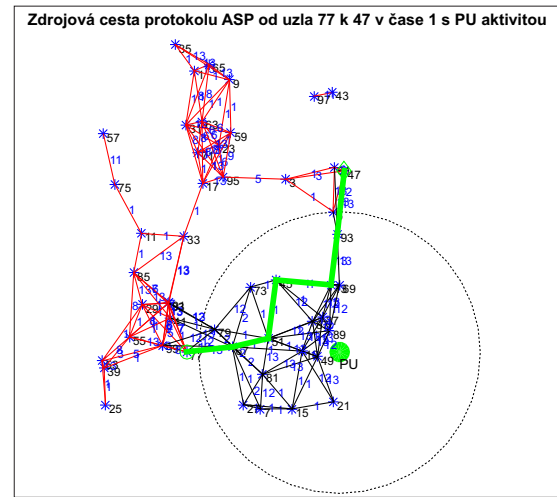
poukázat na funkcionalitu ASP vo viackanálovom prostredí, ktoré sa v dôsledku pohybu uzlov mení. Z tohto dôvodu budú simulované dva scenáre.

1) *Prvý simulačný scenár:* V prvom simulačnom scenári bude kladený dôraz na prvý časový úsek, pričom nebude uvažovaný žiaden pohyb. V počiatočnej fáze je v simulovanej topológii na jednotlivých linkách náhodne zvolený kanál. To súvisí s faktom, že dve zariadenia sa vo WiFi môžu spojiť na ľubovoľnom kanáli. Následne bolo toto náhodné rozdelenie kanálov vyhodnotené IMPS na každom uzle a bola vygenerovaná metrika pre hodnotenie kanála na každej linke. Na základe vyhodnotenia siete boli kanály inteligentne prerozdelené, prípadne zmenené po vzájomnej dohode medzi dvojicami uzlov, ktoré danú linku zdieľali. V tomto prostredí boli zvolení zdrojový a cieľový uzol, medzi ktorými sa hľadala najlepšia cesta. Pre porovnanie výberu najvýhodnejšej zdrojovej cesty s ASP bol vybratý upravený smerovací protokol DSR-CR. Pre tento smerovací protokol predpokladáme plnú funkcionalitu DSR protokolu pre klasické MANET siete, ktorý navyše obsahuje zjednodušenú implementáciu CR. Aj keď je schopný fungovať vo viackanálovom prostredí, všetky kanály vníma ako jeden jediný. Preto ak sa objaví PU aktivita, všetky linky v oblasti PU aktivity sú z pohľadu protokolu DSR-CR nevyužiteľné a to z dôvodu, aby sa predišlo interferencii s PU. Na rozdiel od ASP, ktorý hľadá optimálnu zdrojovú cestu na základe metriky vygenerovanej IMPS, DSR-CR vyhľadáva optimálnu zdrojovú cestu ako najkratšiu cestu medzi zdrojovým a cieľovým uzlom, pričom metriku je počet skokov. V tomto simulačnom scenári budú nájdené optimálne zdrojové cesty oboma protokolmi, pričom bude kladený dôraz na ich vyhodnotenie za pomoci výstupnej metriky z inteligentnej metódy pridelovania spektra (IMPS) v zmysle kvality QoS a prevádzky. Jednotlivé simulačné premenné sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke I. Taktiež bude uvedený príklad zmeny kanálov metódou IMPS protokolu ASP pred PU aktivitou a po PU aktivite.

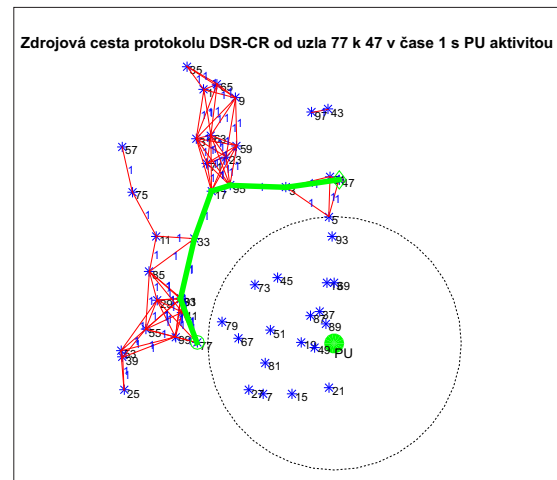
Tabuľka I  
PREMENNÉ PRVÉHO SIMULAČNÉHO SCENÁRA

Premenná	Hodnota
Veľkosť oblasti [m]	500x500
Počet uzlov SU	50
Rádiový dosah SU [m]	100
Polomer oblasti PU aktivity [m]	25,50,75,100,125,150, 175,200,225,250,275,300
Trvanie simulácie [časové úseky]	1
Počet dostupných kanálov	13
Primárny kanál v PU oblasti	7

V tejto simulácii uvažujeme prvý časový úsek pre sieť bez pohybu a s rôznou oblasťou aktivity PU. Taktiež uvažujeme 13 dostupných Wi-Fi kanálov, z ktorých je PU v oblasti aktivity aktívny na 7. kanáli. Príklad rozloženia uzlov v sieti s polomerom oblasti aktivity PU o veľkosti 200 m a vybrané optimálne cesty je možné vidieť v prípade ASP na Obr.28 a v prípade DSR-CR na Obr.29.



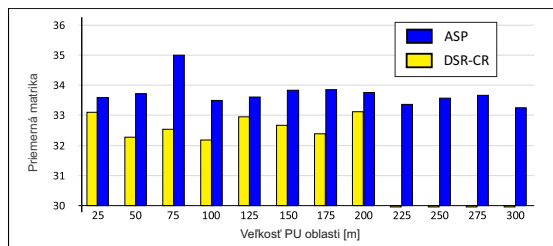
Obr. 28. Optimálna zdrojová cesta protokolu ASP od uzla 77 k uzlu 47 s PU aktivitou.



Obr. 29. Optimálna zdrojová cesta protokolu DSR-CR od uzla 77 k uzlu 47 s PU aktivitou.

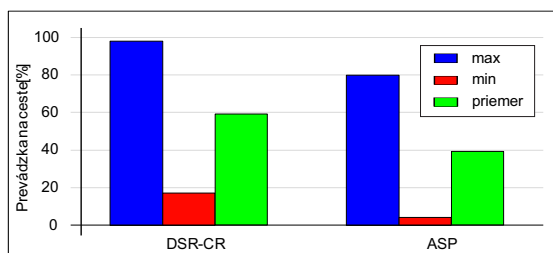
V prvom vyhodnotení (Obr.30) uvažujeme priemernú metriku na vybraných cestách protokolov ASP a DSR-CR. Za metriku použitú vo výsledku sa považuje výsledná metrika vygenerovaná metódou IMPS. V prípade protokolu ASP je zdrojová cesta vybraná na základe tejto metriky. V prípade DSR-CR je optimálna zdrojová cesta vybraná na základe minimálneho počtu skokov. Aby boli pre porovnanie k dispozícii výsledky metriky aj pre simuláciu protokolu DSR-CR, bola vybraná cesta vyhodnotená pomocou IMPS. Z výsledkov vyplýva, že protokol ASP pre všetky veľkosti PU oblasti aktivity dosiahol na vybraných optimálnych cestách lepšie hodnoty metriky. V prípade veľkosti PU oblasti s polomerom 225 až 300 neexistujú žiadne hodnoty, pretože oblasť aktivity PU bola taká veľká, že DSR-CR nenašiel žiadnu zdrojovú E2E cestu.

V druhom vyhodnotení bola uvažovaná existujúca prevádzka na vybraných optimálnych zdrojových cestách. Prevádzka bola v počiatočnej fáze vygenerovaná na každej



Obr. 30. Priemerná metrika optimálnych zdrojových ciest protokolov ASP a DSR-CR

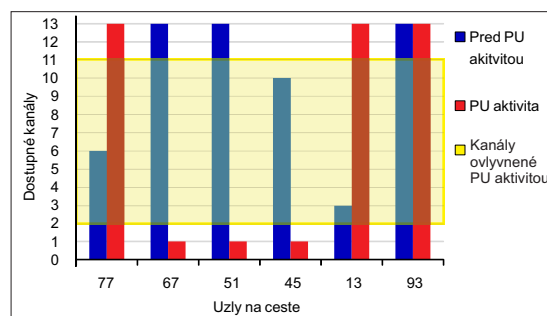
linke náhodne v rozsahu od 0 do 100%. Táto vygenerovaná prevádzka bola použitá pre všetky simulácie s rôznou veľkosťou oblasti PU aktivity. Na Obr.31 je možné vidieť porovnanie protokolov DSR-CR a ASP z hľadiska maximálnej, minimálnej a priemernej existujúcej prevádzky na vybraných optimálnych zdrojových cestách a veľkosťou oblasti PU aktivity 200 m. V prípade maximálnej prevádzky uvažujeme maximálnu hodnotu prevádzky na danom segmente cesty. V tomto prípade bola na určitom segmente optimálnej cesty protokolu DSR-CR maximálna existujúca prevádzka na úrovni 98%. To znamená, že daný komunikačný kanál bol obsadený existujúcou komunikáciou na 98% a pre prípadný prenos správy zostávali len 2% komunikačného kanála. V prípade protokolu ASP bola maximálna existujúca prevádzka na danom segmente zdrojovej cesty na úrovni 80%. Podobne v prípade minimálnej prevádzky na určitom segmente zdrojovej cesty bola optimálna zdrojová cesta protokolu ASP lepšia ako cesta protokolu DSR-CR. Protokol ASP vybral optimálnejšiu cestu ako protokol DSR-CR aj v prípade priemernej prevádzky na celej zdrojovej ceste. Z výsledkov vyplýva, že z hľadiska prevádzky vyberá optimálnejšie cesty protokol ASP.



Obr. 31. Existujúca prevádzka na vybraných zdrojových cestách protokolov ASP a DSR-CR

Posledné vyhodnotenie simulácií je zamerané na protokol ASP, kde bol kladený dôraz na prerozdelenie kanálov na vybranej optimálnej zdrojovej ceste. Na Obr.32 je možné vidieť kanály na zdrojovej ceste pred aktivitou PU a po aktivite PU. V prvej fáze bola vybraná optimálna zdrojová cesta pri aktivite PU. Následne boli vytiahnuté informácie o kanáloch na tejto optimálnej ceste pred PU aktivitou. Cieľom tohto porovnania je poukázať na fakt, že PU aktivita iniciuje zmenu kanálov v oblasti PU aktivity. Na Obr.32 je žltým rámom naznačená aktivita PU a všetky ovplyvnené kanály (3-11). Pred PU aktivitou sú na zdrojovej ceste kanály medzi uzlom

77-67,45-13 a 13-93 zvolené ako potencionálne ovplyvňujúce. Akonáhle dôjde k aktivite PU, všetky kanály sa v závislosti od tejto udalosti zmenia na základe vyhodnotenia situácie pomocou IMPS. Je teda možné vidieť, že všetky kanály sa zmenili na neinterferujúce s kanálom 7 (1,2,12,13).



Obr. 32. Rozdelenie kanálov v PU oblasti o veľkosti 200 metrov protokolu ASP

2) *Druhý simulačný scenár:* V druhom simulačnom scenári budeme uvažovať CRAHN sieť v pohybe po dobu 10 časových úsekov. Medzi vybraným zdrojovým a cieľovým uzlom budeme uvažovať posielanie správy o veľkosti 5 paketov pomocou protokolov ASP a DSR-CR. Pre túto simuláciu predpokladáme, že na poslanie jedného paketu je potrebný jeden časový úsek. V týchto simuláciách bude kladený dôraz na vyhodnotenie vybraných smerovacích protokolov z hľadiska trvania prenosu, priemerného počtu skokov vybraných optimálnych ciest zo všetkých časových úsekov a počtu prenesených paketov. Taktiež budú uvedené výsledky priemernej metriky v priebehu simulácií smerovacieho protokolu ASP. V tomto prípade pomocou IMPS v každom časovom úseku vyhodnotíme aktuálny stav siete na vybranej optimálnej ceste a porovnáme ho so stavom po inteligentnej úprave kanálov.

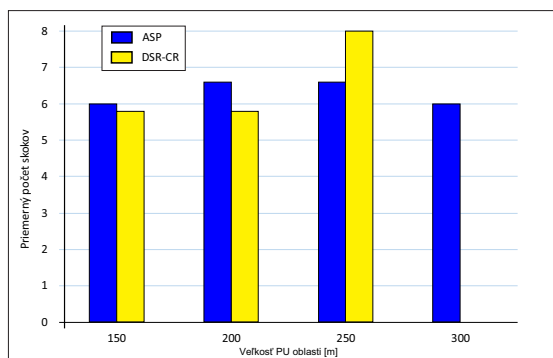
Druhý simulačný scenár zahŕňa pohyb uzlov v sieti. Simulovaný bol pohyb po dobu 10 časových úsekov. Medzi zvoleným zdrojovým a cieľovým uzlom bol simulovaný prenos správy pozostávajúcej z 5 paketov. Jednotlivé premenné simulácií je možné vidieť v Tab.II.

Tabuľka II  
PREMENNÉ DRUHÉHO SIMULAČNÉHO SCENÁRA

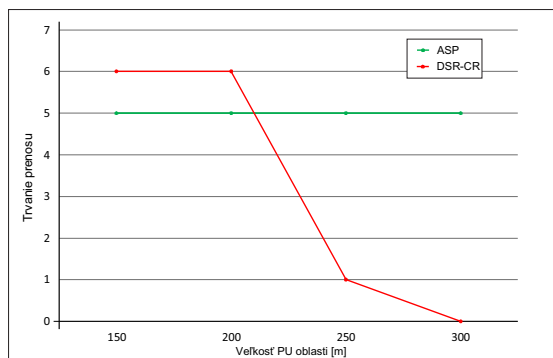
Premenná	Hodnota
Veľkosť oblasti [m]	500x500
Počet uzlov SU	50
Rádiový dosah SU [m]	100
Polomer oblasti PU aktivity [m]	150, 200, 250, 300
Trvanie simulácie [časové úseky]	10
Počet dostupných kanálov	13
Primárny kanál v PU oblasti	7
Veľkosť správy v paketoch	5

Prvý výsledok (Obr.33) zahŕňa priemerný počet skokov pri odoslaní paketov každej správy pre rôzne veľkosti polomeru oblasti PU aktivity. Aj keď protokol DSR-CR dosiahol menší priemerný počet skokov v prípade oblasti PU aktivity o

veľkosti 150 a 200 m, v prípade 250 m bol priemerný počet skokov v prospech protokolu ASP. Pre oblasť PU aktivity o veľkosti 300 m bol úspešný prenos len v prípade protokolu ASP. Keďže protokol DSR-CR nenašiel za 10 časových úsekov žiadnu cestu, prenos bol neúspešný. Čiarový graf zobrazený na Obr.34 zodpovedá času trvania prenosu. V tomto smere bol protokol ASP stále úspešnejší, keď dokázal preniesť správu za prvých 5 časových úsekov v každom prípade. Protokol DSR-CR preniesol pri oblasti aktivity PU o veľkosti 150 a 200 m správu za 6 časových úsekov. V prípade oblasti PU aktivity o veľkosti 250 m preniesol len jeden paket z celkovej správy v prvom časovom úseku. V poslednom prípade bol DSR-CR neúspešný počas celého trvania simulácie, pretože oblasť aktivity PU bola taká veľká, že nebol schopný nájsť žiadnu zdrojovú cestu.



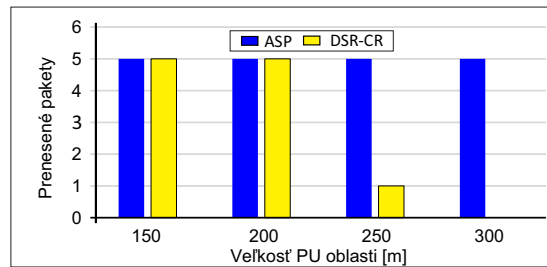
Obr. 33. Priemerný počet skokov a trvanie prenosu protokolov ASP a DSR-CR



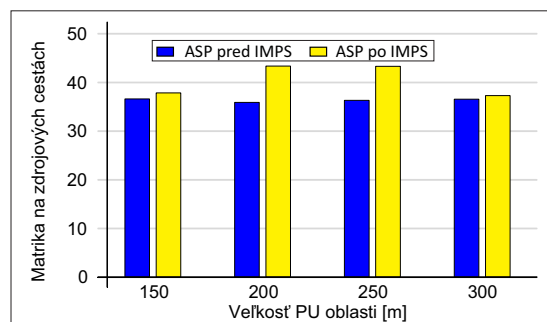
Obr. 34. Priemerný počet skokov a trvanie prenosu protokolov ASP a DSR-CR

tretí výsledok simulácií (Obr.35) nadväzuje na predchádzajúce a zobrazuje počet prenesených paketov. V tomto smere protokol ASP preniesol všetky pakety vo všetkých simuláciách. Protokol DSR-CR preniesol v prípade oblasti PU aktivity o veľkosti 250 m len jeden paket z celkovej správy a v poslednom prípade nepreniesol žiadny paket.

Štvrtý výsledok simulácií (Obr.36) je orientovaný na protokol ASP. V tomto teste sú zobrazené výsledky priemernej kvality QoS v priebehu simulácií smerovacieho protokolu ASP.



Obr. 35. Prenesené pakety simulácie protokolov ASP a DSR-CR



Obr. 36. Výsledky priemerných hodnôt metrick v priebehu simulácií smerovacieho protokolu ASP

V tomto prípade je pomocou IMPS v každom časovom úseku vyhodnotený stav vybranej zdrojovej cesty po inteligentnej úprave kanálov. Na tej istej ceste sú potom vyhodnotené priemerné hodnoty metriky pred inteligentnou úpravou kanálov. Z výsledkov vyplýva, že na zvolenej ceste sa priemerná metrika vplyvom zmeny kanálov pomocou IMPS zlepšila.

#### IV. ZÁVER

Na základe teoretického a simulačného rozboru Viacvrstvového sieťového modelu VSM je možné konštatovať, že model je vhodný pre použitie ako náhrada za nefungujúcu 5G a IoT sieť. Zatiaľ čo WSN sieť je schopná za pomoci senzorov zbierať údaje a odosielať ich do cloudových služieb, jej prenosová rýchlosť a dosah vie účinne rozšíriť MANET a DRONET sieť. Táto odolná hierarchická sieť môže byť preto nasadená do oblastí postihnutých katastrofickými scenármi vďaka samoorganizovateľným, autonómnym a bezdrôtovým komunikačným schopnostiam jednotlivých sietí, rovnako ako vďaka možnostiam ich rýchleho nasadenia a konfigurácie. Jednou zo zložiek VSM modelu, ktorá si žiada vyššiu pozornosť pri budúcom výskume je komunikácie bez rušenia a interferencie.

Túto nevýhodu môže vyriešiť Adaptívny smerovací protokol ASP, ktorý je schopný inteligentne prideliť kanály v MANET sieti a následne efektívne smerovať dáta bez interferencie a rušenia. Jedinou jeho nevýhodou je fakt, že nepodporuje IPv6 adresovanie, ktoré je pre VSM potrebné. V rámci budúceho výskumu je preto potrebné zamerať sa na tento problém.

## POĎAKOVANIE

Táto práca bola vykonaná čiastočne v rámci výskumných projektov Ministerstva školstva SR VEGA 1/0492/18, KEGA 046TUKE-4/2018 a APVV-17-0208.

## LITERATÚRA

- [1] S. Mukherjee and G. P. Biswas. *Networking for IoT and applications using existing communication technology*. Egyptian Informatics Journal, 19(2), 107-127.
- [2] J. Yick, et al. 2008. *Wireless sensor network survey*. Computer networks, 52(12), 2292-2330, 2008.
- [3] C. Gomez, et al. 2013. *Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology*. Sensors, 12(9), 11734-11753, 2012.
- [4] ISO/IEC 18000-7:2009. *Information Technology—Radio Frequency Identification for Item Management*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [5] IEEE STANDARD FOR LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORKS—Part 15.4, 2011. *Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. in IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), pp.1-314, 2011.
- [6] ZIGBEE, 2005. *ZigBee Specification*. ZigBee Alliance, San Ramon, CA, USA, 2005.
- [7] N. Kushalnagar, et al. 2005. *IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): overview, assumptions, problem statement, and goals*. (No. RFC 4919), 2007.
- [8] M. Bouaziz, et al. 2016. *A survey on mobility management protocols in Wireless Sensor Networks based on 6LoWPAN technology*. Computer Communications, 74, 3-15, 2016.
- [9] X. Wang, et al. 2012. *A mobility support scheme for 6LoWPAN*. Computer Communications, 35(3), 392-404, 2012.
- [10] L.B. Saad, et al. 2011. *Sinks mobility strategy in IPv6-based WSNs for network lifetime improvement*. In 2011 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (pp. 1-5). IEEE, 2011.
- [11] M. Gast, 2005. *802.11 wireless networks: the definitive guide*. O'Reilly Media, Inc., 2005.
- [12] M. Gast, 2012. *802.11 n: a survival guide*. O'Reilly Media, Inc., 2012.
- [13] Q. Liu, et al. 2012., *Implementation and Improvement of DSR in Ipv6*. Procedia Engineering, 29, 716-720, 2012.
- [14] S. Chada, et al. 2012., *A NOVEL APPROACH OF AODV FOR STABILITY AND ENERGY EFFICIENT ROUTING FOR MANET USING IPV6*. International Journal of Computer Technology and Applications, 3(3), 2012.
- [15] L. Lamont, et al. 2002., *An IPv6 and OLSR based architecture for integrating WLANs and MANETs to the Internet*. In The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (Vol. 2, pp. 816-820). IEEE, 2002.
- [16] J. Iqbal, et al. 2019. *Comparison of spectral efficiency techniques in device-to-device communication for 5G*. IEEE Access, 7, 57440-57449, 2019.
- [17] D. Hrabčák, Ľ. Doboš - 2018. *Adaptívny smerovací protokol s využitím Fuzzy logiky pre MANET siete*. In: Electrical Engineering and Informatics 9 : proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. - Košice : FEI TU, 2018 S. 202-207. - ISBN 978-80-553-2713-6
- [18] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, and K. R. Chowdhury (2009). *emphCRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks*. AD hoc networks, 7(5), 810-836.
- [19] C. E. Perkins and E.M. Royer, 1999. *Ad-Hoc on-Demand Distance Vector Routing*. In: Proc. Workshop Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA), 1999.
- [20] D. Hrabcak, M. Matis and L. Dobos, *The concept of adaptive routing in cognitive radio mobile ad-hoc network*. 2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Prague, 2018, pp. 1-6.
- [21] IEEE 802.16 WORKING GROUP. 2004. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Standard 802.16-2004, October 2004.
- [22] C. Eklund, et al. 2006. *WirelessMAN*. IEEE press, 2006.
- [23] M. Erdejl, et al. 2017. *Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management*. Computer Networks, 124, 72-86, 2017.
- [24] M. Gerla, et al. 1995., *Multicluster, mobile, multimedia radio network*. Wireless networks, 1(3), 255-265, 1995.
- [25] V. Loscri, et al. 2014., *Performance evaluation of novel distributed coverage techniques for swarms of flying robots*. In 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) (pp. 3278-3283). IEEE, 2014.
- [26] M. R. RASHEED, et al. 2010., *Performance of routing protocols in WiMAX networks*. International Journal of Engineering and Technology, 2(5), 412, 2010.
- [27] M. R. RASHEED, et al. 2011., *Performance analysis of routing protocol in WiMAX network*. In 2011 IEEE International Conference on System Engineering and Technology (pp. 153-157). IEEE, 2011.
- [28] M. S. AZAD, et al. 2008., *Performance evaluation of wireless routing protocols in mobile wimax environment*. In IAENG International Conference on Communication Systems and Applications, 2008.
- [29] S. PATHAK, et al. 2014., *Performance evaluation of routing protocols for sending healthcare data over WiMAX network*. In 2014 International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN) (pp. 269-274). IEEE, 2014.
- [30] Z.J. HAAS, M. R. PEARLMAN, and SAMAR P., 2002. *The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks*. 2002.
- [31] KO, Y. B., VAIDYA, N. H., 2000. *Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks*. Wireless networks 6.4 (2000): 307-321.
- [32] D. HRABČÁK, et al. 2017. *Students social based mobility model for MANET-DTN networks*. Mobile Information Systems, 2017, 2017.

# Spracovanie písma pre systémy podpory rozhodovania

Zuzana Hudáková

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

Liberios Vokorokos

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

Peter Drotár

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

**Abstract**—Táto práca sa venuje problematike systémov pre podporu klinického rozhodovania. Takéto systémy sú využívané nielen v medicíne, ale aj v psychológii a príbuzných odboroch ako podporné systémy rozhodovania. Musia spĺňať určité špecifické požiadavky, pričom spracovávajú osobné údaje o pacientovi a následne na základe týchto údajov môžu vyhodnotiť stav pacienta. V práci sa zameriavame na spracovanie a rozpoznávanie rukopisu pre systémy podpory rozhodovania s dôrazom na dysgrafiú. Súčasný pokrok v technológiách umožňuje analyzovať rukopis, ako aj samotné zložky rukopisu, ako napríklad pohyb pera po podložke a nad ňou, rýchlosť písania, tlak pera na podložke počas písania a iné. V práci sú stručne načrtnuté úlohy používané pri zaznamenávaní vzoriek rukopisu, metódy používané pre extrakciu jednotlivých príznakov z písma, ako aj samotné metódy pre klasifikáciu príznakov. Hlavným cieľom je nájsť relevantné parametre pre identifikáciu rukopisu, ako aj porovnať rôzne metódy učenia s učiteľom a nájsť klasifikátor s čo najvyššou mierou úspešnosti pri rozpoznávaní rukopisu a takisto navrhnúť model pre efektívnejšiu detekciu, diagnostiku a spracovanie narušeného rukopisu.

**Index Terms**—Dolovanie dát, dysgrafia, e-zdravie, extrakcia príznakov, klasifikácia, rukopis, systémy na podporu klinického rozhodovania

## I. ÚVOD

Systémy podpory rozhodovania (DSS) sú užitočné najmä vtedy, keď je potrebné kombinovať komplexné informácie z rôznych zdrojov a na základe týchto kombinovaných informácií prijímať rozhodnutia [1]. Sú to nástroje, ktoré v spolupráci s lekárom dokážu navrhnúť liečebné postupy pre jednotlivé ochorenia a tým zlepšujú zdravotnú starostlivosť.

Moderná doba je značne ovplyvnená technológiami, ale aj napriek tomu je písmo stále jedným zo základných komunikačných prostriedkov. Každý rukopis človeka je pritom iný a niečím výnimočný, líši sa v mnohých faktoroch ako veľkosť a tvar písmen, sklon písmen počas písania, čitateľnosť a iné. Preto pri pozorovaní písma je možné pozorovať isté črty charakteristické pre daného človeka, ktoré sa pravidelne opakujú. Existujú však aj také črty, ktoré sa vyskytujú iba ojedinele a sú identifikované ako určité vzory v rukopise. Tieto nám dávajú do pozornosti, že sa niečo deje a že sa písomný prejav danej osoby zmenil.

Pomocou písma teda vieme zistiť napríklad samotný zdravotný stav jednotlivca, pretože písmo je častokrát prvot-

ným znakom prichádzajúceho, najmä neurologického ochorenia.

Práca sa zameriava na špecifickú poruchu písania – dysgrafiú, pretože tá sa prejavuje už v predškolskom veku. Výsledkom je poskytnúť teoretický základ pre uskutočnenie výskumu v oblasti analýzy a spracovania písma, nájdenie relevantných parametrov pre detekciu dysgrafického rukopisu a optimálnych metód pre identifikáciu rukopisu. Cieľom je navrhnúť postup pre vytvorenie modelu diagnostického systému pre spracovanie, detekciu a vyhodnotenie vzoriek rukopisu.

## II. SÚČASNÝ STAV V OBLASTI ANALÝZY A DETEKČIE PÍSANÉHO PREJAVU

### A. Diagnostika neurologických porúch na základe písma

Mnoho vedeckých štúdií sa v súčasnosti zameriava na neurologické ochorenia a ich dopad na kvalitu života človeka, či už z hľadiska koordinácie pohybov, hovoreného prejavu alebo ručne písaného prejavu. Samotné písmo ovplyvňuje mnoho faktorov, od veku [2] a pohlavia [3][4] jednotlivca, cez jeho verbálnu inteligenciu (chápanie významu slov, rozlišovanie významu slov, atď.) až po motorickú inteligenciu (koordináciu pohybov) a najmä prítomnosť neurologického ochorenia. Najčastejšie neurologické ochorenia, ktoré majú prvotné prejavy v písme sú napríklad:

- Parkinsonova choroba,
- Alzheimerova choroba,
- Huntingtonova choroba,
- Lou Gehringova choroba.

Bolo dokázané, že práve analýzou písma a najmä zmenou v písme jedinca je možné diagnostikovať rôzne druhy neurologických porúch. Rozhodnutím bolo preto venovať sa analýze písma, jeho spracovaním a vyhodnotením, avšak so zameraním na dysgrafiú, nakoľko sa táto porucha prejavuje už v detstve. Neriešený problém môže pretrvať až do dospelosti a mať výrazný vplyv na kvalitu života jedinca.

### B. Špecifické vývinové poruchy učenia

Dysgrafia je špecifická porucha písania, ktorá postihuje grafomotorický systém. Zvyčajne sa prejavuje s inými poruchami, ako napríklad s dyslexiou alebo dysortografiou, pričom existuje viacero stupňov narušenia písma. Dysgrafia

sa začína prejavovať už v detstve, avšak nie je to zapríčinené nízkou úrovňou mentálnych schopností.

Dysgrafik má problém zvládnuť techniky písania, čo sa prejavuje neúhľadnosťou písma, jeho křčovitým tvarom so znakmi tremoru [5], rozdielnej výšky písmen a ich kolísajúcim sklonom a celkovou pomalosťou písania.

Na diagnostikovanie tejto poruchy neexistujú štandardizované skúšky písania.

Ďalšie špecifické vývinové poruchy učenia sú:

- dyslexia - porucha čítania,
- dysortografia - porucha pravopisu,
- dyskalkúlia - porucha počítania,
- dysartria - porucha artikulácie.

### C. Existujúce štúdie zaoberajúce sa písmom

Štúdia od Mekysku a kol. [6] sa zaoberala návrhom metódy pre automatickú diagnostiku dysgrafie, ako aj pre odhad úrovne poškodenia rukopisu. Účastníci štúdie pochádzali z Izraelu a používali hebrejský jazyk. Dataset vzoriek pozostával zo zdravých a dysgrafických vzoriek, pričom každá skupina pozostávala z 27 jedincov vo veku 8 a 9 rokov. Pre zaznamenávanie bol použitý tablet Wacom Intuos II a vzorka rukopisu je znázornená na obrázku 1. Na identifikáciu použili aj dotazník HPSQ [7]. Použitím klasifikátora náhodných lesov navrhli systém, ktorý dosiahol 96% citlivosť a špecifickosť.



Fig. 1. Vzor rukopisu [6]

Sihwi a kol. sa v štúdiu [8] snažia identifikovať a rozdeliť dysgrafiou do štyroch tried – normálna, ľahká, stredná a ťažká. Štúdia sa vykonávala v Indonézii a zúčastnilo sa jej 50 študentov, pričom získali 135 záznamov rukopisu. Úlohou študentov bolo napísať náhodné vety 3 až 7-krát vo vytvorenej aplikácii Android. Nevýhodou bolo, že testovanie sa uskutočňovalo na obrazovku smartfónu, čo môže skresľovať výsledky a taktiež niektorí študenti neboli zvyknutí písať na obrazovku. Pre klasifikáciu použili metódu podporných vektorov (SVM) a testovanie dát sa uskutočnilo na jadrách SVM – lineárnom, polynómovom a jadre s funkciou radiálnej bázy (RBF). Najlepšie výsledky dosiahol jadro RBF – 82,51%.

Zvončák a kol. sa v štúdiu [9] zaoberajú vývojovou dysgrafiou a ich cieľom je preskúmať potenciál *online handwritingu* a jeho novo navrhnutých parametrov rukopisu založených na laditeľnej vlnovej transformácii Q-faktora (TQWT). Na štúdiu sa zúčastnilo 65 detí 3. a 4. ročníka základnej školy a boli hodnotené dotazníkom HPSQ-C [7]. Hodnotili rozlišovacie schopnosti všetkých parametrov pomocou metód náhodných lesov (RF) a podporných vektorov (SVM) v kombinácii s výberom príznakov pomocou SFFS. Kombináciou základných parametrov a príznakov TQWT dosiahli presnosť

SVM 85%, čo je približne o 20% viac v porovnaní so základnými parametrami rukopisu uvedenými v [9].

### III. TECHNIKY DOLOVANIA DÁT

Dolovanie dát rieši problém rozpoznávania vzorov v dátach automatickým zisťovaním údajov pomocou algoritmov, pričom sa vykonávajú kroky ako klasifikácia údajov do rôznych kategórií. Dolovanie dát pozostáva z piatich krokov:

- výber dát,
- predspracovanie dát,
- transformácia dát,
- klasifikácia dát,
- interpretácia dát.

V nasledujúcich podkapitolách sú stručne popísané prístupy, ktoré sme využívali pri procese dolovania dát pre identifikáciu vzorov v dátach, s cieľom vyhodnotiť jednotlivé príznaky a vybrať tie, ktoré sú relevantné pre hodnotenie dysgrafie.

#### A. Metódy štatistickej analýzy

Zatiaľ čo strojové učenie kladie väčší dôraz na rozsiahle aplikácie a presnosť predikcie, štatistické učenie kladie dôraz na modely a ich interpretovateľnosť, presnosť a neurčitosť. Štatistické metódy spoločne s algoritmi strojového učenia pomáhajú predpokladať možné výsledky na základe rôznych údajov.

Pre tento účel sme vybrali metódu *Mann-Whitneyho U testu*. Táto metóda je neparametrickým testom nulovej hypotézy, ktorý používame na zistenie dvoch nezávislých vzoriek, nad ktorými sledujeme štatistický znak. Výsledkom je štatistika  $U$ . Hypotézu  $H_0 : U_1 = U_2$  testujeme proti jednej z možných alternatívnych hypotéz nasledovne:

$$\begin{aligned} H_1 : U_1 &\neq U_2, \\ H_1 : U_1 &> U_2, \\ H_1 : U_1 &< U_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Hypotéza  $H_0$  predstavuje rovnosť skúmaných množín, a teda, že sa medzi údajmi nenachádzajú žiadne rozdiely. Alternatívne hypotézy sú protikladom hypotézy  $H_0$ .

Ostatné metódy štatistickej analýzy sú:

- Bonferonniho korekcia,
- Pearsonov korelačný koeficient,
- Spearmanov korelačný koeficient.

#### B. Metódy strojového učenia

Mnoho metód pre dolovanie znalostí sa vyznačuje jednoduchými algoritmi učenia. Najčastejším a takisto nami využívaným typom strojového učenia je *učenie s učiteľom*. Princíp klasifikátora je učenie sa z natrénovaných, cvičných dát. Cieľom je vytvoriť taký klasifikátor, ktorý bude správne priradovať dáta do určitých tried a teda obsahovať správne natrénovanú sadu klasifikovaných tréningových dát. Najpoužívanejšie metódy pre dolovanie znalostí sú stručne rozpísané nižšie.

Metóda podporných vektorov sa zaraďuje do tzv. kernel-based alebo kernel machines kategórie. Výhodou SVM je, že využíva systematický prístup a môže byť jednoducho a priamo aplikovaná na rôzne druhy problémových oblastí. SVM využíva učiace sa techniky na báze učenia z natrénovaných cvičných dát a využíva sa najmä na predikciu a klasifikáciu dát. Samotný princíp metódy SVM je, že hľadá akúsi optimálnu nadrovinu alebo hyperrovinu, ktorá rozdelí uje v priestore dve triedy cvičných dát. To je znázornené na obrázku 2. Ďalší princíp metódy je transformácia dát do viacrozmerného priestoru.

SVM metódy zahŕňajú veľké množstvo algoritmov a v závislosti od spracovania dát ich môžeme rozdeliť na lineárne a nelineárne SVM.

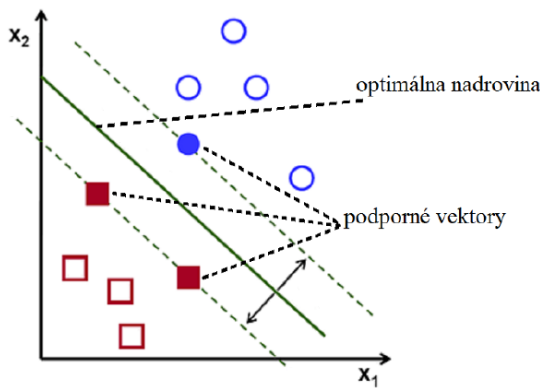


Fig. 2. Princíp klasifikácie SVM

Metóda rozhodovacích stromov je jednou z najpoužívanejších techník na získavanie dát. Je využívaná vďaka svojej zrozumiteľnosti a prehľadnosti, pričom dokáže jednoducho vyhodnotiť získané údaje. Kvalita stromu však môže byť chápaná rôzne, avšak boli zadané základné parametre pre kvalitu rozhodovacieho stromu [10].

Metóda náhodných lesov je založená na rozhodovacích stromoch. Je to učiac sa metóda pre klasifikáciu a regresiu. Pri konštrukcii rozhodovacích stromov sa využíva náhodný počet príznakov z celkovej dátovej sady, čo zvyšuje presnosť samotnej klasifikácie a znižuje citlivosť na šum v dátach a minimalizuje koreláciu medzi jednotlivými príznakmi [11]. Ďalšou výhodou je, že sú navzájom od seba nezávislé a tým môžu byť vytvárané paralelne. Princíp náhodných lesov je zobrazený na obrázku 3.

Existuje niekoľko rôznych metrík, ktoré algoritmus používa pre vyhodnotenie navrhovaného rozdelenia stromu a sú nimi entropia, informačný zisk a nečistota Gini.

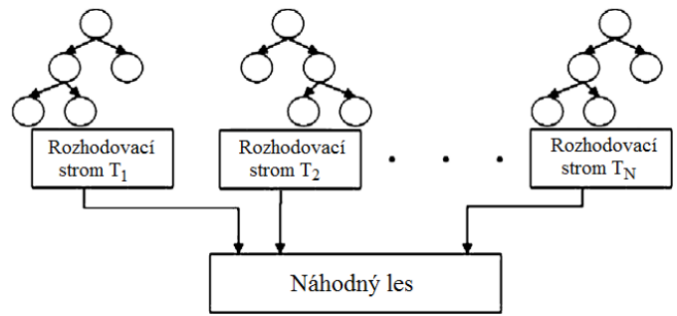


Fig. 3. Princíp náhodných lesov

Metódy hlbokého učenia patria do kategórie neurónových sietí. Tie sú zostavené na princípe biologických nervových systémov. Sú zložené z viacerých vrstiev obsahujúcich rôzny počet neurónov, ktoré sú medzi sebou poprepájané.

Samotné metódy hlbokého učenia dokážu hierarchicky extrahovať príznaky z jednotlivých dát. Typický model pre hlboké neurónové siete sú napríklad hlboké vierohodnostné siete (DBN), pričom sú to niekoľko vrstevných sietí, ktorých posledné vrstvy tvoria Boltzmanovské nástroje (RBM) a ďalšie vrstvy sú tvorené Bayesovou sieťou (BN), kde pravdepodobnosť konfigurácie parametrov jednej vrstvy závisia do stavu predchádzajúcej vrstvy.

Výhodou DBN je, že sa jedná o taký algoritmus, ktorý za pomerne krátky čas dokáže nájsť optimálne príznaky.

C. Krížová validácia

Často sa využíva na odhad úspešnosti modelov strojového učenia pomocou validácie, teda o určovaní úspešnosti algoritmu. Najčastejšie sa používa 10-násobná krížová validácia na odhad kvality klasifikátorov.

Princíp overenia na obrázku 4 spočíva v rozdelení množiny údajov na k rovnakých podmnožín tak, že jedna podmnožina funguje ako testovacia množina a ostatné podmnožiny slúžia ako tréningové množiny. Klasifikátor následne natrénuje model na k-tréningových množinách dát a pomocou testovacej množiny testuje presnosť daného modelu. Výsledkom k-násobného priebehu krížovej validácie je priemer všetkých výsledkov presnosti modelu, ktorý určuje jeho presnosť.

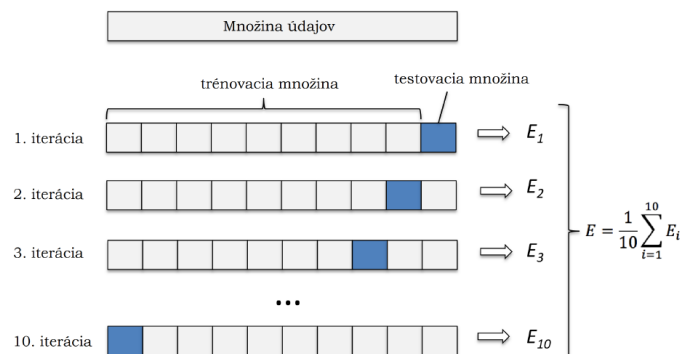


Fig. 4. Schéma krížovej validácie

## IV. AKVIZÍCIA DÁT

Zaznamenávanie písomného prejavu pre dosiahnutie čo najlepších výsledkov by mal pripomínať prirodzené písanie perom na papier. Využívali sme preto grafický tablet Wacom Intuos Pro Large, ktorý slúži ako podložka na písanie. Samotná písacia plocha tabletu je v rozmeroch 31.1cm x 21.6cm a poskytuje rozlíšenie 5080 LPI. Na tablete je položený papier, respektíve vytvorená šablóna pre písanie vo veľkosti A4. Samotné písanie teda naozaj pripomína prirodzené písanie, navyše pomocou grafického pera, ktorý na papier zanecháva stopu a tým pripomína písanie s obyčajným guľôčkovým perom.

Výhodou použitia grafických tabletov je ich vysoká presnosť a jednoduchosť prenositeľnosti údajov. Po zaznamenaní všetkých údajov grafickým tabletom a perom sa vytvorí v počítači súbor .svc, v ktorom sú uložené údaje, ktoré znázorňujú:

- aktuálnu polohu stylusu vzhľadom na os x a y,
- celkový čas písania,
- dotyk stylusu v závislosti k ploche tabletu,
- uhol naklonenia pera (azimut) vzhľadom na os x,
- vertikálnu pozíciu stylusu (eleváciu),
- tlak stylusu na plochu tabletu.

Pre spracovanie dát a vykreslenie vzoriek rukopisu sme používali programovací jazyk Python. Vytvorili sme kód, pomocou ktorého sme vykreslili zozbierané vzorky rukopisu pre porovnanie vzoriek, vypočítali jednotlivé parametre rukopisu a takisto štatistické údaje pre jednotlivé parametre. Obrázok 5 znázorňuje vyplnenú šablónu, pričom sa jedná o nami vytvorenú šablónu pre zber vzoriek písma na základe predošlého výskumu.

## A. Dataset

Vzorky dát sme zaznamenávali približne 18 mesiacov a podarilo sa nám zozbierať 192 vzoriek rukopisu. Bohužiaľ nie všetky vzorky boli použiteľné a niektoré museli byť z datasetu vyradené, pričom nám ostalo 130 použiteľných vzoriek. Zdravé vzorky boli získané zo základnej školy na sídlisku KVP v Košiciach a dysgrafické vzorky z Centra špeciálno-pedagogického poradenstva v Košiciach a Gelnici. Testovania sa zúčastnili subjekty vo veku 8 až 19 rokov. Všetci testovaní, respektíve ich zákonní zástupcovia podpísali informovaný súhlas s testovaním a so spracovaním získaných údajov pre účely výskumu so zameraním na sledovanie aspektov písma.

Tabuľka I znázorňuje výsledné počty daných vzoriek z hľadiska veku, pohlavia, dominantnej ruky a rozdelenia vzoriek na zdravé a dysgrafické vzorky.

## B. Analýza rukopisu

Diagnostika písma pomocou grafického tabletu prebiehala formou sérií písomných cvičení, kedy je pacientovi predložená šablóna pre písomné cvičenia, ktorá má otestovať jeho grafomotorické zručnosti.

Pri písaní je nutné vykonávať účelné pohyby, ktoré sú založené na koordinácii oka a ruky a taktiež aj na interakcii medzi

prstami, zápästím a predlaktím. Deti s dysgrafiou majú navyše tendenciu k nesprávnej polohe počas písania, čo sa následne odzrkadlí aj na nesprávnom držaní ceruzky alebo pera počas písania. Správna poloha pri písaní rukou je znázornená na obrázku 6.

Samotné nami vytvorené cvičenie pozostáva zo štyroch cvičení, pričom prvé cvičenie je zamerané na písanie kratších písomných úsekov a na písanie určitého počtu jednoduchých vzorov. Ide o písanie písmena "l", pričom úloha obsahuje dva riadky. V prvom riadku vypisuje subjekt písmeno pri normálnej rýchlosti písania a v druhom riadku pri maximálnej možnej rýchlosti ale tak, aby sa zachovala čitateľnosť textu. Podľa existujúcich štúdií [6][12][13] sa dokázalo, že použitie písmena obsahujúceho slučku môže odzrkadľovať ťažkosti v motorike písania. Druhé cvičenie sa zameriava na písanie slabiky "le", pričom tak ako v prvom prípade, aj táto časť úlohy obsahuje dva riadky – normálnou rýchlosťou a maximálnou možnou rýchlosťou, s cieľom zachovať čitateľnosť. Tretia časť cvičenia sa zameriava na opísanie jednoduchých slov obsahujúcich slučku ako slovo "leto", "lamoken" či "hračkárstvo". Posledná časť cvičenia obsahuje opakovanie krátkej vety "V lete bude teplo a sucho". Keďže tieto cvičenia pozostávajú z rôznych ťahov, pri dlhších písomných úsekoch dokážeme pozorovať dynamiku písania, ale aj samotný pohyb ruky nad a po ploche tabletu.

Pre dosiahnutie presnejších výsledkov sme sa rozhodli šablónu nasegmentovať. Na to sme využili knižnicu *data\_manipulator* a následne pre vykreslenie segmentu knižnicu *visualisation*. Z pôvodných 130 vzoriek rukopisu sme získali až 1040 vzoriek a to tak, že sme z každej vzorky segmentovali jednotlivé riadky šablóny zvlášť.

## C. Výpočet parametrov písma

Všetky parametre rukopisu sme počítali prostredníctvom programovacieho jazyka Python nad nasegmentovanými šablónami. Zamerali sme sa na výpočet kinematických parametrov ako sú čas, rýchlosť, zrýchlenie a šmyk. Z hľadiska dynamických parametrov sme sa zamerali na výpočet tlaku. Čo sa týka priestorovo-časových parametrov, zamerali sme sa na výpočet dĺžky ťahu, a pohybu po podložke a vo vzduchu, v závislosti do času. Pre každý parameter sme zvlášť počítali jeho minimálnu, maximálnu, priemernú hodnotu a medián, t.j. strednú hodnotu. Parametre sme počítali zvlášť pre zdravé, ako aj dysgrafické vzorky a všetky získané hodnoty boli spriemerované. Jednotlivé výsledky pre dané parametre sú zobrazené nižšie.

*Kinematické parametre*

Parameter *rýchlosti* udáva prvú deriváciu dĺžky dráhy podľa času. Horizontálna rýchlosť predstavuje zmenu polohy na súradnici x a vertikálna rýchlosť zmenu polohy na súradnici y, za jednotku času. Porovnanie výsledkov sú znázornené v tabuľke II, pričom rozdiel hodnôt medzi zdravými a dysgrafickými subjektmi je farebne vyznačený.

Parameter *zrýchlenia* udáva prvú deriváciu rýchlosti počas času, respektíve druhú deriváciu dráhy podľa času. Rozdiel



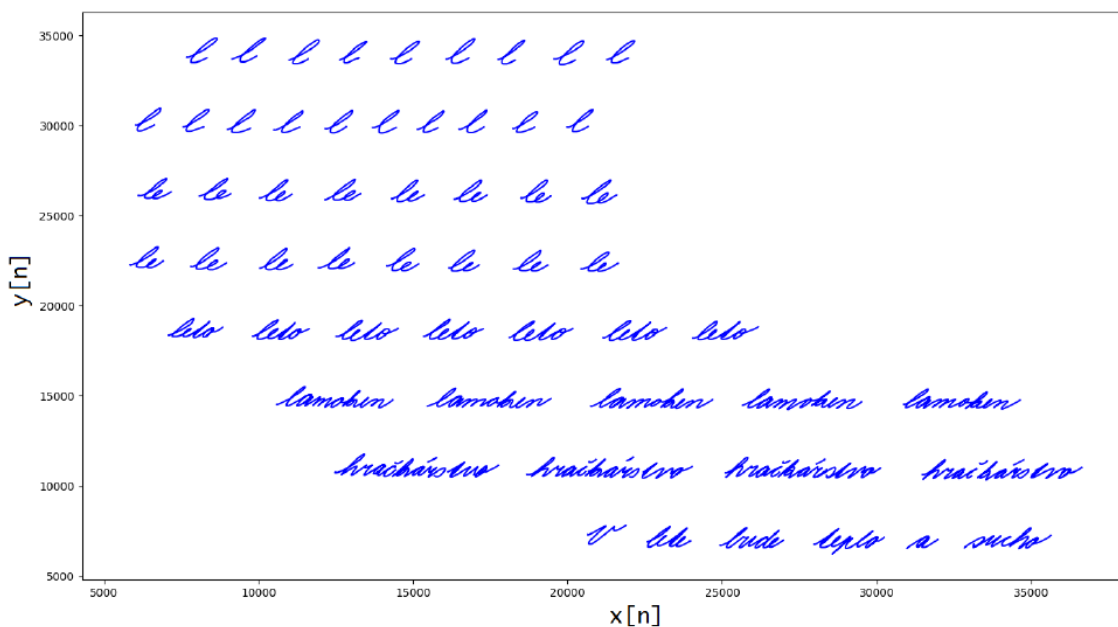


Fig. 5. Zobrazenie homogénnej vzorky rukopisu zaznamenatej grafickým tabletom Wacom

Vek	počet	Pohlavie		Dominantná ruka		Vzorky	
		muž	žena	pravá	ľavá	dysgrafické	zdravé
8	10	7	2	8	1	3	5
9	10	7	3	10	0	5	5
10	14	9	5	13	1	7	7
11	13	9	4	8	5	6	7
12	22	15	7	19	3	6	16
13	18	12	6	14	4	10	8
14	17	10	7	16	1	9	8
15	20	14	6	18	2	13	7
16	2	0	2	2	0	2	0
17	3	2	1	2	1	3	0
18	1	1	0	1	0	1	0
19	1	1	0	1	0	1	0
<b>Súčet</b>	<b>130</b>	<b>87</b>	<b>43</b>	<b>112</b>	<b>18</b>	<b>66</b>	<b>64</b>

TABLE I  
SKUPINY VZORIEK

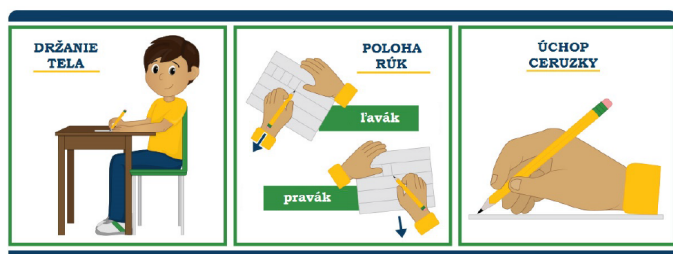


Fig. 6. Správna poloha pri písaní rukou

ako často dochádza k samotnej zmene rýchlosti počas písania. Porovnanie výsledkov sú znázornené v tabuľke III, pričom rozdiel hodnôt medzi zdravými a dysgrafickými subjektmi je farebne vyznačený.

Parameter šmyku udáva deriváciu zrýchlenia za jednotku času, respektíve prvú deriváciu rýchlosti počas času, respektíve druhú deriváciu dráhy podľa času. Porovnanie výsledkov sú znázornené v tabuľke IV, pričom rozdiel hodnôt medzi zdravými a dysgrafickými subjektmi je farebne vyznačený.

*Dynamické parametre*

Parameter tlaku udáva, ako silno tlačí jedinec perom počas písania po ploche tabletu. Samotný výpočet tohto parametru

Parameter [cm/s]	Vzorka	minimum	maximum	priemer	medián
celková rýchlosť	zdravá	0,073105	18,05902	3,677098	3,173861
	dysgrafická	0,071055	26,0041	4,053405	3,420506
horizontálna rýchlosť ( $v_x$ )	zdravá	0,03819	12,13045	1,812822	1,47075
	dysgrafická	0,03428	19,21196	2,046639	1,586444
vertikálna rýchlosť ( $v_y$ )	zdravá	0,020979	15,90855	2,820871	2,328236
	dysgrafická	0,020589	19,23929	3,105191	2,473814

TABLE II  
POROVNANIE VÝSLEDKOV RÝCHLOSTI PÍSANIA

Parameter [cm/s <sup>2</sup> ]	Vzorka	minimum	maximum	priemer	medián
celkové zrýchlenie	zdravá	0,196055	3862,192	739,3315	632,3587
	dysgrafická	0,137026	5576,135	815,58	681,9536
horizontálne zrýchlenie ( $a_x$ )	zdravá	0,097706	2526,833	363,7641	290,4568
	dysgrafická	0,075732	4073,945	411,2668	314,7706
vertikálne zrýchlenie ( $a_y$ )	zdravá	0,035827	3414,539	567,9721	463,224
	dysgrafická	0,027075	4126,149	625,3956	491,8648

TABLE III  
POROVNANIE VÝSLEDKOV ZRÝCHLENIA PRI PÍSANÍ

Parameter [cm/s <sup>3</sup> ]	Vzorka	minimum	maximum	priemer	medián
celkový šmyk	zdravá	0,125929	829267,8	149817,9	125888,4
	dysgrafická	0,071202	1197276	165275,5	135693,9
horizontálny šmyk ( $j_x$ )	zdravá	0,08419	540197,6	73711,83	57675,11
	dysgrafická	0,053679	874734,2	83341,5	62702,79
vertikálny šmyk ( $j_y$ )	zdravá	0,040697	733150,3	115095	91524,04
	dysgrafická	0,021298	885943,2	126735,7	97835,44

TABLE IV  
POROVNANIE VÝSLEDKOV ŠMYKU POČAS PÍSANIA

nebol nutný, nakoľko ho tablet dokáže priamo zaznamenať. Porovnanie výsledkov vzoriek sú znázornené v tabuľke V, pričom medzi zdravými a dysgrafickými subjektmi nie je žiadny viditeľný rozdiel počas písania.

#### Priestorovo-časové parametre

Parameter dĺžky  $t'ahu$  sme vypočítali podľa Pytagorovej vety a horizontálnu a vertikálnu dĺžku môžeme popísať ako dĺžka rovnajúca sa súčtu absolútnych hodnôt rozdielov dvoch po sebe nasledujúcich súradníc. Porovnanie výsledkov sú znázornené v tabuľke VI, pričom medzi zdravými a dysgrafickými subjektmi sme nezaznamenali takmer žiadny viditeľný rozdiel.

Parameter času aj keď patrí medzi kinematické parametre sme pre lepšie porovnanie zahrnuli k časovým parametrom pre pohyb po podložke a pohyb nad podložkou. Celkový čas je doba, za ktorú subjekt vyplní celú šablónu. Porovnanie výsled-

kov sú znázornené v tabuľke VII, pričom rozdiel hodnôt medzi zdravými a dysgrafickými subjektmi je farebne vyznačený.

#### D. Štatistické porovnanie

Ako už bolo spomenuté, pre štatistické testovanie sme zvolili metódu Mann-Whitneyho U testu. Definícia hypotéz znie nasledujúco:

$H_0$ : Zdravá vzorka rukopisu sa štatisticky neodlišuje od dysgrafickej vzorky rukopisu.

$H_1$ : Zdravá vzorka rukopisu sa štatisticky odlišuje od dysgrafickej vzorky rukopisu.

V prvom kroku sme si museli zvoliť hladinu významnosti – p. Tá predstavuje určité riziko, kedy určíme za pravdivú hypotézu tú, ktorá nie je pravdivá a teda označíme nepravdivú

Parameter	Vzorka	minimum	maximum	priemer	medián
tlak	zdravá	2,725806	748,7258	314,1859	312,621
	dysgrafická	1,882353	744,7353	325,1934	325,8088

TABLE V  
POROVNANIE VÝSLEDKOV TLAKU POČAS PÍSANIA

Parameter	Vzorka	minimum	maximum	priemer	medián
celková dĺžka	zdravá	0,110453	2,709921	0,819092	0,659733
	dysgrafická	0,126632	3,310262	1,002093	0,808525
horizontálna dĺžka	zdravá	0,074137	2,69421	0,784103	0,618601
	dysgrafická	0,086478	3,288713	0,853299	0,759191
vertikálna dĺžka	zdravá	0,011524	0,488879	0,170002	0,159522
	dysgrafická	0,012478	0,659897	0,222147	0,20479

TABLE VI  
POROVNANIE VÝSLEDKOV DĹŽKY ŤAHU

Parameter	Vzorka	
celkový čas	zdravá	78,22258
	dysgrafická	101,0525
čas písania po podložke	zdravá	50,90645
	dysgrafická	64,52015
čas písania nad položkou	zdravá	27,31726
	dysgrafická	36,53221

TABLE VII  
POROVNANIE VÝSLEDKOV ČASOVÝCH CHARAKTERISTÍK

hypotézu za pravdivú. Hladinu významnosti sme si štandardne určili na hodnote 0.05, t.j. existuje 5% riziko, že sa pri vyhodnotení hypotéz pomýlime. Výsledky výpočtov pre jednotlivé parametre sú zobrazené v tabuľke VIII, IX, X a XI, pričom zvýraznené sú len tie hladiny významnosti, ktoré potvrdzujú hypotézu  $H_1$ .

#### E. Vyhodnotenie vzoriek rukopisu

Dataset vzoriek obsahoval 55 parametrov. Pomocou metódy rozhodovacích stromov sme sa rozhodli dataset vizualizovať. Na to sme využili bezplatnú knižnicu softvérových nástrojov *scikit-learn* [14] pre programovací jazyk Python, ktorá obsahuje rôzne algoritmy potrebné pre klasifikáciu, regresiu a hlbokú analýzu údajov.

Dataset sme rozdelili na tréningové a testovacie údaje pomocou *train\_test\_split* a definovali sme veľkosť tréningovej a testovacej sady. Pre klasifikáciu tried sme použili klasifikátor *DecisionTreeClassifier* a nad tréningovou podmnožinou údajov sme vykonali natréningovanie pomocou funkcie *fit* z knižnice *scikit*.

Na samotnú vizualizáciu rozhodovacieho stromu sme použili

knižnicu *graphviz* a z nej sme použili konkrétne funkciu *export\_graphviz* pre exportovanie stromu do formátu dot a funkciu *render*, ktorá z formátu dot vygenerovaný rozhodovací strom uloží do súboru .pdf.

Keďže strom so všetkými parametrami by bol príliš rozsiahly, rozhodli sme sa pomocou výsledkov výpočtov parametrov písma a štatistickej analýzy zamerať iba na tie parametre, ktoré sú ukazovateľmi rozdielnosti v písomnom prejave. Napriek tomu, že dataset obsahoval už len 25 parametrov, stále bol pomerne neprehľadný. Rozhodli sme sa preto ako dodatočný parameter zvoliť maximálny počet uzlov v strome *max\_leaf\_nodes* a výsledný strom je zobrazený na obrázku 7. Môžeme povedať, že ako najdominantnejší parameter bol určený parameter maximálnej rýchlosti v(MAX) a teda, že rýchlosť písania je kľúčová a najvyššou mierou prispieva k rozpoznávaniu rukopisu. S tým samozrejme úzko súvisí aj čas písania, pretože čím vyššia rýchlosť, tým je nižší čas písania.

Parameter	Hladina významnosti $p < 0.05$			
	minimum	maximum	priemer	medián
celková rýchlosť	0.827136	0.000028	0.130707	0.340464
horizontálna rýchlosť ( $v_x$ )	0.195244	0.001032	0.084174	0.473920
vertikálna rýchlosť ( $v_y$ )	0.679944	0.000464	0.167493	0.572573
celkové zrýchlenie	0.026966	0.000027	0.122564	0.334598
horizontálne zrýchlenie ( $a_x$ )	0.101817	0.000661	0.078437	0.471026
vertikálne zrýchlenie ( $a_y$ )	0.113745	0.000444	0.164634	0.552185
celkový šmyk	0.003824	0.000027	0.124849	0.342834
horizontálny šmyk ( $j_x$ )	0.006624	0.000468	0.078437	0.446967
vertikálny šmyk ( $j_y$ )	0.002985	0.000444	0.161810	0.494562

TABLE VIII  
VÝSLEDKY ŠTATISTICKÉHO TESTOVANIA PRE KINEMATICKÉ PARAMETRE

Parameter	Hladina významnosti $p < 0.05$			
	minimum	maximum	priemer	medián
tlak	0.180531	0.801142	0.796547	0.721392

TABLE IX  
VÝSLEDKY ŠTATISTICKÉHO TESTOVANIA PRE DYNAMICKÉ PARAMETRE

Parameter	Hladina významnosti $p < 0.05$			
	minimum	maximum	priemer	medián
celková dĺžka	0.607649	0.013596	0.005565	0.003087
horizontálna dĺžka	0.903534	0.013961	0.011117	0.006216
vertikálna dĺžka	0.191619	0.000021	0.000288	0.002523

TABLE X  
VÝSLEDKY ŠTATISTICKÉHO TESTOVANIA PRE PRIESTOROVÉ PARAMETRE

Parameter	Hladina významnosti $p < 0.05$
celkový čas	0.001498
čas písania po podložke	0.001707
čas pohybu nad položkou	0.002195

TABLE XI  
VÝSLEDKY ŠTATISTICKÉHO TESTOVANIA PRE ČASOVÉ PARAMETRE

## F. Klasifikácia údajov

Pre klasifikáciu údajov sme zvolili najčastejšie používané klasifikátory:

- adaptívne posilňovanie (AdaBoost),
- metóda k–najbližších susedov (KNN),
- klasifikátor podporných vektorov (SVC) a lineárny SVC,
- rozhodovacie stromy (DT),
- náhodné lesy (RF),
- klasifikácia Gaussovského procesu (GPC) a Gaussovský Naivný Bayes (GaussianNB).

Klasifikáciu údajov sme vykonávali pre každý riadok navrhutej šablóny samostatne. Úspešnosť klasifikátora sme navyše vyhodnocovali súčasne aj pre 1. a 2. riadok, pre 3. a 4. riadok a pre 5. až 7. riadok. Takisto sme vykonali klasifikáciu aj nad celou šablónou, kedy sme zohľadnili všetky riadky. Opäť sme využívali knižnicu *scikit* pre každý spomenutý klasifikátor a pre výpočet použili sme použili 10–násobnú krížovú validáciu. Pri klasifikácii sme sa zameriavali na presnosť daného klasifikátora, jeho citlivosť a špecifickosť. Navyše sme pre nevyváženú dátovú sadu vypočítali aj krivku ROC.

Pre každý klasifikátor sme najprv nastavili štandardný rozsah

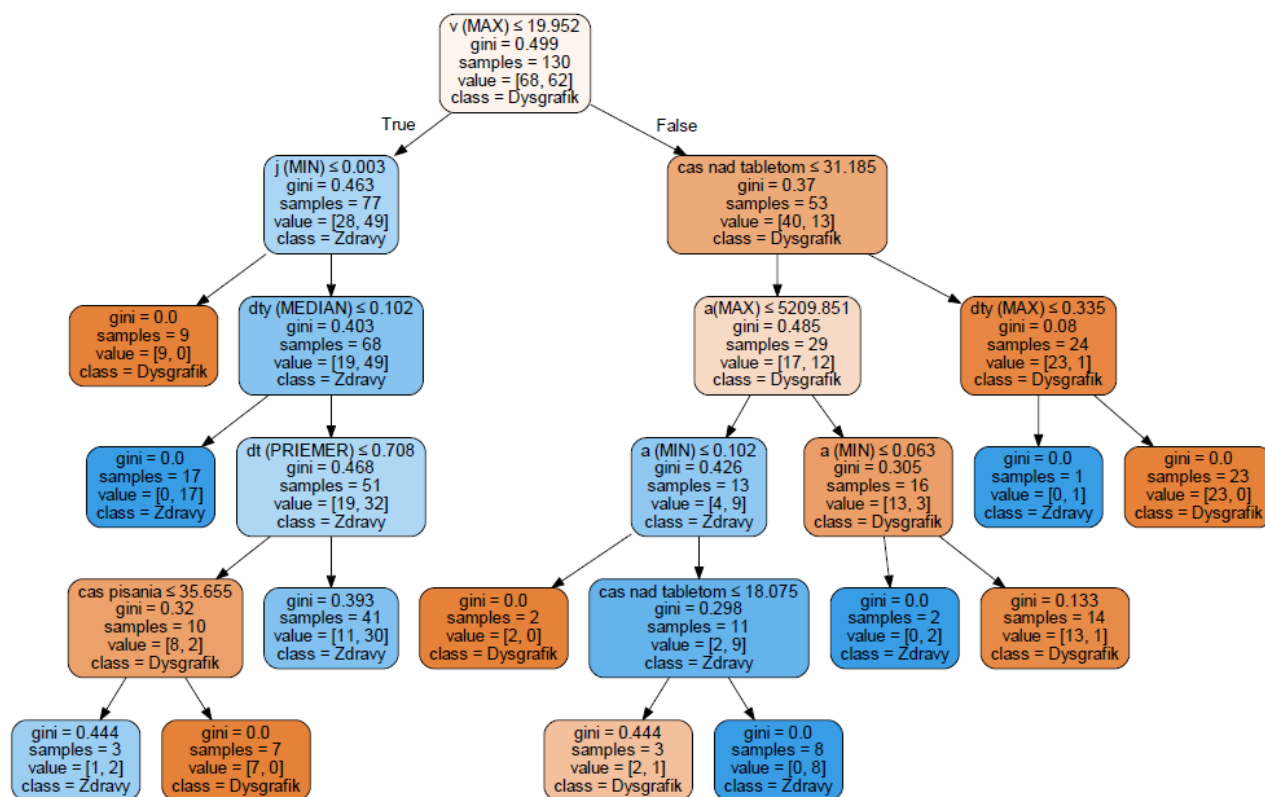


Fig. 7. Rozhodovací strom

parametrov = [1, 5, 25, 50, 75, 100, 150, 300, 450, 600, 850, 1000]. Výnimkou bol iba klasifikátor KNN, ten musel mať rozsah parametrov = [1, 5, 15, 35, 50, 65, 80, 95]. Následne sme podľa dosiahnutých výsledkov hľadali optimálny rozsah parametrov zúžením množiny parametrov tak, aby nám vyšla čo najvyššia presnosť klasifikátora. Dosiahnuté výsledky konkrétnych klasifikátorov pre všetky vykonané testovania sú zobrazené nižšie.

*AdaBoost* je používaný na zlepšenie výkonu ľubovoľného algoritmu strojového učenia [15]. Najčastejšie sa však využíva pre zvýšenie výkonnosti metód ako náhodné lesy či rozhodovacie stromy. V našom výskume sa používa za účelom dosiahnutia lepšej predikcie. Výsledky klasifikátora pre všetky vykonané testovania sú zobrazené na tabuľke XII. Najlepšie dosiahnuté hodnoty sú farebne zvýraznené.

*KNN* sa používa na klasifikáciu a regresiu, ide o algoritmus na rozpoznávanie vzorov. Výsledky klasifikátora pre všetky vykonané testovania sú zobrazené na tabuľke XIII. Najlepšie dosiahnuté hodnoty sú farebne zvýraznené.

*SVC* sa používa na klasifikáciu a regresnú analýzu. Algoritmus sme použili na predikciu. Výsledky klasifikátora pre všetky vykonané testovania sú zobrazené na tabuľke XIV a XV. Najlepšie dosiahnuté hodnoty sú farebne zvýraznené.

*DT* je jednou z najpoužívanejších metód pre klasifikáciu a predikciu. Dôležitým kritériom v tomto algoritme je výber správneho atribútu na testovanie v každom rozhodovacom uzle stromu. Výsledky klasifikátora pre všetky vykonané testovania sú zobrazené na tabuľke XVI. Najlepšie dosiahnuté hodnoty sú farebne zvýraznené.

*RF* sa využíva na klasifikáciu a regresiu. Princípom metódy je, že pozostáva z viacerých rozhodovacích stromov a výstupom je najčastejšia hodnota tried – modus, ktorá je vrátená jednotlivými stromami. Výsledky klasifikátora pre všetky vykonané testovania sú zobrazené na tabuľke XVII. Najlepšie dosiahnuté hodnoty sú farebne zvýraznené.

*Gaussovské procesy* sú metódy navrhnuté na riešenie regresných a pravdepodobnostných problémov klasifikácie. Klasifikátor podporuje klasifikáciu viacerých tried vykonaním tréningu a predikcie typu "one-versus-one" alebo "one-versus-rest" [15]. Výsledky klasifikátora pre všetky vykonané testovania sú zobrazené na tabuľke XVIII a XIX. Najlepšie dosiahnuté hodnoty sú farebne zvýraznené.

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,677	0,635	0,743	0,683	0,611	0,641	0,693	0,660	0,775	0,784	0,659	0,816
<b>citlivosť</b>	0,732	0,684	0,762	0,710	0,652	0,732	0,902	0,747	0,857	0,888	0,747	0,841
<b>špecifickosť</b>	0,687	0,663	0,756	0,789	0,596	0,598	0,653	0,586	0,774	0,742	0,615	0,793
<b>krivka ROC</b>	0,677	0,634	0,742	0,682	0,609	0,633	0,690	0,657	0,771	0,781	0,656	0,815
optimálny parameter z hľadiska presnosti	[302]	[18, 25]	[444-453]	[1]	[453]	[1]	[840-865]	[447-450]	[50]	[685, 693]	[18, 25]	[6]
názov parametra	n_estimators											

TABLE XII  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA ADABOOST

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,719	0,617	0,703	0,659	0,632	0,618	0,689	0,693	0,658	0,701	0,667	0,684
<b>citlivosť</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>špecifickosť</b>	0,639	0,424	0,565	0,457	0,442	0,406	0,543	0,477	0,489	0,598	0,530	0,427
<b>krivka ROC</b>	0,712	0,581	0,691	0,649	0,614	0,602	0,681	0,682	0,642	0,696	0,652	0,670
optimálny parameter z hľadiska presnosti	[17]	[55]	[17]	[5]	[55]	[13]	[3]	[55]	[18]	[3]	[15]	[5]
názov parametra	n_neighbors											

TABLE XIII  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA KNN

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,708	0,568	0,687	0,610	0,608	0,617	0,674	0,693	0,710	0,734	0,650	0,743
<b>citlivosť</b>	0,761	0,683	0,687	0,683	0,648	0,664	0,775	0,792	0,761	0,808	0,792	0,778
<b>špecifickosť</b>	0,686	0,530	0,704	0,545	0,563	0,583	0,581	0,621	0,687	0,651	0,631	0,707
<b>krivka ROC</b>	0,707	0,566	0,687	0,606	0,606	0,614	0,669	0,688	0,709	0,730	0,643	0,742
optimálny parameter z hľadiska presnosti	[3]	[1, 2]	[1]	[1]	[1]	[2]	[1]	[1]	[3]	[2]	[1]	[2]
názov parametra	c											

TABLE XIV  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA SVC

G. Vyhodnotenie klasifikácie

Z výsledkov klasifikácie vyplynulo, že najlepšie výsledky dosiahol klasifikátor AdaBoost, pričom úspešnosť bola najvyššia pri testovaní celej šablóny a to 81,6%. Najhorším klasifikátorom sa javil klasifikátor GaussianNB s úspešnosťou 66,7% pri testovaní 1. riadku šablóny a teda pri písaní písmena l pri normálnej rýchlosti. Výsledky klasifikácie sú zobrazené

v tabuľke XX, od najúspešnejšieho klasifikátora až po klasifikátor s najnižšou úspešnosťou.

Pre porovnanie sme vytvorili aj tabuľku XXI, ktorá zobrazuje najlepší výsledok z hľadiska testovanej úlohy, takisto od najvyššej úspešnosti až po najnižšiu dosiahnutú úspešnosť.

Najlepší výsledok sme dosiahli pri zohľadnení celej šablóny

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,667	0,541	0,708	0,514	0,500	0,559	0,631	0,594	0,615	0,608	0,615	0,701
<b>citlivosť</b>	0,747	0,587	0,714	0,491	0,517	0,629	0,629	0,655	0,634	0,664	0,683	0,744
<b>špecifickosť</b>	0,578	0,490	0,703	0,540	0,478	0,478	0,633	0,531	0,593	0,545	0,545	0,653
<b>krivka ROC</b>	0,663	0,539	0,708	0,515	0,498	0,554	0,631	0,593	0,614	0,604	0,614	0,698
optimálny parameter z hľadiska presnosti	-											
názov parametra	c											

TABLE XV  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA SVC LINEAR

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,626	0,610	0,692	0,683	0,559	0,641	0,675	0,667	0,743	0,718	0,577	0,682
<b>citlivosť</b>	0,655	0,652	0,779	0,696	0,617	0,726	0,902	0,824	0,826	0,726	0,621	0,760
<b>špecifickosť</b>	0,653	0,663	0,665	0,681	0,565	0,543	0,577	0,671	0,774	0,740	0,565	0,683
<b>krivka ROC</b>	0,627	0,608	0,688	0,682	0,562	0,633	0,663	0,666	0,741	0,719	0,578	0,679
optimálny parameter z hľadiska presnosti	[40]	[850]	[845]	[1]	[75]	[1]	[1]	[5]	[7]	[852]	[1000]	[35]
názov parametra	max_depth											

TABLE XVI  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA DT

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,751	0,633	0,767	0,642	0,642	0,641	0,743	0,734	0,726	0,784	0,716	0,750
<b>citlivosť</b>	0,792	0,762	0,794	0,696	0,761	0,891	0,841	0,856	0,838	0,824	0,792	0,824
<b>špecifickosť</b>	0,742	0,578	0,777	0,615	0,583	0,615	0,671	0,618	0,704	0,740	0,636	0,706
<b>krivka ROC</b>	0,749	0,631	0,767	0,638	0,636	0,636	0,740	0,728	0,723	0,782	0,712	0,749
optimálny parameter z hľadiska presnosti	[100]	[100]	[140]	[77]	[105]	[605]	[598]	[445]	[445]	[70]	[52]	[1002]
názov parametra	n_estimators											

TABLE XVII  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA RF

pri úspešnosti 81,6% klasifikátorom AdaBoost. Najhoršiu úspešnosť sme dosiahli pri zohľadnení 2. riadku šablóny a teda úlohy, ktorá obsahuje opakovanie písmena l pri maximálnej možnej rýchlosti pri zachovaní čitateľnosti, s úspešnosťou 63,5%, takisto pre klasifikátor AdaBoost.

Pre lepšie zobrazenie štruktúry údajov pri vizualizácii

atribútov sme použili techniku analýzy základných komponentov (PCA). Táto technika sa používa na vytvorenie prediktívnych modelov a na analýzu údajov [16]. Techniku sme využili pre premietnutie údajov do priestoru s nižšou dimenziou. Technika využíva redukciu lineárnej dimenzie pomocou singularnej hodnoty rozkladu (SVD). Pred použitím SVD sa vstupné dáta vycentrujú, ale nezmenšia sa pre každú funkciu.

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,759	0,591	0,767	0,634	0,656	0,597	0,715	0,749	0,666	0,732	0,717	0,774
<b>citlivosť</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>špecifickosť</b>	0,701	0,456	0,771	0,474	0,527	0,436	0,613	0,595	0,542	0,628	0,631	0,665
<b>krivka ROC</b>	0,755	0,585	0,767	0,617	0,650	0,589	0,710	0,741	0,657	0,726	0,710	0,767
<b>optimálny parameter z hľadiska presnosti</b>	[23]	[50]	[155]	[80]	[6], [73-75]	[55]	[20-37]	[27]	[20]	[25-27], [145]	[40, 95, 110]	[23]
<b>názov parametra</b>	1.0 * RBF											

TABLE XVIII  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA GPC

Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha											
	1. riadok	2. riadok	1.+2. riadok	3. riadok	4. riadok	3.+4. riadok	5. riadok	6. riadok	7. riadok	5. až 7. riadok	8. riadok	celá šablóna
<b>presnosť</b>	0,667	0,586	0,636	0,540	0,573	0,575	0,643	0,644	0,642	0,661	0,643	0,627
<b>citlivosť</b>	0,617	0,843	0,828	0,650	0,724	0,679	0,682	0,571	0,761	0,730	0,758	0,666
<b>špecifickosť</b>	0,721	0,301	0,424	0,418	0,404	0,459	0,598	0,724	0,510	0,583	0,515	0,584
<b>krivka ROC</b>	0,669	0,572	0,626	0,534	0,564	0,569	0,640	0,648	0,636	0,657	0,637	0,625
<b>optimálny parameter z hľadiska presnosti</b>	-											
<b>názov parametra</b>	-											

TABLE XIX  
VÝSLEDKY KLASIFIKÁTORA GAUSSIANNB

Klasifikátor	Úspešnosť klasifikátora	Testovaná úloha
AdaBoost	0,816	celá šablóna
RF	0,784	5. až 7. riadok
GPC	0,774	celá šablóna
SVC	0,743	celá šablóna
DT	0,743	7. riadok
KNN	0,719	1. riadok
lineárny SVC	0,708	1. a 2. riadok
GaussianNB	0,667	1. riadok

TABLE XX  
VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV Z HL'ADISKA KLASIFIKÁCIE

Testovaná úloha	Úspešnosť klasifikátora	Klasifikátor
celá šablóna	0,816	AdaBoost
5. až 7. riadok	0,784	AdaBoost / RF
7. riadok	0,775	AdaBoost
1. + 2. riadok	0,767	RF / GPC
1. riadok	0,759	GPC
6. riadok	0,749	GPC
5. riadok	0,743	RF
8. riadok	0,717	GPC
3. riadok	0,683	AdaBoost / DT
4. riadok	0,656	GPC
3. + 4. riadok	0,641	AdaBoost / DT / RF
2. riadok	0,635	AdaBoost

TABLE XXI  
VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV Z HL'ADISKA TESTOVANEJ ÚLOHY

Obrázok 8 znázorňuje 2D vizualizáciu pomocou metódy PCA pre celú šablónu. Možeme vidieť, ako sú dysgrafické a zdravé subjekty distribuované v 2D priestore a ako sa ich atribúty prekrývajú.

### V. NÁVRH RIEŠENIA

Naším cieľom je navrhnúť model pre vytvorenie systému pre spracovanie a následné porovnanie vzoriek rukopisu. Návrh tohto diagnostického systému je zobrazený na obrázku



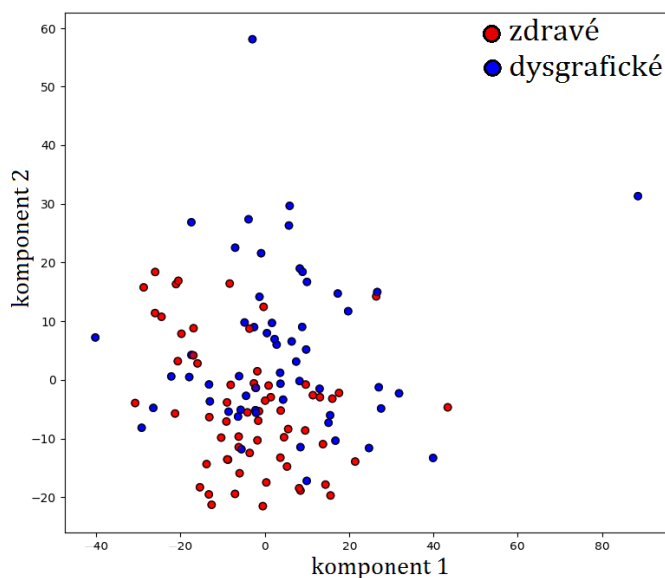


Fig. 8. 2D vizualizácia pomocou techniky PCA nad celou šablónou

9.

Samotný návrh sa skladá z dvoch častí – modelu pre spracovanie vzorky rukopisu a z používateľského rozhrania. Pre lepšie predstavenie si systému sme vytvorili dva typy UML diagramov a teda diagram aktivít pre model a diagram prípadov použitia pre použitie systému z hľadiska používateľa. Diagram na obrázku 10 popisuje samotné natrénovanie a fungovanie systému, zatiaľ čo diagram 11 znázorňuje fungovanie systému z pohľadu analýzy údajov a zdôvodnenia jednotlivého prípadu, či konkrétny testovaný subjekt je dysgrafikom alebo nie.

Diagram na obrázku 12 znázorňuje používateľské rozhranie z hľadiska špecializovaného pedagóga, respektíve psychológa, rodiča a administrátora. Diagram zahŕňa aj testovaný subjekt, ktorý však nijak nepracuje s konkrétnym systémom.

## VI. BUDÚCI VÝSKUM

Podľa dosiahnutých výsledkov sme sa rozhodli ešte nasegmentovať v každom riadku šablóny navyše aj jednotlivé písmená, slabiky a slová. Takýmto spôsobom sme z pôvodných 130 vzoriek rukopisu a prvotne nasegmentovaných 1040 vzoriek rukopisu získali až 3152 vzoriek. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov všetkých segmentovaných dát bude predmetom ďalšej časti výskumu, ako aj samotné vytvorenie systému s používateľským rozhraním, pre spracovanie a porovnanie rukopisu.

## VII. ZÁVER

Prínosom práce bolo získanie dát, približne v rovnakej miere od zdravých a dysgrafických jedincov, z hľadiska veku a pohlavia. Podarilo sa nám zozbierať viac ako 100 záznamov vzoriek písma, konkrétne 130 použiteľných vzoriek rukopisu z pôvodných 192 zozbieraných. Tieto dáta po ukončení výskumu chceme uvoľniť pre verejné použitie, čo bude prínosom pre

ďalší výskum písma a špecifických vývojových porúch, ako aj pre samotnú vedeckú komunitu.

Následne sme sa zamerali na nájdenie parametrov pre charakteristiku písma a z nich sme identifikovali tie, ktoré sú relevantné pre hodnotenie dysgrafie. Výpočty jednotlivých parametrov ukázali, že najvýraznejší rozdiel medzi zdravými a dysgrafickými vzorkami rukopisu bol len pri maximálnych hodnotách rýchlosti, zrýchlenia a šmyku a pri celkovom čase písania. Pre tieto výsledky sme ešte pre overenie výpočtov vykonali štatistické testovanie pomocou Mann-Whitneyho U testu. Hladinu významnosti sme si nastavili na hodnotu 0.05, čo značí 5% riziko, že sa pri vyhodnotení hypotéz pomýlime. Všetky parametre, pri ktorých sa ukázalo, že sú relevantné pre hodnotenie dysgrafie sme vykreslili pomocou metódy rozhodovacích stromov, pričom sme zistili, že ako najdominantnejší parameter bol označený parameter maximálnej rýchlosti.

Ďalšou časťou nášho výskumu bolo nájdenie optimálneho klasifikátora pre rozpoznávanie rozdielnosti v rukopise. Pre tento účel sme použili klasifikátory ako AdaBoost, KNN, SVC, lineárny SVC, DT, RF, GPC a GaussianNB, pričom sme sa snažili zistiť, ktorý z týchto klasifikátorov bude mať najvyššiu úspešnosť a pri ktorej úlohe skúmanej šablóny. Výsledky ukázali, že klasifikátor AdaBoost dosiahol najvyššiu úspešnosť a to až 81,6% pri testovaní celej šablóny.

Podľa dosiahnutých výsledkov sme sa rozhodli nasegmentovať okrem každého riadku šablóny aj jednotlivé časti danej úlohy. Získali sme 3152 vzoriek pre testovanie. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov takto nasegmentovaných dát bude predmetom ďalšieho výskumu.

Spracovanie písma ako také nám ponúka množstvo výhod, pretože vďaka tomu by sme vedeli lepšie a jednoduchšie analyzovať príznaky rôznych ochorení a porúch. Navrhli sme preto model pre klasifikáciu a diagnostiku poškodenia rukopisu na základe analýzy písma. Cieľom budúceho výskumu je vytvoriť reálny model tohto systému. Takýto systém by bol vítaný a využívaný vo viacerých oblastiach, pretože v dnešnej dobe nie sú zatiaľ dostatočné možnosti pre takúto analýzu ochorení. V súčasnosti sa analyzujú dostupné dáta len tradičnými spôsobmi, čo sa odzrkadľuje na samotných výsledkoch, ktoré sa líšia vzhľadom od jednotlivých pracovníkov. Naš systém by tieto výsledky mohol zjednotiť.

## POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja projektom číslo APVV-16-0211.

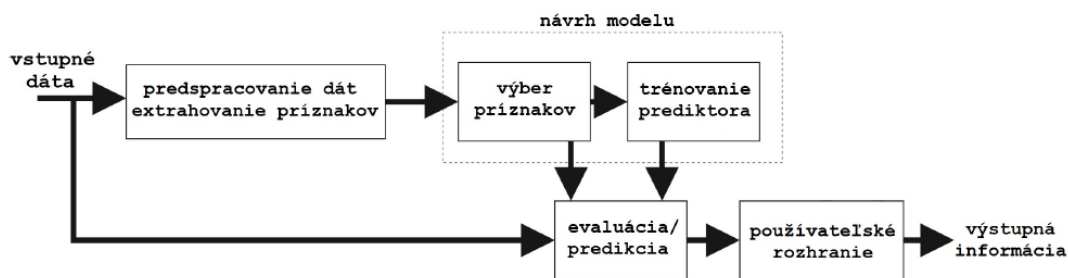


Fig. 9. Návrh CDSS systému

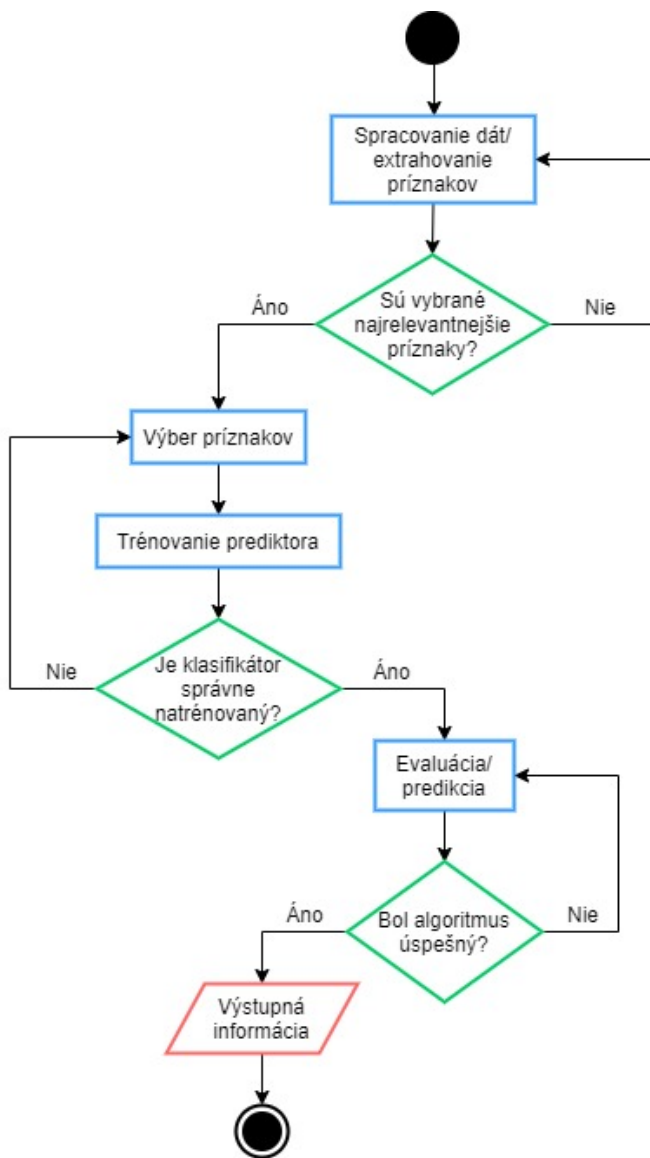


Fig. 10. Diagram systému

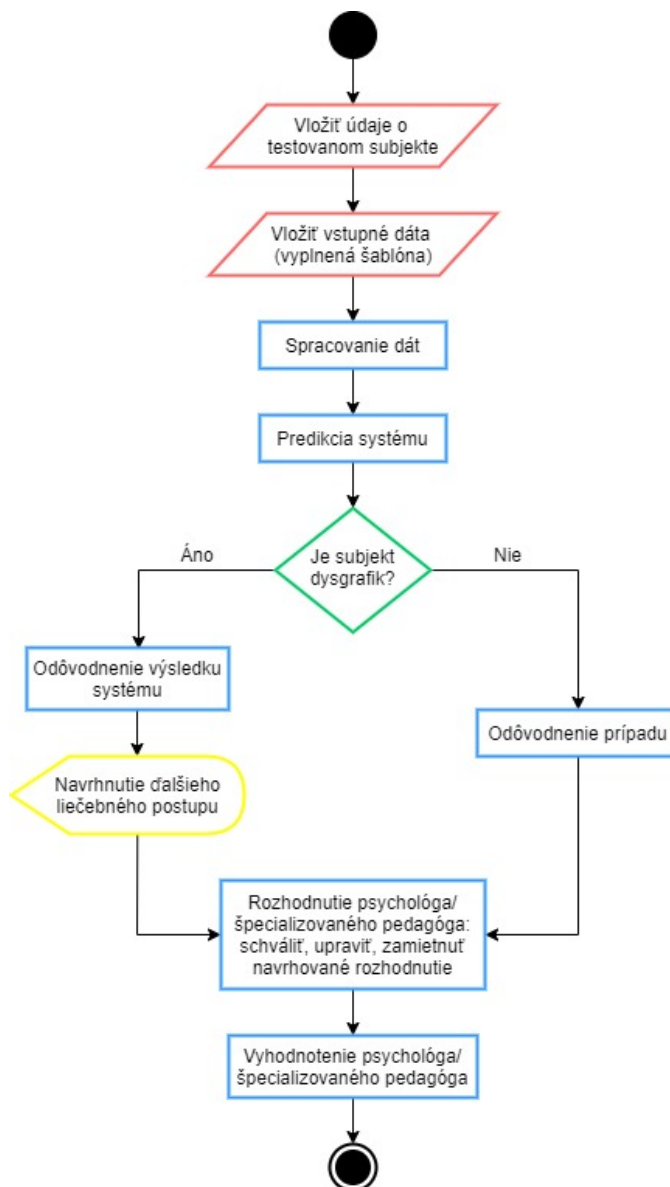


Fig. 11. Diagram analýzy údajov

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

[1] K. Kawamoto, et al.: *Improving clinical practice using clinical decision support systems: a systematic review of trials to identify features critical to success*, Bmj 2005. Vol. 330, no. 7494, pp. 765.  
 [2] R. Mergl, P. Tigges, A. Schroter, H.-J. Moller and U. Hegerl: *Digitized Analysis of Handwriting and Drawing Movements in Healthy Subjects:*

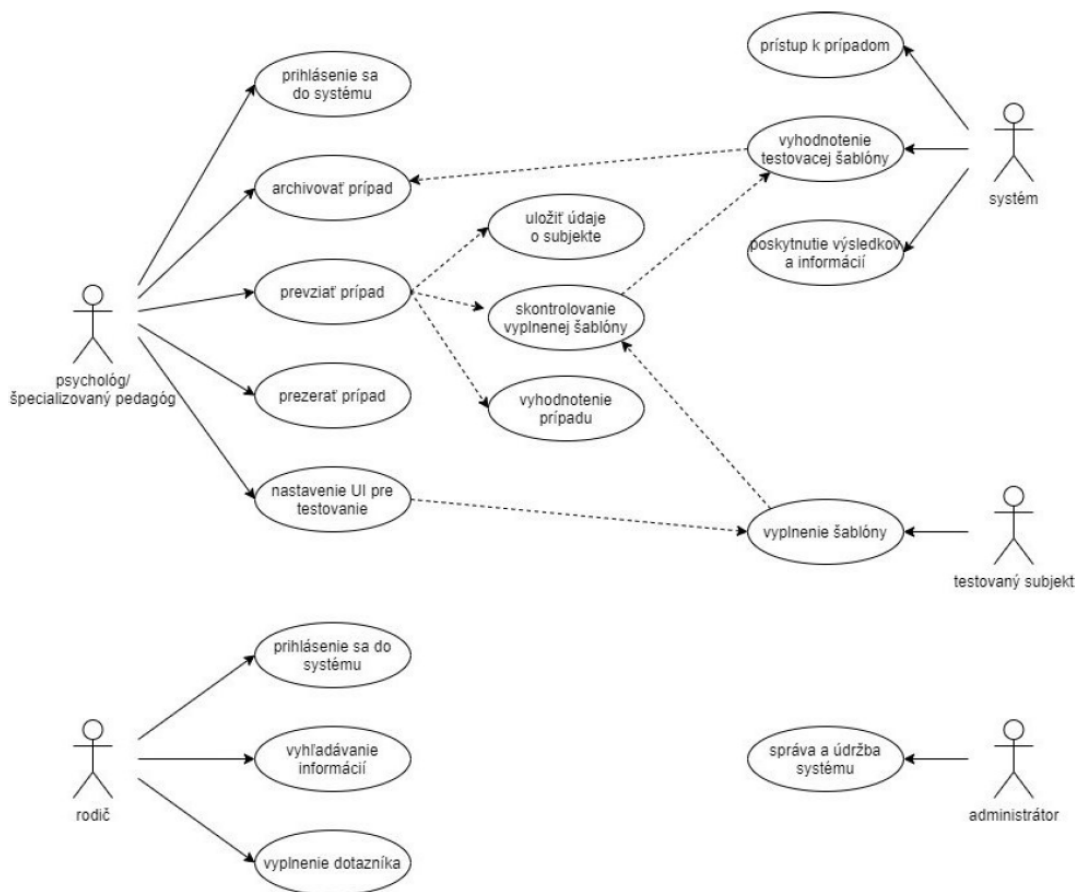


Fig. 12. Diagram prípadov použitia

*Methods, Results and Perspectives*, Journal of Neuroscience Methods, 1999. Vol. 90, no. 2, pp. 157–169, ISSN 0165–0270.

[3] D. Albert, K. Opwis and M. Regard: *Effect of Drawing Hand and Age on Figural Fluency: A Graphomotor Study with the Five-Point Test in Children*, Child Neuropsychology, 2009. Vol. 16, no. 1, pp. 32–41.

[4] N. van Drempt, A. McCluskey and N. A. Lannin: *A Review of Factors that Influence Adult Handwriting Performance*, Australian Occupational Therapy Journal, 2011. Vol. 58, no. 5, pp. 321–328, ISSN 1440–1630.

[5] H. Wang, Q. Yu, M. M. Kurtis, A. G. Floyd, W. A. Smith and S. L. Pullman: *Spiral analysis – Improved Clinical Utility with Center Detection*, Journal of Neuroscience Methods, 2008. Vol. 171, no. 2, pp. 264–270, ISSN 0165–0270.

[6] J. Mekyska, M. Faundez-Zanuy, Z. Mzourek, Z. Galaz, Z. Smekal and S. Rosenblum, *Identification and Rating of Developmental Dysgraphia by Handwriting Analysis*, IEEE Transactions on Human–Machine Systems, 2017. Vol. 47, no. 2, pp. 235–248.

[7] S. Rosenblum: *Development, reliability, and validity of the handwriting proficiency screening questionnaire (HPSQ)*, Amer. J. Occup. Therapy, 2008. Vol. 62, no. 3, pp. 298–307.

[8] S. W. Sihwi, K. Fikri, and A. Aziz: *Dysgraphia Identification from Handwriting with Support Vector Machine Method*, Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1201, no. 1., IOP Publishing.

[9] V. Zvoncak, J. Mekyska, K. Safarova, Z. Smekal and P. Brezany: *New Approach of Dysgraphic Handwriting Analysis Based on the Tunable Q-Factor Wavelet Transform*, 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, 2019, pp. 289–294.

[10] T. Smuc: *Decision Trees*, 2004.

[11] L. Breiman: *Random forests*, Machine Learning, 2001. Vol. 45, pp. 5–32.

[12] S. Rosenblum and G. Dror: *Identifying Developmental Dysgraphia Characteristics Utilizing Handwriting Classification Methods*, 2017 IEEE Transactions on Human–Machine Systems, vol. 47, no. 2, pp. 293–298, April 2017.

[13] V. Paz-Villagran, J. Danna and J. L. Velay: *Lifts and stops in proficient and dysgraphic handwriting*, Human Movement Science, 2014. Vol. 33, pp. 381–394, ISSN 0167–9457.

[14] Scikit-learn: *Machine Learning in Python*, Pedregosa et al., JMLR 12, pp. 2825–2830, 2011.

[15] Y. Freund, R. Schapire and N. Abe: *A short introduction to boosting*, in Journal–Japanese Society For Artificial Intelligence, 1999. Vol. 14, pp. 771–780.

[16] I. Jolliffe: *Principal component analysis*, Springer berlin Haidelber, 2011.

# Aplikácia smart DSP systému v priemyselnej elektrotechnike

Ing. Patrik Jacko

Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE  
Košice, Slovensko  
patrik.jacko.2@tuke.sk

prof. Ing. Dobroslav Kováč, CSc.

Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE  
Košice, Slovensko  
dobroslav.kovac@tuke.sk

**Abstrakt** - Vývoj digitálnych zariadení sa od svojich počiatkov upiera na viacero oblastí a parametrov, z ktorých tie najzákladnejšie sú rýchlosť, presnosť a stabilita. V súčasnosti, kedy sú analógové zariadenia a ich spracovania signálov v pozadí digitálnych zariadení, sa do popredia dostávajú procesory určené na digitálne spracovanie signálov. Tie je možné aplikovať v rôznych oblastiach priemyslu, multimédií, prípadne vesmírnom a vojenskom odvetví. Tento článok sa venuje návrhu a realizácii multifunkčného meracieho systému, ktorého hlavnými riadiacimi prvkami sú mikrokontroléry spoločnosti STMicroelectronics s funkciami digitálneho spracovania signálov. Článok zároveň popisuje hardvérové a softvérové časti zariadenia a experimentálne prvky, ktoré bolo potrebné realizovať pri návrhu zariadenia. Hlavnou funkciou multifunkčného meracieho systému je snímanie, spracovanie a vyhodnocovanie neharmonických signálov s frekvenciou do 100kHz, čoho výsledkom je hardvérové zariadenie a riadiaca aplikácia určená pre počítače s OS Windows.

**Kľúčové slová** - Digitálne spracovanie signálov, DSP, STM32F446RE, Nucleo-64, STM32F746ZG, Nucleo-144

**Abstract**— The development of digital devices is focused from its beginnings to a number areas where the most basic areas are speed, precision and stability. Nowadays, when analog devices and its signal processing are in the background of digital devices, the digital signal processors are preferred more than analog devices. The digital signal processors are possible applied to the various industrial areas, multimedia, cosmic and military areas too. This topic is focused to the design and realization of Multifunctional measuring system, which main parts are microcontrollers of STMicroelectronics. This microcontrollers contain digital signal processing full instruction set. The topic describes hardware and software components and experimental parts, which was necessary applied to system design. The Multifunctional measuring system main object is sampling, processing and calculating of nonharmonic signal with frequency up to 100kHz. Created hardware system with software application, running to OS Windows, is main goal of thesis.

**Keywords**— Digital signal processing, DSP, STM32F446RE, Nucleo-64, STM32F746ZG, Nucleo-144

## I. ÚVOD

Článok, ktorého téma je aplikácia smart DSP systému v priemyselnej elektrotechnike, je zameraný na využitie

procesorov špeciálne navrhnutých a určených na digitálne spracovanie signálov vyšších frekvencií. Tieto procesory sa všeobecne nazývajú DSP procesory. V súčasnosti je ich používanie a využívanie ich funkcií na pravidelnej báze, aj keď v mnohých prípadoch si to nikto neuvedomuje.

Daná problematika poukazuje na aktuálny stav modernizácie všetkých digitálnych zariadení, pričom dôraz je kladený na presnosť a rýchlosť spracovania dát. Zo širokého spektra aplikácií DSP procesorov v priemyselnej elektrotechnike, bola zvolená oblasť merania a spracovania signálov. Preto tento článok popisuje návrh a realizáciu multifunkčného digitálneho meracieho systému schopného merať neharmonické signály do 100kHz.

K téme boli navrhnuté body potrebné na splnenie:

1. Analýza možností využitia a vlastností A/D prevodníkov DSP procesorov pre meranie a vyhodnotenie neharmonických periodických signálov s frekvenciami do 100kHz.
2. Návrh zapojenia umožňujúceho meranie výkonu vyššie uvedených signálov s čo najvyššou presnosťou, pri súčasnom uvážení ekonomickej stránky riešenia.
3. Stanovenie jeho metrologických parametrov.

Prvá časť článku popisuje mikrokontroléry určené na digitálne spracovanie signálov a samotný proces spracovania signálov.

Druhá časť práce je zameraná na mikrokontroléry STM32F7 a STM32F4 obsahujúce plnú sadu funkcií na digitálne spracovanie signálov. Tieto mikrokontroléry sú postavené na báze procesorov ARM, a preto sa časť článku venuje aj týmto mikročipom. Ďalšie časti článku sa venujú návrhu a realizácii multifunkčného meracieho systému, tak ako aj meraniam jeho presnosti a vyhodnocovaním metrologických parametrov zariadenia.

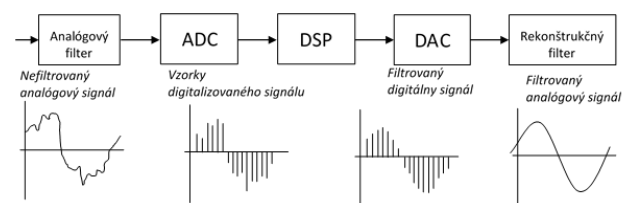
## II. DIGITÁLNE SPRACOVANIE SIGNÁLOV

V odbornej terminológii sa je možné stretnúť s termínom DSP v dvojzmysle, aj keď principiálne totožnom odvetví. Hardvérové priemyselné odvetvie používa termín DSP (Digital Signal Processor) ako označenie pre mikrokontroléry,

ktorých architektúra je špeciálne prispôbená na spracovanie digitálnych signálov. V softvérovom odvetví vývojári algoritmov rozumejú pod skratkou DSP pojem Digital Signal Processing, teda spracovanie digitálnych signálov. Z toho hľadiska sa dá povedať, že obidva termíny vystihujú tú istú podstatu. Digitálne spracovanie signálov predstavuje jednu z veľmi silných technológií ovplyvňujúcu vývoj vedeckého a technologického smerovania sveta v 21. storočí. Digitálne spracovanie signálov je v súčasnosti najpoužívanejším technologickým procesom vôbec, nakoľko je implementované do širokého rozsahu rôznych odvetví či už technickom, medicínskom, vojenskom a pod.

Pojem signál evokuje predstavu o určitej informácii šíriacej sa vzduchom alebo vedením. V praxi to predstavuje vibrácie, zvukové vlny, vizuálne signály (napr. svetlo). Je jasné, že v tejto oblasti sa pozornosť venuje predovšetkým na čo najpresnejšie spracovanie analógových veličín do digitálnej formy. Preto digitálne spracovanie signálov znamená využitie matematiky, algoritmickej a techniky na manipuláciu so signálmi, s ktorými pracujú digitálne zariadenia. Má širokú škálu cieľov ako vylepšenie vizuálnych obrazov, rozpoznávanie a generovanie reči a podobne [1] [2].

Vo všeobecnom ponímaní môže byť digitálne spracovanie signálov predstavené ako model blokov zobrazený na Obr. 1



Obr. 1 Proces digitálneho spracovania signálov

Prvým krokom digitálneho spracovania signálov je snímanie meranej veličiny. Snímanie je sprostredkované prostredníctvom snímača. Analógový signál prechádza analógovým filtrom. Ten má za úlohu odfiltrovať signál, ktorý je mimo frekvenčného rozsahu. Výstupom analógového filtra je pásmovo obmedzený analógový signál, ktorý je vzorkovaný analógovo-digitálnym prevodníkom do digitálnej formy. DSP procesor spracováva signál podľa pravidiel spracovania signálov. Ďalším blokom na blokovej schéme je digitálno-analógový prevodník konvertujúci spracovaný signál na výstupný signál. Tento signál je spojité v čase, ale nie je amplitúdovo spojité (je schodovitý) vplyvom D/A prevodníka. Na vyhladenie výstupného signálu a odstránenie vyšších harmonických sa používa rekonštrukčný filter [3].

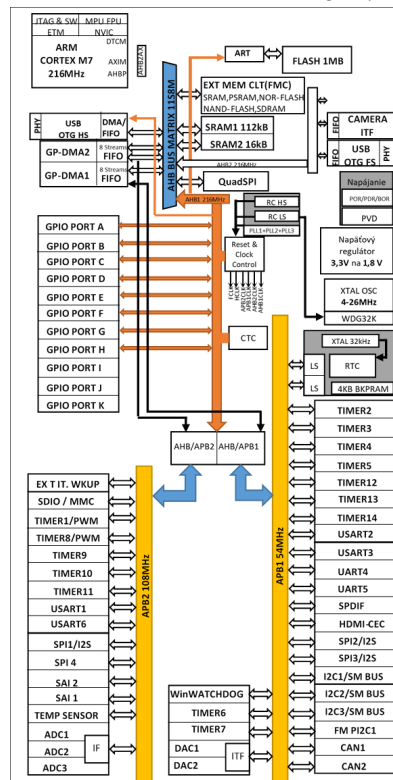
### III. MIKROKONTROLÉRY STM32F746ZG A STM32F446RE

Spoločnosť STMicroelectronics disponuje viacerými typmi mikrokontrolérov. Procesorové jadro sa vo väčšine prípadov využíva od spoločnosti ARM, pričom jadrá Cortex-M0, M0+, M3, M4 a M7 sú implementované len do 32-bitových mikrokontrolérov. Okrem širokého výberu 32-bitových mikrokontrolérov, spoločnosť ST ponúka aj lacnejšiu a menej

výkonnú variantu 8-bitových mikrokontrolérov. V tomto článku budú najdôležitejšie mikrokontroléry STM32F746ZG a mikrokontrolér STM32F446RE, ktoré budú následne popísané.

#### A. Mikrokontrolér STM32F746ZG

Architektúra mikrokontroléra je založená na redukovanej inštrukčnej sade RISC. Na obrázku Obr. 2 je znázornená celková architektúra mikrokontroléra STM32F746ZG.



Obr. 2 Architektúra mikrokontroléra STM32F746ZG

Mikrokontrolér STM32F746ZG je 32-bitový vysokovýkonný mikrokontrolér s procesorom ARM Cortex-M7 určený na aplikácie digitálneho spracovania signálov. Je taktovaný frekvenciou 216MHz, čo potvrdzuje, že operácie na spracovanie signálu dokáže vykonávať rádovo v desiatkach mikrosekúnd. Mikrokontrolér využíva dva typy pamäti : SRAM s veľkosťou 512kB a pamäťou Flash s veľkosťou 1MB. Okrem pamätí obsahuje tieto periférie:

- *AD prevodníky:* obsahuje 3 AD prevodníky zdieľajúce až 16 kanálov. AD prevodníky môžu pracovať v jednoduchých módoch, kde každý prevodník pracuje sám, alebo v multi-módoch, kde prevodníky pracujú spoločne. Medzi tie patria simultánny mód a prekladaný mód, ktorý bude popísaný neskôr.
- *DA prevodníky:* mikrokontrolér obsahuje jeden DA prevodník rozdelený na dva kanály
- *Časovače/čítače:* 16 časovačov zadených do troch skupín – všeobecne použiteľné časovače, základné časovače a časovače s rozšírenou funkcionalitou.

- *USART/UART*: štyri komunikačné rozhrania pracujúce v synchronnom móde a dve rozhrania pracujúce v asynchronnom móde.
- *SPI a I<sup>2</sup>C*: mikrokontrolér obsahuje štyri sériové komunikačné rozhrania I2C a taktiež štyri rozhrania SPI. Tie budú zohrávať hlavnú komunikačnú linku pri realizácii multifunkčného meracieho systému.

Periférie sú pripojené k zberniciam APB – *Advanced Peripheral Bus*. Zbernica APB1 taktuje periférie operujúce na maximálnej taktovacej frekvencii 54MHz, pričom vysokorýchlostné periférie pripojené k zbernici APB2 sú taktované frekvenciou až 108MHz. Rozloženie periférií a ich pripojenie k taktovacej zbernici je znázornené na architektúre mikrokontroléra [4][5].

**B. Mikrokontrolér STM32F446RE**

Mikrokontrolér STM32F446RE je druhým hlavným prvkom multifunkčného meracieho systému, ktorý je výsledkom článku. V porovnaní so spomínaným mikrokontrolérom STM32F746ZG je jednoduchší, poskytuje nižší výkon a menšie pamäťové miesta. Tento mikrokontrolér obsahuje procesor s nižšou radou, ARM Cortex-M4, ktorý taktiež disponuje plnou DSP inštrukčnou sadou, jednotkou FPU a MCU a množstvom periférií. Mikrokontrolér pracuje na maximálnej taktovacej frekvencii 180 MHz a ponúka 512 kB pamäte Flash a 128 kB pamäte SRAM.

Architektúra mikrokontroléra STM32F446RE je principiálne totožná s predošlým mikrokontrolérom, preto v článku kvôli rozsiahlosti nebude uvedená.

Nakoľko bolo uvedené, že maximálna taktovacia frekvencia mikrokontroléra je 180MHz, zbernice APB1 a APB2 taktujú takisto nižšou frekvenciou a to: APB1 – 45MHz a APB2 taktuje periférie frekvenciou 90MHz [6].

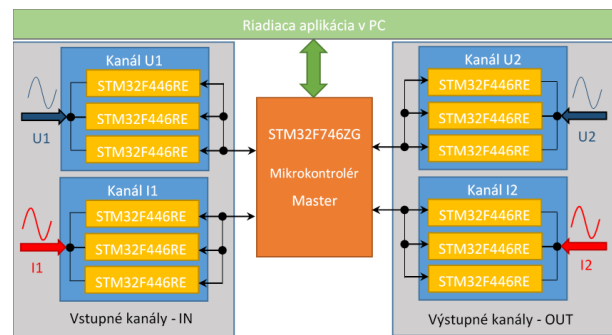
**IV. NÁVRH MULTIFUNKČNÉHO MERACIEHO SYSTÉMU**

V úvode bolo zdôraznené, že článok je zameraný na aplikáciu DSP systémov v odvetví priemyselnej elektrotechniky, pričom konkrétne sa bude venovať návrhu a realizácii multifunkčného meracieho systému. Tento systém bude mať, okrem úloh vyplývajúcich z téz, za úlohu snímať signály s frekvenciou do 100kHz a vykonávať nasledujúce operácie:

- meranie efektívnych hodnôt napätia a prúdu
- meranie výkonov: činný, jalový, zdanlivý a výpočet deformačného výkonu
- meranie účinnosti a strát
- meranie výkonových strát tranzistora
- meranie frekvencie a zobrazenie frekvenčného spektra

Na to, aby boli tieto požiadavky splnené, je potrebné zvoliť vhodnú koncepciu častí zariadenia. V predchádzajúcej kapitole boli popísané mikrokontroléry STM32F746ZG a STM32F446RE, ktoré predstavujú základné hardvérové komponenty. Z uvedených úloh je možné určiť, že

najkomplexnejšie meranie (čo sa týka počtu kanálov zariadenia) je meranie účinnosti a strát meraného zariadenia. Na takéto meranie budú potrebné kanály snímajúce vstupné napätie, vstupný prúd, výstupné napätie a výstupný prúd. Z toho vyplýva, že merací systém musí obsahovať štyri kanály. Nakoľko je potrebné čo frekventovanejšie vzorkovanie signálov do 100kHz, bol zvolený návrh systému s koncepciou štyroch kanálov, kde každý kanál budú tvoriť tri mikrokontroléry STM32F446RE. Za predpokladu, že tieto mikrokontroléry budú hodinovo zosynchronizované, bude možné v rovnakom okamihu získať vzorky štyroch rôznych signálov. Synchronizáciu mikrokontrolérov predstavujúcich kanály (*mikrokontroléry Slave*) bude realizovať hlavný mikrokontrolér STM32F746ZG nazývaný *mikrokontrolér Master*.

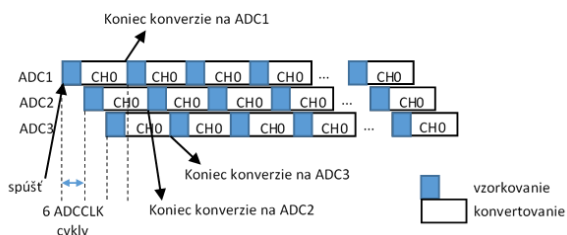


Obr. 3 Prvý návrh zapojenia mikrokontrolérov multifunkčného meracieho systému

Snímacie mikrokontroléry STM32F446RE ponúkajú *prekladaný mód* – Interleaved mode, ktorého úlohou je zvýšenie vzorkovacej frekvencie, a práve tento faktor je pri meraní z hľadiska presnosti zariadenia najdôležitejší.

**A. Interný prekladaný mód mikrokontroléra STM32F446RE**

Prekladaný mód alebo v anglickom názve Interleaved mode je rýchly nástroj, pri ktorom sa využívajú dva alebo tri AD prevodníky s časovým oneskorením spúšťania.



Obr. 4 Interný prekladaný mód

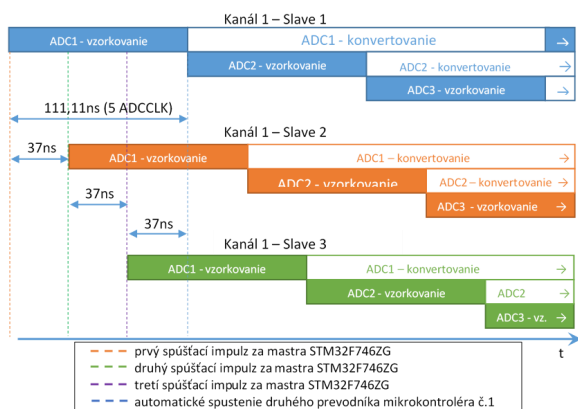
V tomto móde sa využíva stále len jeden kanál, na ktorý sú pripojené všetky prevodníky. Princíp spočíva v časovo posunutom spúšťaní jednotlivých prevodníkov. Prevodník ADC1 sa spustí na vonkajší podnet, pričom ostatné prevodníky sa spustia automaticky podľa zvoleného oneskorenia. V tomto prípade je oneskorenie 6 ADC hodinových impulzov. Minimálne oneskorenie môže byť 5 ADCCLK (ADC hodinových cyklov). Je to tak preto, aby

nevyznikla kolízia, kedy by v jednom okamihu na tom istom kanály vzorkovali dva prevodníky. Vzhľadom k tomu, že minimálny čas vzorkovania sú 3 ADCCLK, je tento mód zabezpečený ďalšími 2 ADCCLK, po ktorých sa spustí ADC2. To znamená, že výsledný čas minimálneho oneskorenia je 5 ADCCLK. Následne, po spustení ADC2 a oneskorení minimálne 5 ADCCLK, začne vzorkovať ADC3, po ktorom opäť začína skenovať ADC1. Oneskorenie času spúšťania medzi jednotlivými AD prevodníkmi sa dá nastaviť v rozmedzí od 5 až po 20 ADCCLK. Toto nastavenie je možné uskutočniť pri konfigurácii AD prevodníkov. Vďaka tomu módu je možné urobiť za daný časový úsek dvoji, až trojnásobný počet AD prevodov, ako pri klasickom AD prevode s použitím jedného prevodníka. Tento mód podporuje využívanie dvoch alebo troch AD prevodníkov [4].

**B. Externý prekladaný mód mikrokontroléra STM32F446RE**

Keďže zvýšenie vzorkovacej frekvencie mikrokontroléra STM32F446RE už nie je fyzicky možné, nakoľko je rýchlosť limitovaná na maximálnu rýchlosť 111,11ns, bol navrhnutý tzv. *externý prekladaný mód* (External Interleaved mode), pozostávajúci z dvoch častí. Prvú časť tvorí interný prekladaný mód realizovaný výrobcami mikrokontrolérov STM32 Druhú časť je tvorí prekladaný mód realizovaný viacerými mikrokontrolermi STM32F446RE. Tento mód zároveň obsahuje interný prekladaný mód a bude označovaný ako *externý prekladaný mód*.

Princíp vytvorenia externého prekladaného módu spočíva v spúšťaní prevodníkov na jednotlivých mikrokontroléroch v presne stanovených časových intervaloch. Pri popise interného prekladaného módu bola uvedená potreba dodržania minimálne stanovených časov oneskorenia pri spúšťaní ADC2 a ADC3 (Obr. 4). Oneskorenie musí byť dodržané len v rámci jedného mikrokontroléra. Aplikáciou ďalších mikrokontrolérov je možné tento čas skrátiť. Princíp externého prekladaného módu je zobrazený na nasledujúcom obrázku. Ten vychádza z Obr. 4, kde proces vytvárania jednej vzorky je rozdelený na časť vzorkovania a konvertovania do digitálnej formy.



Obr. 5 Externý prekladaný mód

Na obrázku sú principiálne zobrazené spustené AD prevodníky troch mikrokontrolérov tvoriacich jeden kanál. Mikrokontroléry STM32F446RE sú v tomto prípade označené ako Slave 1, Slave 2 a Slave 3. Je známe, že AD prevodníky všetkých mikrokontrolérov pracujú na frekvencii 45MHz. To znamená, že výrobcom nastavený interný prekladaný mód bude v najrýchlejšom možnom režime spúšťať prevodníky v intervaloch 111,11ns. Externým prekladaným módom v tomto čase (od spustenia prvého ADC po spustenie druhého ADC Slave 1) bude možné spúšťať, s určitým časovým oneskorením, prevodníky ADC1 na mikrokontroléroch Slave 2 a 3. Tým sa získa trojnásobný počet vzoriek v porovnaní s interným prekladaným módom. Výhodou je samozrejme väčšia presnosť merania, ale je potrebné počítať s vyššími nárokmi na pamäťové úložisko.

V tejto fáze je potrebné začať riešiť komunikačné prepojenie medzi mikrokontrolermi Master a Slave. Najrýchlejšia komunikačná periféria implementovaná v mikrokontroléroch STM32F4 a F7 je sériová zbernica SPI pracujúca na maximálnej frekvencii 45MHz. Implementáciou zbernice SPI za účelom sekvenčného spúšťania AD prevodníkov bolo zistené, že aj pri najrýchlejšom komunikačnom móde by nebolo možné v sekvenčnom odosielaní, tzv. *start bitu* (impulz pre spustenie AD prevodníkov), prijímať dáta, spracovať ich a spúšťať AD prevodníky v časových intervaloch 37ns. Z toho dôvodu bolo spúšťanie AD prevodníkov realizované pomocou samostatných vodičov, ktorými bude z mikrokontroléra Master na mikrokontroléry Slave odoslaný štartovací impulz. V presne stanovených časových intervaloch, so synchronizáciou všetkých mikrokontrolérov, bude hlavný čip Master odosielať štartovacie impulzy pre AD prevodníky všetkých mikrokontrolérov Slave. Výsledkom bude trojnásobný počet vzoriek voči internému prekladanému módu. Po odsímaní 100kHz sínusového signálu bol výsledný počet vzoriek implementovaným externým prekladaným módom 270.

K návrhu zariadenia je potrebné ešte pripomenúť, že komunikácia medzi mikrokontrolérom Master a mikrokontrolermi Slave je realizovaná sériovým rozhraním SPI. Komunikácia medzi mikrokontrolérom Master a riadiacou aplikáciou v počítači je realizovaná rozhraním UART. Jednotlivé mikrokontroléry Slave medzi sebou nekomunikujú.

**C. Návrh a realizácia analógovej časti**

Okrem základnej hardvérovej kompozície bolo potrebné vyriešiť ďalšiu analógovú problematiku. Referenčné napätie AD prevodníkov mikrokontrolérov STM32F446RE (Slave) je 3,3V. Bez pridanej zosilňujúcej elektroniky by nebolo možné snímať vyššie napätia ako je 3,3V. Z toho dôvodu bola navrhnutá analógová časť upravujúca vstupný signál tak, aby bol stále v rozmedzí 0 až 3,3V. Je potrebné podotknúť, že AD prevodníky spomínaných mikrokontrolérov sú unipolárne, preto nedokážu zosnímať záporné hodnoty napätia. V prípade že vstupný signál obsahuje aj záporné napäťové zložky,

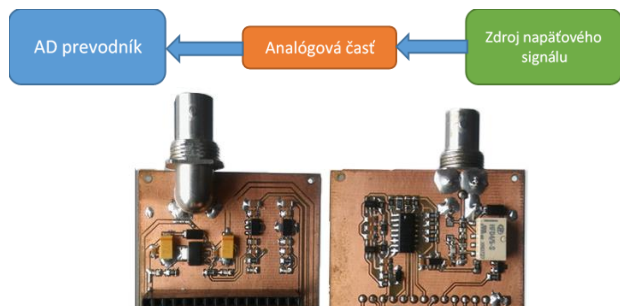
k navrhutej analógovej časti je pridaná časť, ktorá vykoná amplitúdový posun signálu do kladných napätových hodnôt.

Boli navrhnuté deliče a násobiče, ktoré upravujú vstupný signal tak, aby pri snímaní AD prevodníkom bol v celom jeho referenčnom pásme – 0V až 3,3V.

- Deliaci pomer vo formátoch:
  - o 1:1
  - o 1:10
- Zoom vstupného signálu (zväčšenie/zmenšenie)
  - o x100
  - o x20
  - o x10
  - o x2
  - o x1
  - o x0,5
  - o x0,2

Voľbou deliaceho pomeru 1:1 bude možné snímať originálny signál na vstupe AD prevodníka a pri deliči (deliaci pomer) 1:10 bude signál 10-násobne zmenšený. Týmto spôsobom bude možné snímať signály do 33V (v prípade, že zoom bude nastavený na x1).

Zoom vstupného signálu predstavuje zosilnenie, prípadne zoslabenie signálu podľa uvedených možností. Zosilnenie signálu sa využije v prípadoch, že snímané napätie je veľmi nízke, pričom je potrebné jeho zosilnenie do celého rozsahu referenčného napätia. Zoslabenie vstupného signálu vo formátoch x0,5 a x0,2 majú rovnaký význam ako deliaci pomer vo formáte 1:10. Časť *deliaci pomer a zoom* je možné kombinovať, čím je možné merať napätia až do hodnoty 50V (v prípade striedavého napätia aj 100V). Použitím sondy x10 je možné merané napätie ešte 10-násobne zvýšiť.



Obr. 6 Hore: bloková schéma aplikácie analógovej časti  
Dole: Plošný spoj analógovej časti

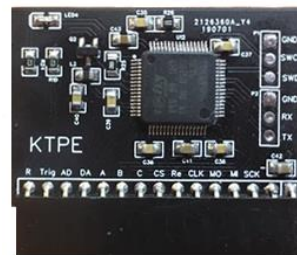
Z hľadiska jednoduchšej manipulácie s prípadnými poruchami zariadenia bola navrhnutá koncepcia zariadenia tak, že každý mikrokontrolér je osadený na samostatnom plošnom spoji, ktoré spolu vytvárajú jeden celok – multifunkčný merací systém.

## V. REALIZÁCIA HARDVÉRU ZARIADENIA

### A. Plošný spoj Slave

Na obrázku Obr. 7 je znázornený plošný spoj Slave, v centre ktorého sa nachádza mikrokontrolér STM32F446RE.

Na pravej strane sa nachádzajú spoje, ku ktorým je možné pripojiť ST-Link pre nahrávanie programu do mikrokontroléra (piny GND, SWCLK a SWIO). Ďalšiu časť pravej strany tvoria komunikačné piny USARTu. Dôležitejšia časť sa nachádza na spodnej strane plošného spoja.

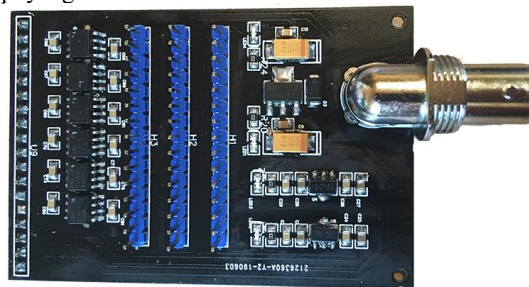


Obr. 7 Plošný spoj Slave

Spodná časť obsahuje prepojovaciu lištu, ktorou je plošný spoj pripojený ku plošnému spoju kanálu. Takýchto plošných spojov Slave je v zariadení celkovo 12. Trojica plošných spojov Slave tvoria jeden kanál.

### B. Plošný spoj kanálu

*Plošný spoj pre kanál* tvorí druhú časť hardvérových komponentov. Tieto plošné spoje majú za úlohu prepájať mikrokontrolér Master s mikrokontrolérmi Slave a galvanicky oddeliť spojenie medzi nimi. Zároveň je to komponent, ktorý obsahuje analógovú časť a BNC konektor, ktorým sa pripája vstupný signál k zariadeniu.



Obr. 8 Plošný spoj pre kanály

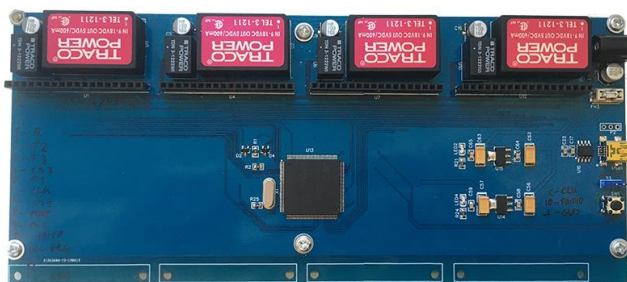
Zobrazený plošný spoj pre kanály sa skladá z troch častí. Napravo je analógová časť s pripojením signálu na vstup zariadenia, druhú časť tvoria lišty, ku ktorým sa pripájajú plošné spoje Slave (na plošnom spoji tvoria strednú časť). Poslednou časťou sú optočleny a prepojovacia lišta k *plošnému spoju Master*. Optočleny sú v zariadení implementované kvôli galvanickému oddeleniu kanálov voči mikrokontroléru master. Tým bude zabezpečené galvanické oddelenie kanálov, ktoré chráni zariadenie pred poškodením, odstraňuje rozdiely zemných potenciálov a podobne.

### C. Plošný spoj Master

Najväčší plošný spoj spájajúci všetky ostatné časti sa na nazýva *plošný spoj Master*. Ten obsahuje časť napájania a komunikácie s počítačom, časť pripojenia kanálov a časť osadenia izolovaných DC-DC TRACO meničov.



Nasledujúci obrázok zobrazuje osadený plošný spoj Master.



Obr. 9 Plošný spoj Master

Napájacia a komunikačná časť s PC sa na plošnom spoji nachádza na pravej strane. Okrem napájacieho konektora a USB mini konektora, je možné vidieť trojpinovú lištu slúžiacu na nahrávanie a ladenie programu do mikrokontroléra, tlačidlo RESET a prúdovú poistku. Vrchnú časť plošného spoja tvoria dva typy TRACO meničov, slúžiacich na napájanie mikrokontrolérov a operačných zosilňovačov.

Výsledkom je teda zariadenie pozostávajúce z popísaných hardvérových komponentov a plošných spojov. Zariadenie obsahuje štyri kanály, ktoré sú galvanicky oddelené. Tie spájajú trojice plošných spojov Slave a následne ich prepájajú k hlavnému plošnému spoju obsahujúci mikrokontrolér Master. Celkové zariadenie sa nachádza na nasledujúcom obrázku.



Obr. 10 Finálna verzia hardvérovej stránky multifunkčného meracieho systému

## VI. SOFTVÉR MULTIFUNKČNÉHO MERACIEHO SYSTÉMU

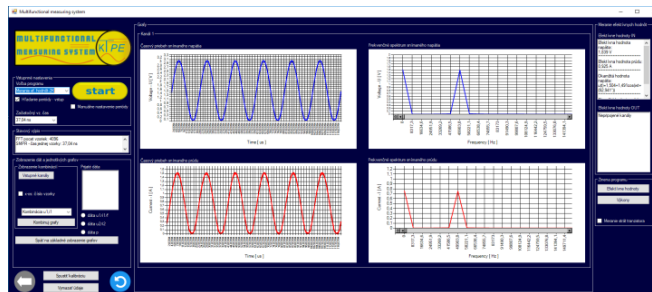
Softvér zariadenia pozostáva z troch hlavných častí:

- *Softvér riadiacej aplikácie*
- *Softvér mikrokontroléra Master*
- *Softvér mikrokontrolérov Slave*

Je potrebné pripomenúť, že *softvér mikrokontroléra Slave*, je pre každý mikrokontrolér Slave rovnaký.

### A. Riadiaca aplikácia

Riadiaca aplikácia multifunkčného meracieho systému bola navrhnutá a vytvorená v programovacom prostredí Microsoft Visual Studio, ktoré ponúka programátorovi prácu s grafickými prvkami.



Obr. 11 Pracovná plocha aplikácie so spusteným meracím módom

Riadiaca aplikácia pozostáva z dvoch módoch – kalibračný mód a merací mód. Prvý spomenutý sa využíva na kalibráciu systému, kde užívateľ nastavuje potrebné deliče, prípadne amplitúdový posun signálu do kladných hodnôt.



Obr. 12 Rozdelenie hlavného panela na riadiacu, grafickú a programovú časť

V tomto móde má užívateľ k dispozícii riadiacu časť aplikácie, ktorá sa nachádza na ľavej strane, grafickú časť, kde bude zobrazený priebeh kalibrovaného kanálu. Programová časť nachádzajúca sa na pravej strane je aktívna len v meracom móde. Okrem nastavenia kalibrovaného kanálu, voľby deličov a amplitúdového posunu je možné, manuálne odmerať periódu, ktoré bude potrebné v meracom móde.

Merací mód, znázornený na Obr. 11, slúži na spustenie merania, kde zariadenie podľa zvoleného programu zosníma signály privedené na vstup kanálov. Zoznam programov je vypísaný v 5. kapitole. Po odsúhlasení signálov na vstupe zariadenia, merací systém vykoná patričné operácie, čoho výsledkom bude výpočet efektívnych hodnôt napätia a prúdu, výpočet výkonov alebo účinnosti a strát meraného zariadenia. Grafická časť meracieho módu obsahuje štvoricu kanálov, v ktorej sa po odmeraní zobrazia časové priebehy snímaných signálov a ich patričné frekvenčné spektrá. Namerané výsledky budú zobrazené v programovej časti aplikácie na pravej strane. V prípade že užívateľ chce kombinovať viaceré priebehy v jednom grafe, je k dispozícii možnosť „kombinácia grafov“, v ktorej bude môcť detailne vidieť fázové posuny napätia a prúdu. Táto funkcia zároveň poskytuje možnosť zobrazenia okamžitého výkonu, z ktorého je možné získať ďalšie dôležité informácie.

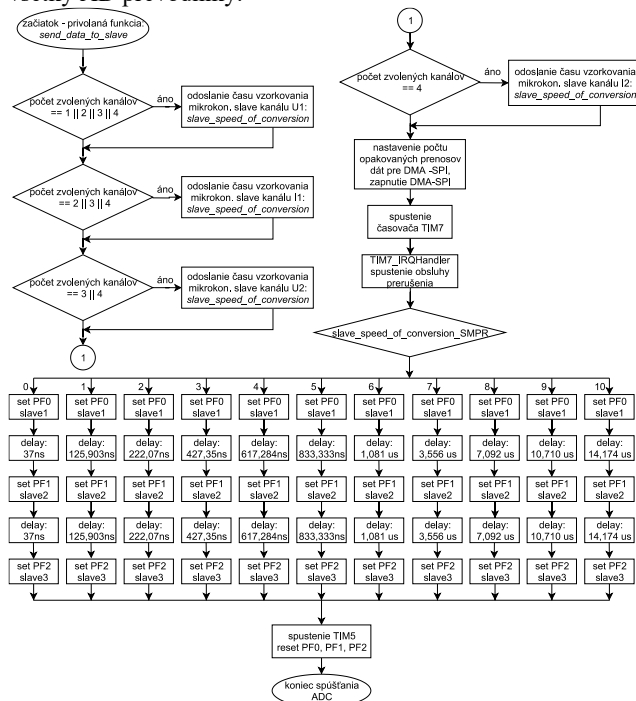
### B. Softvér mikrokontroléra Master

Zdrojový kód mikrokontroléra Master je veľmi obširny. Obsahuje veľa funkcií, ktoré vykonávajú všetky dôležité operácie zariadenia. Dá sa povedať, že riadenia mikrokontroléra Master je najdôležitejšou časťou práce,

nakoľko počítačová aplikácia predstavuje HMI rozhranie, mikrokontroléry Slave slúžia predovšetkým na snímanie vstupných signálov a odosielanie dát do mikrokontroléra Master, a práve mikrokontrolér Master vykonáva všetky matematické a logické operácie spojené so správnymi výsledkami meraní. Z hľadiska komplexnosti budú popísané najdôležitejšie časti softvéru, ktoré predstavujú pridanú hodnotu pre prax.

**Aplikácia externého prekladaného módu**

Merací mód sa spustí ukončením kalibrácie v riadiacej aplikácii a meranie bude spustené stlačením tlačidla „start“. Týmto príkazom dostane mikrokontrolér Master potrebné údaje týkajúce sa priebehu merania. Master následne odosiela štartovacie impulzy mikrokontrolérom Slave, ktoré spúšťajú konverziu v externom prekladanom móde. Na nasledujúcom vývojovom diagrame sú zobrazené procesy, ktoré nastanú po stlačení tlačidla start od fázy odoslania kalibračných dát mikrokontrolérom Slave až do okamihu, kedy sú spustené všetky AD prevodníky.



Obr. 13 Vývojový diagram externého prekladaného módu

Je potrebné pripomenúť, že štartovací pin PF0 mikrokontroléra Master je pripojený ku všetkým mikrokontrolérom Slave1 každého kanálu. To isté platí pre pin PF1 a mikrokontroléry Slave2 a pin PF2 a mikrokontroléry Slave3. Znamená to teda, že ak sa odošle štartovací impulz z pinu PF0, v rovnakom čase sa spustí prevodník ADC1 mikrokontrolérov Slave1 na všetkých štyroch kanáloch.

Vývojový diagram uvádza celkovo 11 možností oneskorenia pri spúšťaní AD prevodníkov. Tie boli navrhnuté kvôli synchronizácii externého prekladaného módu.

Vzorkovacia frekvencia sa mení v registri SMPR (Sample Time Register). Ak bude zmenená vzorkovacia frekvencia, teda bude predĺžený čas vzorkovania, musí byť zároveň oneskorený aj čas začiatku spúšťania AD prevodníkov na mikrokontroléroch Slave2 a Slave3. Ak by externé oneskorenie bolo stále nastavené na 37ns, došlo by k nepresnosti merania.

**Funkcia interpolácie a Rýchlej Fourierovej transformácie**

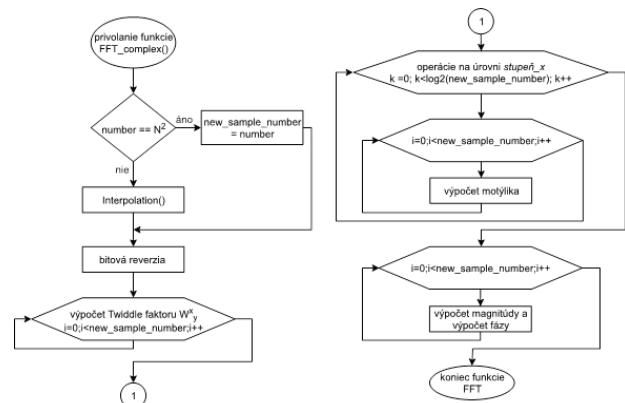
Aplikácia funkcie FFT v zariadení spĺňa dvojaký význam – informuje užívateľa o počte frekvenčných zložiek meraného signálu, o ich frekvencii a veľkosti amplitúd jednotlivých harmonických zložiek. Výsledkom informatívnej úlohy funkcie je vykreslenie frekvenčného spektra v grafickej časti meracieho módu.

Ďalšou úlohou funkcie FFT je výpočet jalového výkonu, kde je potrebné počítať s harmonickými zložkami priebehov napätia a prúdu a ich fázami. Tie je možné získať takisto aplikáciou FFT.

Funkcia rýchlej Fourierovej transformácie je realizovaná pomocou algoritmu Radix-2. Samotnej transformácii napreduje bitová reverzia, určenie počtu vzoriek, z ktorých bude FFT realizovaná a interpolácia vzoriek.

Interpolácia v tomto prípade zabezpečuje prevzorkovanie odsnímaného signálu tak, aby počet vzoriek, z ktorých bude FFT realizovaná, bol násobkom dvojky, ktorý je pri realizácii FFT nevyhnutý. V prípade, že počet vzoriek periódy je rovný násobku dvojky, interpolácia bude vynechaná.

V nasledujúcom vývojovom diagrame je zobrazená funkcia FFT\_complex, obsahujúca aj blok interpolácie.



Obr. 14 Funkcia FFT a interpolácie

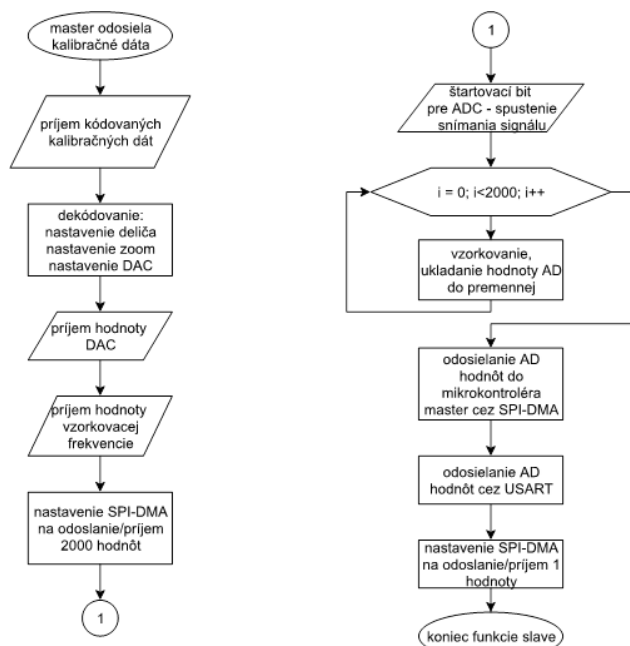
**C. Softvér mikrokontroléra Slave**

Softvér mikrokontroléra Slave je rovnaký pre všetky Slave čipy. Z pohľadu funkcionality je mikrokontrolér Slave určený len na príjem a nastavenie kalibračných požiadaviek, spustenie interného prekladaného módu, ktorým uloží snímaný priebeh do premennej. Po odsímaní priebehov nasleduje odoslanie dát do mikrokontroléra Master. Tieto činnosti sa na vyžiadanie opakujú stále dookola.

Po inicializácii periférií a nastavení deličov, mikrokontroléry Slave čakajú na príjem kalibračných

nastavení. V momente, ako mikrokontrolér Master začne generovať hodinové impulzy na pine SCK (pin periférie SPI), začne periféria SPI riadená radičom DMA prijímať kalibračné dáta.

Nasledujúci vývojový diagram popisuje operácie, ktoré vykonáva mikrokontrolér Slave.



Obr. 15 Vývojový diagram operácií vykonávaných mikrokontrolérom Slave

Po nastavení kalibračných hodnôt, mikrokontrolér Slave očakáva štartovací impulz, ktorým spustí meranie. Snímanie signálu a ukladanie vzoriek sa končí pri počte opakovaní 6000. Následne mikrokontrolér Slave je v stave nečinnosti a čaká na vyžiadanie dát. Tie linkou SPI odošle do mikrokontroléra Master, čím končí jeden cyklus funkcie mikrokontroléra Slave.

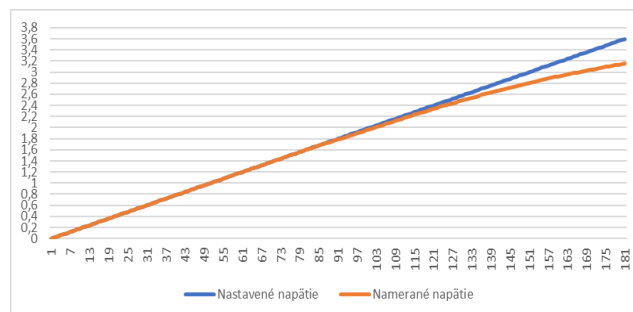
### VII. MERANIE, TESTOVANIE ZARIADENIA A STANOVENIE METROLOGICKÝCH PARAMETROV

Metrologické parametre multifunkčného meracieho systému boli stanovené vyhodnocovaním rôznych typov signálov nami realizovaným zariadením a profesionálnym meracím systémom s overenú odchýlkou merania. Pomerom získaných výsledkov bude stanovená maximálna odchýlka multifunkčného meracieho systému. Merania budú zamerané na tieto oblasti:

- Vyhodnotenie totožnosti tvarov signálov.
- Meranie efektívnej hodnoty napätia.
- Meranie frekvencie v rozsahu 50Hz až 100kHz.
- Meranie účinnosti DC/DC meniča.

#### A. Vyhodnotenie totožnosti tvarov signálov

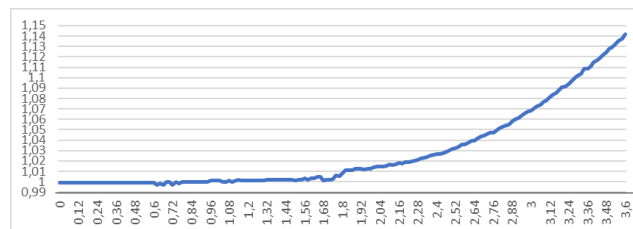
V prvom meraní bolo potrebné určiť totožnosť tvarov meraných signálov. Pri tomto meraní bol ako porovnávaci merací systém použitý osciloskop *Tektronix DPO 7354* s maximálnou udávanou odchýlkou 0,35% [7] a ako generátor signálov bol použitý *Arbitrary Generator HMF2525*. Pri nastavení vstupného obdĺžnikového signálu s parametrami: napätie  $U = 0V$  až  $3V$  a frekvenciou  $100kHz$ , bol porovnávaný tvar signálu multifunkčným meracím systémom so zaznamenaným tvarom signálu, ktorý zachytil systém *Tektronix*. Už pri prvom meraní boli zistené nerovnosti medzi odsnímanými tvarmi. Pokiaľ *Tektronix* nameratal presne zadané parametre, naše zariadenie odsnívalo signál s napätím 0 až  $2,8V$ . Pokles maximálnej hodnoty napätia voči nastavenému napätiu bol  $0,2V$ , čo predstavuje chybu až  $6,66\%$ . Viacerými meraniami sa zistilo, že útlm napätia spôsobuje analógová časť kanálov (konkrétne zenerová dióda). Bolo teda potrebné určiť bod, kedy nastáva útlm napätia a softvérovou tento problém odstrániť tak, aby spôsobené problémy neovplyvňovali presnosť meraní.



Obr. 16 Graf skutočnej a nameranej hodnoty napätia

Na grafe je možné vidieť skutočnú a nameranú napäťovú hodnotu. x-ová os uvádza počet meraní, ktoré boli realizované zvyšovaním napätia o  $0,02V$  a y-ová os predstavuje napätie vo voltoch.

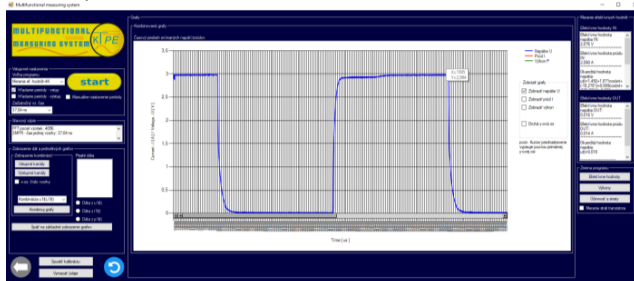
Z grafu je možné odčítať hodnotu začiatku útlmu napätia, ktorý nastáva pri hodnote  $1,7V$  (útlm pri tejto hodnote bol aj prakticky nameraný). Na odstránenie útlmu napätia je potrebné vytvoriť ciachové krivky pre každý kanál a pre každé rozlíšenie v prípade použitia deličov. Na nasledujúcom grafe je znázornená ciachová krivka pre kanál U1 bez použitia deličov ( $1:1$  a  $x1$ )



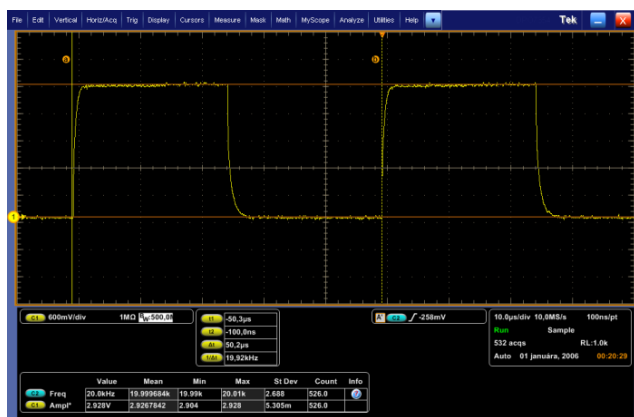
Obr. 17 Ciachová krivka kanálu U1 bez použitia deličov/násobičov

Hodnoty ciachovej krivky boli aplikované do multifunkčného meracieho systému tak, že pri prijatí dát

snímaných signálov z mikrokontrolérov Slave program automaticky vynásobí každú vzorku patričnou hodnotou zosilnenia. Tým sa signál upraví tak, aby jeho tvar a napäťové hodnoty boli totožné s nastaveným tvarom, prípadne s tvarom odsímaným profesionálnym meracím systémom. Na nasledujúcom obrázku sa nachádza zachytený signál multifunkčným meracím systémom a profesionálnym meracím systémom *Tektronix DPO7354*, kde sú porovnávané parametre signálu. Signál na obrázku je už upravený aplikáciou ciachových kriviek.



Obr. 18 Tvar zachyteného signálu Multifunkčným meracím systémom



Obr. 19 Tvar zachyteného signálu profesionálnym osciloskopom Tektronix DPO7354

Platí teda tvrdenie, že tvar signálu zachytený naším zariadením a profesionálnym osciloskopom je totožný. Zároveň bola odmeraná frekvencia signálu, ktorú Tektronix vyhodnotil ako 20,0kHz. V prípade nášho zariadenia bola nameraná frekvencia 19,9836Hz, čo predstavuje chybu 0,082%.

**B. Meranie efektívnej hodnoty napätia**

Meranie efektívnej hodnoty napätia bolo realizované použitím generátora signálov *HMF2525 Arbitrary generator*, zdroja *Diametral AC250K1D-S*, zdroja *HAMEG R&S HMP4040* a multimetra *Rigol DM3068*, ktorý obsahuje funkciu True RMS. Merací systém Rigol DM3068 meria s presnosťou šiestich desatinných miest a konkrétne s odchýlkou maximálne 0,005% [8]. Meranie bolo prevedené v napäťovom rozsahu od 1 až 120V.

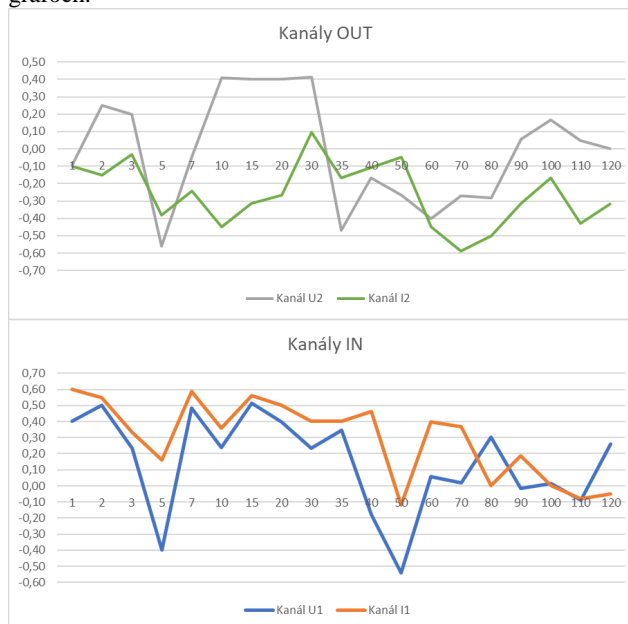
Meranie prebiehalo na všetkých kanáloch multifunkčného meracieho systému, a zároveň na multimetri Rigol DM3068.

Nakoľko merané napätie bolo v rozmedzí 1 až 120V, zariadenie si vyžadovalo prepínanie napäťových rozsahov. Preto boli v tomto meraní použité interné deliče. Pri vyšších napätiach bolo potrebné spojenie interných deličov s deličom napäťovej sondy x10 (označená písmenom „S“).

Tabuľka 1

U[V]	1	2	3	5	7	10	15	20	30	35
delič	1:1, x1	1:1, x0,5	1:1, x1	1:1, x0,5	1:10, x1	1:10, x1	1:10, x1	1:10, x1	1:10, x1	1:10, x0,5
U[V]	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
delič	1:10, x0,5	1:10, x0,2	1:10, 1x, S	1:10, 1x, S	1:10, 1x, S	1:10, 1x, S	1:10, 1x, S	1:10, 1x, S	1:10, 1x, S	

Výsledkom boli chyby meraní zobrazené na nasledujúcich grafoch.



Obr. 20 Chyba meraní kanálov IN a OUT pri jednosmernom napätí s použitím interných deličov

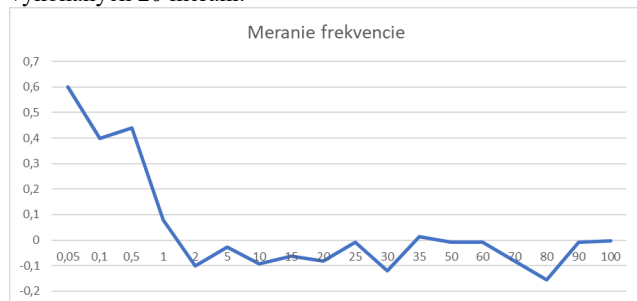
Uvedené grafy odkazujú na tabuľku chyby meraní, kde maximálna odchýlka merania voči multimetru Rigol DM3068 je ±0,6%.

**C. Meranie frekvencie**

Meranie frekvencie je realizované pomocou vykresleného frekvenčného spektra naším zariadením a profesionálnym meracím systémom (osciloskopom) Tektronix DPO 7354, ktorého vzorkovacia frekvencia je 3,5GHz. Na generovanie signálov s rôznymi frekvenciami bol použitý generátor signálov *Arbitrary Generator HMF2525*. Tento generátor môže generovať signály s frekvenciami až do 25MHz.

Nasledujúci graf obsahuje odchýlky meraní frekvencie nášho zariadenia voči osciloskopu Tektronix DPO 7354. Pri meraní sme prešli celým definovaným rozsahom multifunkčného

meracieho systému – teda od 50Hz až 100kHz. Celkovo bolo vykonaných 20 meraní.



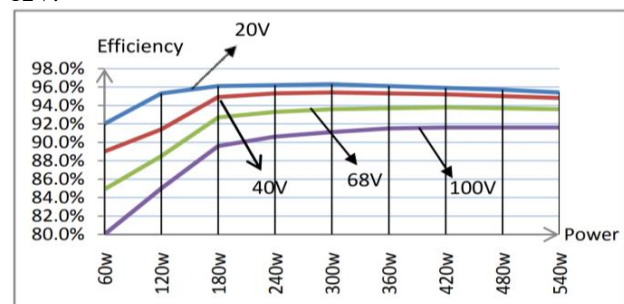
Obr. 21 Chyba merania kanálov IN a OUT pri meraní frekvencie

Z nameraných hodnôt bolo zistené, že maximálna chyba merania voči meraciemu systému Tektronix je 0,6%. Táto chyba je najväčšia pri meraní spodnej hraničnej hodnoty – 50Hz. Chyba merania frekvencie sa ustabilizuje pri meraní frekvencie vyššej ako 1kHz, kde dosahuje maximálnu chybu  $\pm 0,1\%$ .

#### D. Meranie účinnosti DC/DC meniča

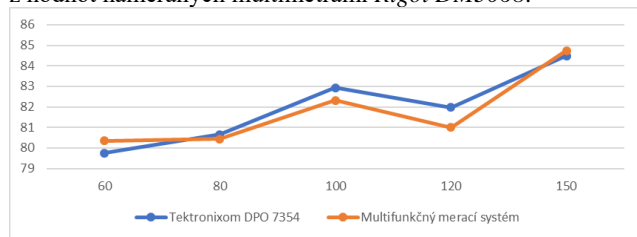
Meranie účinnosti DC/DC meniča bolo realizované použitím solárneho regulátora eTracer ET4415N [9].

Na nasledujúcom obrázku je zobrazená krivka účinnosti udávaná výrobcom meniča eTracer ET4415N. Výstupné napätie meniča pri zobrazených krivkách je 12V.



Obr. 22 Krivky účinnosti meniča eTracer ET4415N stanovené výrobcom

Realizované meranie bolo zamerané na meranie účinnosti pri vstupnom napätí 100V. Nasledujúci obrázok zobrazuje grafy namerané multifunkčným meracím systémom s využitím programu „Meranie účinnosti a strát“ a vypočítané účinnosti z hodnôt nameraných multimetrami Rigol DM3068.



Obr. 23 Vypočítané a namerané účinnosti meniča eTracer ET4415N

Účinnosti namerané v rozsahu 60 až 150W vyšli, či už v prípade merania multifunkčným meracím systémom alebo profesionálnymi meracími systémami, v porovnaní s výrobcom udávanými účinnosťami nižšie [9].

#### ZÁVER

Z nameraných údajov je možné potvrdiť, že vytvorené zariadenie pracujúce s maximálnou odchýlkou 0,6%, môže byť spoľahlivým zariadením pre laboratórne podmienky. Najdôležitejším prvkom, ktorým zariadenia nadobúda pridanú hodnotu pre prax je navrhnutý a realizovaný externý prekladaný mód. Okrem toho, ako hlavný spoločenský prínos práce je považovaná aj skutočnosť, že v súčasnosti je možné aj na základe ekonomicky veľmi dostupných komponentov mikroprocesorovej a automatizačnej techniky realizovať inteligentné systémy, ktoré môžu svojimi parametrami konkurovať aj cenovo náročným, špičkovým špecializovaným systémom. Cena všetkých komponentov tvoriacich merací systém je v porovnaní s profesionálnymi zariadeniami niekoľkonásobne nižšia. Cena bola vyčíslená na hodnotu 570 eur. Zároveň je možné za prínos považovať komplexnosť celého navrhnutého riešenia, jednak čo sa týka jeho šírky: softvérová aj hardvérová časť, tak aj hĺbky s využitím vedeckého prístupu riešenia všetkých aspektov: analýza problematiky, návrh realizácie, laboratórna vzorka, finálna realizácia, stanovenie metrologických parametrov.

#### REFERENCES

- [1] Smith S. W., *Digital signal processing*, Druhé vydanie. California: Technical Publishing San Diego, 1997-1999. 688 s. ISBN 0-9660176-6-8
- [2] B. Paillard, *An Introduction To Digital Signal Processors*, Université de Sherbrooke, 2002. 209 s.
- [3] TAN L. jiang J., *Fundamentals of analog and digital signal processing*, Druhé vydanie. Decatur, Georgia, USA: DeVry University, 2008. 437 s. ISBN 978-1-4343-5641-3(sc)
- [4] STMICROELECTRONICS, *Reference manual STM32F74xx*, [online]. 2017, [cit. 12.8.2017], Dostupné na internete: <[https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/c5/cf/ef/52/c0/f1/4b/fa/DM00124865.pdf/files/DM00124865.pdf/jcr:content/translations/en.DM00124865.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/c5/cf/ef/52/c0/f1/4b/fa/DM00124865.pdf/files/DM00124865.pdf/jcr:content/translations/en.DM00124865.pdf)>
- [5] STMICROELECTRONICS, *Datasheet – STM32F746xC/E*, [online], 2017, [cit. 10.9.2017], Dostupné na internete: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f746zg.pdf>>
- [6] STMICROELECTRONICS, *Datasheet – STM32F446xC/E*, [online], 2017, [cit. 10.9.2017], Dostupné na internete: <<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/65/cb/75/50/53/d6/48/24/DM00141306.pdf/files/DM00141306.pdf/jcr:content/translations/en.DM00141306.pdf>>
- [7] TEKTRONIX, *Digital Phosphor Oscilloscopes DPO7000 Series Datasheet*, 2017, [cit. 5.1.2020], Dostupné na internete: <<file:///C:/Users/Patrik/Desktop/DPO7000C-Oscilloscope-Datasheet-48W2654321.pdf>>
- [8] RIGOL, *DM3068 6 1/2 digits – Digital Multimeter*, 2017, [cit. 5.1.2020], Dostupné na internete: <<https://www.testunlimited.com/pdf/RIGOL-DM3068-datasheet.pdf>>
- [9] EPEVER, *eTracer series – OPERATION MANUAL*, 2017, [cit. 10.1.2020], Dostupné na internete: <<https://www.manualslib.com/manual/1302867/Epsolar-Et2415n.html?page=10#manual>>

# Manažment rádiových zdrojov pre kognitívne mobilné ad-hoc siete

Dominik Nezník

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií,  
FEI TU Košice, Slovenská republika  
Email: dominik.neznik@tuke.sk

Ľubomír Doboš

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií,  
FEI TU Košice, Slovenská republika  
Email: lubomir.dobos@tuke.sk

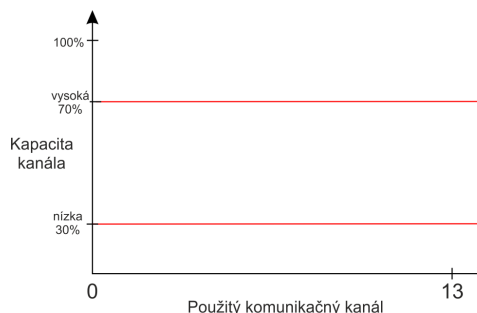
**Abstrakt**—Článok rozoberá proces prerozdelenie kanálov, snímania spektra, ako aj návrh metód na dosiahnutie optimálnosti siete zmenou komunikačného kanála. Cieľom je poskytnúť informácie o možných metódach na zlepšenie, ako aj zrýchlenie procesu pridelenia optimálnych kanálov pre zariadenia. Návrh metód má doceliť optimalizáciu siete a dosiahnuť zlepšenie kvality spojenia. Navrhnuté metódy pracujú nezávisle a samostatne na každom jednom zariadení a vyhodnocujú vstupné parametre, ktoré sa menia v závislosti od správania sa zariadení.

## I. ÚVOD

Manažment rádiových zdrojov v technológii kognitívneho rádia pre mobilné ad-hoc siete zohľadňuje komunikáciu medzi zariadeniami a vyhodnocuje informácie získané z bezdrôtovej siete. Rozhodovanie o efektívnom prerozdelení kanálov sa vykonáva metódami na to určenými. Najznámejšie sú fuzzy logika, teória hier a neurónové siete, s ktorými sa v dnešnej dobe stretávame pomerne často v mobilných smartfónoch. Parametre zo snímania spektra sa spracujú a použijú následne v metóde na určenie a výber najvhodnejších kanálov. Dôležité je efektívne využívanie kanálov v bezdrôtových sieťach na optimalizovanie a zlepšenie kvality spojenia zariadení. Používanie dostupného spektra spôsobom, akým sa využíva v dnešnej dobe, nie je efektívne. Pod slovom efektívny je myslená komunikácia bez vzájomného rušenia (snaha o čo najnižšie rušenie) a zároveň má obslúžiť obrovské množstvo bezdrôtových zariadení, teda ich pripojenie na internet (sieťové zoskupenie). Z toho dôvodu je potrebné hľadať iné metódy na používanie spektra. A práve takou metódou je technológia kognitívneho rádia, ktorá umožňuje prepínanie spektra na základe súboru merateľných parametrov. Pomocou parametrov sa vyhodnotí komunikačný kanál, či sa používa a následne, ak je nevyužívaný, použije sa. Rovnako kognitívne rádio umožňuje zmenu kanála aj v prípade, ak komunikácia na zvolenom kanáli je nedostatočná v dôsledku rušenia spôsobeného susedným zariadením komunikujúcim na nevhodnom komunikačnom kanále.

## II. PREROZDEĽOVANIE SPEKTRA V MODERNÝCH BEZDRÔTOVÝCH SIEŤACH

Pri návrhu pridelenia jednotlivých kanálov je potrebné zohľadňovať najmä snímanie spektra a informácií dostupné pre dané zariadenie. Zariadenie vie získať informácie práve z prenosu riadiacich paketov medzi zariadeniami, kedy sa

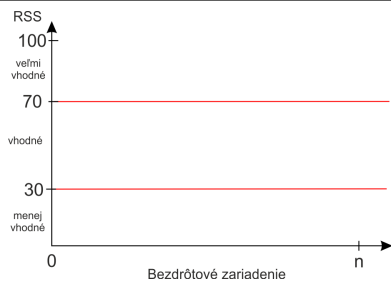


Obr. 1. Prevádzka ako vstupný parameter pre jednotlivé metódy.

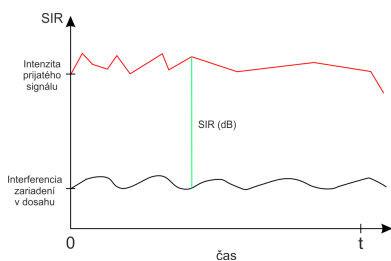
vymieňajú všetky základné nastavenia potrebné pre komunikáciu medzi dvoma zariadeniami. Jedným z dôležitých parametrov je intenzita prijatého užitočného signálu – RSS (Received Signal Strength), rušenie od okolitých zariadení a ich využívaných komunikačných kanálov. Ďalším je prevádzka ako aj hodnota SIR, teda pomer medzi užitočným signálom a rušením spôsobeným vysielaním ostatných zariadení v rádiovom dosahu. Interval hodnôt pre tieto parametre sú zobrazené na obr. 1, 2, 3. Nie je vhodné využívať kanál, na ktorom prebieha veľká prevádzka, ale je vhodnejšie využívať tie s nižšou prípadne žiadnou prevádzkou. Dôležitým parametrom charakterizujúci kvalitu spojenia je pomer SIR a podľa tohto parametra sa najviac treba zamerať na využívanie jednotlivých kanálov. Aby zariadenie vedelo si správne zvoliť vhodný komunikačný kanál, je potrebné zvoliť vhodnú hru ako aj stratégiu na tento výber pri metóde využívajúca teóriu hier. Oproti tomu pri fuzzy logike je potrebné vhodne definovať priebeh parametra a stanoviť vhodne hraničné hodnoty. Následne je potrebné definovať pravidlá na definovanie výstupných hodnôt.

### A. Teória hier ako metóda prerozdelenia spektra

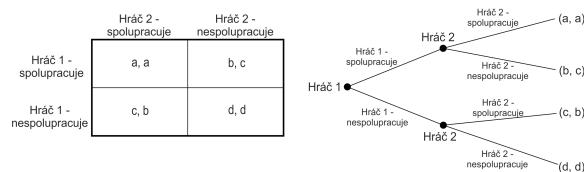
Teória hier ako metóda bola navrhnutá pre ekonomický a sociálny výskum, ale je možné aplikovať ju aj v bezdrôtovom prostredí. Metóda predstavuje matematické techniky na analyzovanie situácie, pri ktorej sa dvaja alebo viacerí hráči rozhodujú, aký ťah vykonajú, pričom tento ťah ovplyvní ostatných hráčov. Typ hry, ktorý sa využije k prideleniu kanálov pre bezdrôtové siete, je formou podobný dileme vážna. Nakoľko nevieme dopredu povedať, čo daný hráč spraví, ale predpok-



Obr. 2. RSS ako vstupný parameter pre jednotlivé metódy.



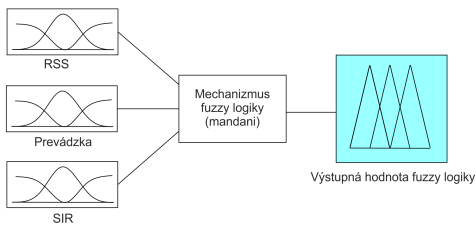
Obr. 3. SIR ako vstupný parameter pre jednotlivé metódy.



Obr. 4. Výber typu spolupráce medzi zariadeniami.

ladáme, že sa bude riadiť zvolenou stratégiou a zvolí si taký ťah, aby sa dosiahlo zlepšenie podľa zvolenej stratégie výberu. Zariadenie vykoná snímanie spektra. Z tohto kroku zistí dostupné kanály, ktoré sa nevyužívajú. Rovnako pri procese snímania získa toto zariadenie riadiace informácie, ktoré obsahujú informácie o susediacich zariadeniach spolu s informáciou, aké kanály dané zariadenie využíva. Teda z tohto jedného kroku vieme určiť, aké sú možnosti pre dané zariadenie (voľné kanály). Po získaní informácií z okolia môže zariadenie na základe parametrov, ktoré sme definovali ako hodnotiace, teda tie, ktoré určujú, kedy je daný kanál vhodný na komunikáciu a kedy naopak je nevhodný. Po zistení potrebných parametrov k výpočtu podľa hodnotiacich parametrov získavame kanály vhodné na použitie (ich poradie vyjadruje vhodnosť). Teda prvý kanál je najvhodnejší a ostatné sú menej vhodné no stále akceptovateľné. V prípade, že z týchto kanálov zvolíme ten najvhodnejší bez ohľadu na ostatné zariadenia išlo by o stratégiu, v ktorej ide o výhru jednotlivca a nie o výhru kolektívu. Teda forma hry dilema väzňa, kedy sa snažím neísť do väzenia za každú cenu. V sieťach nejde o jednotlivca, nakoľko v našom scenári berieme do úvahy rovnocenné zariadenia, teda snaha je, aby sieť ako celok mala čo najnižšiu hodnotu rušenia a prenos dát bol čo najplynulejší, ako aj čo najrýchlejší. Teda máme zoznam najvhodnejších kanálov. Susediace zariadenia si vzájomne vymenia informácie, ktoré kanály môže zariadenie využiť. Konečné slovo má zariadenie, ktoré je aktuálne na ťahu, teda má možnosť si zvoliť kanál. V reálnej sieti každé zariadenie pracuje samostatne a nie je ovplyvnené inými zariadeniami, no v simulačnom prostredí je potrebné si stanoviť poradie, aby bolo možné simulovať daný scenár. Uvažujeme o spolupracujúcich zariadeniach rozmiestnených v rovinatej oblasti. Vzťah medzi dvoma zariadeniami zobrazuje obr. 4, kde je zvolená stratégia spolupráce pre dosiahnutie optimal-

izácie siete a nie jednotlivcov v sieti. Každý jeden hráč spraví ťah, podľa tohto ťahu hráča sa musia ostatní prispôbiť a zvoliť vhodnú stratégiu, aby získali určitý progres a nie stratili. Každá akcia má svoju reakciu – rovnako je to aj v hrách – ak hráč spraví ťah, ovplyvní ostatných. Stratégia hry reprezentuje ako bude postupovať zariadenie pri výbere vhodného kanála na komunikáciu. Status spolupráce medzi zariadeniami reprezentuje, či si dané zariadenia vzájomne zdieľajú, ale hlavne vymieňajú si tieto informácie. Princíp tejto logiky pracuje na každom zariadení rovnako, samostatne a nezávisle. Takže je možné súčasne používať túto metódu hodnotenia na každom zariadení v rovnakom čase. Hlavným kritériom pri výbere je parameter SIR považovaný za najdôležitejší, keďže sa určuje podľa informáciách získaných snímaním spektra, ako aj so signalizačných dát prijatých od susediacich zariadení. Nie je vhodné využívať kanál, ktorý je rušený a nebude možné posielat dáta pomocou neho. Je minimálne potrebné zvoliť taký kanál, v ktorom bude aspoň minimálna akceptovateľná hodnota, pri ktorej bude možné posielat dáta. Snaha pri výbere je preto proces výberu orientovať na kanál s čo najnižšou hodnotou rušenia a tým dosiahnuť vyššej rýchlosti, ako aj kvality spojenia. Taktiež sa v tomto parametre zohľadňuje RSS ako vplyv rušenia. Kanál je inak ovplyvňovaný, ak zariadenie využívajúce rušiaci kanál sa nachádza na hranici rádiového dosahu, ako keď sa toto zariadenie nachádza neďaleko vyšetřovaného zariadenia, ktoré sa rozhoduje o výbere komunikačného kanála. Každá metóda sa snaží vykonať ohodnotenie a výber kanála za čo najkratší čas. Vo zvolenej hre spolu so stratégiou výberu je tento proces rýchlejší ako pri fuzzy logike. Ide o rýchlejšiu metódu, nakoľko pracujeme s hodnotami boolovskej algebry na ohodnotenie parametra. Kanál považujeme za vhodný, ak je vhodné SIR a prevádzka je nižšia ako vysoká, pričom je vhodné, aby RSS hodnota bola čo najnižšia. Pri výbere sa využíva aj rozhodovacia hodnota na zmenu kanála, aby nedochádzalo k tejto zmene pri každej jednej iterácii z celkového počtu 20 iterácií. Rozhodovacia hodnota obmedzuje zmenu kanála iba na prípady, kedy pri zmene bude dosiahnuté minimálne potrebné zlepšenie ohodnotenia voči predošle zvoleného kanála.



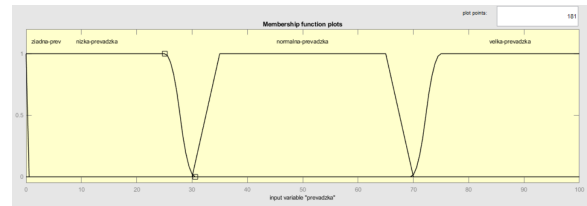
Obr. 5. Proces výberu kanála podľa fuzzy logiky.

**B. Fuzzy logika ako metóda prerozdeľovania spektra**

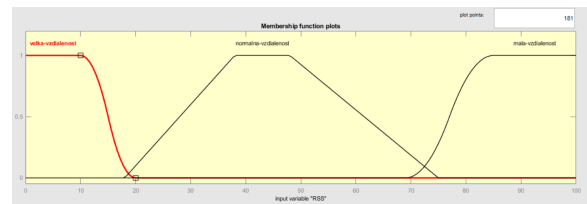
Fuzzy logika (FL) je využitá z dôvodu presnejšieho ohodnotenia jednotlivých kanálov, kedy sa jednotlivé hodnoty parametrov definujú ako interval. FL pracuje aj s čiastočnou pravdou z intervalu [0, 100] a nie iba s boolovskou hodnotou 0 alebo 1. Výhodou pri FL je práve interval hodnôt a nie iba vhodnosť prípadne nevhodnosť. Obr. 5 zobrazuje princíp fungovania metódy, pričom každý parameter je definovaný funkciou príslušnosti. Prevádzku a jej definovanie podľa funkcií príslušnosti je zobrazená na obr. 7. Hodnotenie je rozdelené do štyroch skupín a to žiadna, nízka, normálna a vysoká prevádzka. Pri tomto parametre je vhodné, ak bude čo najnižšie a teda bude k dispozícii celá kapacita komunikačného kanála. Prijateľné je mať normálnu hodnotu tohto parametra. Ak by kanál mal vysokú prevádzku už nebude veľmi vhodný tento kanál na použitie. Parameter RSS zobrazený na obr. 8, ktorý sa určuje podľa intenzity prijatého signálu zariadením od vysielaného zariadenia v rádiovom dosahu. Interval pre tento parameter je stanovený od hodnoty 0 do hodnoty 100, pričom hodnota 0 je na hranici rádiového dosahu zariadenia. Pri hodnota 100 sú zariadenia vedľa seba a hodnota RSS je maximálna akú je možné dosiahnuť. Hodnota tohto parametra v simulačnom programe sa určuje zo vzdialenosti dvoch zariadení. Pri reálnom prijímaní signálu okrem vzdialenosti vplýva na tento parameter aj prostredie, v ktorom sa vysiela a prijímaný signál nachádza. Parameter považujeme za vhodný, ak je hodnota väčšia ako 30. Pri nižších hodnotách ako je táto hraničná, už nebude signál dostatočne silný a zároveň kvalitný na posielanie dát a môže dochádzať k strate dát. Vhodná hodnota pre zvolenie kanála je, ak tento parameter má hodnotu v intervale medzi 30 a 70 a parameter považujeme za najvhodnejší, ak hodnota je väčšia ako 70. Metóda je formou softvéru umelej inteligencie a preto by sme mohli povedať, že ide o podmnožinu umelej inteligencie. Umeľá inteligencia je charakteristická vykonávaním určitých rozhodovaní na základe určitých vstupov a podmienok, kedy akú hodnotu výstupu zvoliť. Niečo podobné vykonáva aj FL, kde máme vstupné hodnoty a pravidlá, ktoré ovplyvňujú, ktorá kombinácia vstupných parametrov je viac vhodná a ktorá menej vhodná. Systém je možné použiť v akomkoľvek systéme, ktorý obsahuje vstupy a výstupy. Hodí sa na použitie pre nelineárne systémy s viacerými vstupmi a výstupmi. Pri FL stupeň príslušnosti vyjadruje do akej množiny parameter patrí a táto príslušnosť je určená v intervale od 0 – 1 (tento interval je možné upravovať). Mamdaniho metóda využíva orezávanie

1. If (prevádzka is ziadna-prev) and (sir is zle-sir) and (RSS is mala-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)
2. If (prevádzka is ziadna-prev) and (sir is zle-sir) and (RSS is normalna-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)
3. If (prevádzka is ziadna-prev) and (sir is zle-sir) and (RSS is velka-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)
4. If (prevádzka is ziadna-prev) and (sir is vhodne-sir) and (RSS is mala-vzdialenost) then (output1 is velmi-vyhodne) (1)
5. If (prevádzka is ziadna-prev) and (sir is vhodne-sir) and (RSS is normalna-vzdialenost) then (output1 is velmi-vyhodne) (1)
6. If (prevádzka is ziadna-prev) and (sir is vhodne-sir) and (RSS is velka-vzdialenost) then (output1 is velmi-vyhodne) (1)
7. If (prevádzka is nizka-prevádzka) and (sir is zle-sir) and (RSS is mala-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)
8. If (prevádzka is nizka-prevádzka) and (sir is zle-sir) and (RSS is normalna-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)
9. If (prevádzka is nizka-prevádzka) and (sir is zle-sir) and (RSS is velka-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)
10. If (prevádzka is nizka-prevádzka) and (sir is vhodne-sir) and (RSS is mala-vzdialenost) then (output1 is velmi-vyhodne) (1)
11. If (prevádzka is nizka-prevádzka) and (sir is vhodne-sir) and (RSS is normalna-vzdialenost) then (output1 is velmi-vyhodne) (1)
12. If (prevádzka is nizka-prevádzka) and (sir is vhodne-sir) and (RSS is velka-vzdialenost) then (output1 is viac-vyhodne) (1)
13. If (prevádzka is vysoká-prevádzka) and (sir is zle-sir) and (RSS is mala-vzdialenost) then (output1 is nevhodne) (1)

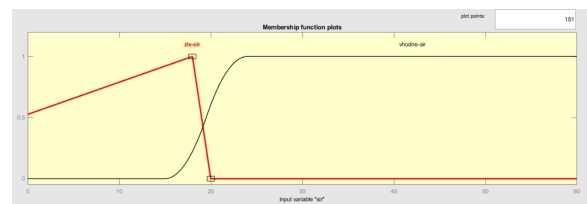
Obr. 6. Pravidlá použité v metóde fuzzy logika na dosiahnutie výstupného ohodnotenia jednotlivých kanálov.



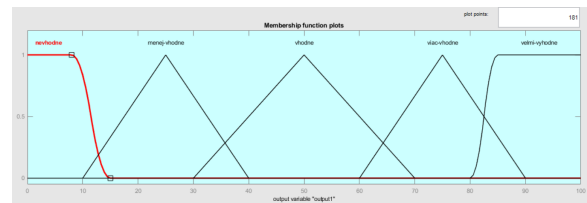
Obr. 7. Definovanie parametra prevádzka pre vstup do FL pomocou funkcií príslušnosti.



Obr. 8. Definovanie parametra RSS pre vstup do FL pomocou funkcií príslušnosti.



Obr. 9. Definovanie parametra SIR pre vstup do FL pomocou funkcií príslušnosti.



Obr. 10. Funkcie príslušnosti pre jednotlivé výstupné hodnoty FL.

výstupnej funkcie príslušnosti na hodnote príslušnosti vstupu. Pri Sugenovej metóde sú fuzzy množiny výstupu zjednodušené takým spôsobom, že majú hodnotu 1 v jedinom bode, všade inde majú hodnotu 0.



### C. Inteligentná metóda prerozdelenia spektra

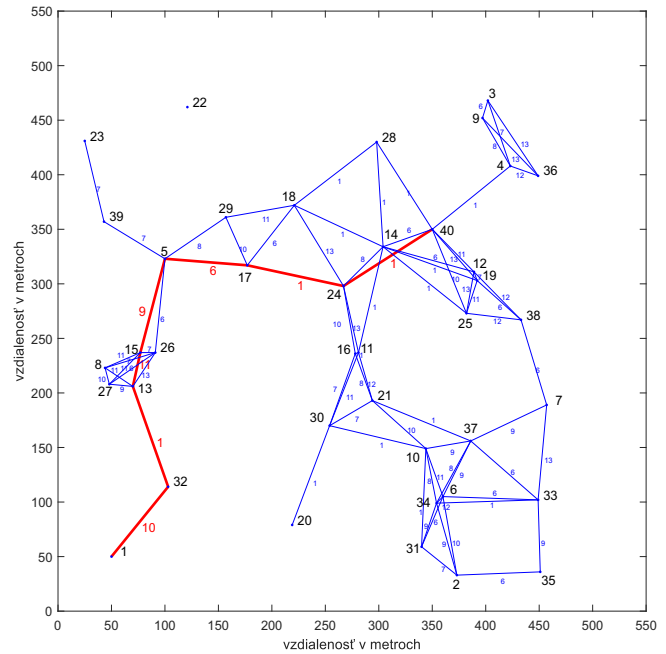
Navrhnutá inteligentná metóda využíva vlastnosti teórií hier a aj fuzzy logiku. Rozdiel oproti predošlej metóde na pridelenie je stanovenie rozhodovacej hodnoty, kedy sa má prepnúť komunikačný kanál. Opakovanie používania metódy reprezentuje využívanie teórie hier v procese prerozdelenia kanálov. Tento proces prebieha v rámci jedného kroku pohybu. Zariadenia sa pohybujú v skúmanej ploche, no v rámci jedného kroku iterácie sa zastavia na dobu, pokiaľ sa simuláciou overí dostupnosť vhodnejšieho kanála. V dôsledku opakovania využívania FL je možné na obrázkoch použitých kanálov v sekcii simulácia vidieť, ako v niektorých spojeniach zvolenej cesty nedochádza k zmene kanála a to je dôsledkom zvolenia si rozhodovacej hodnoty. Táto hodnota je vyjadrená percentami, nakoľko interval výstupnej hodnoty FL je v intervale od 0 do 100. Rozhodovacia hodnota predstavuje o koľko sa musí líšiť rozdiel predošle zvoleného kanála a aktuálne najlepšie ohodnoteného kanála. FL vie veľmi vhodne ohodnotiť podľa pravidiel a vstupných parametrov jednotlivé kanály, nevýhodou je čas potrebný na vyhodnotenie vstupných parametrov oproti zvolenej teórii hier. Využitím opakovania je možné ešte zvýšiť vhodnosť použitia daného kanálu, nakoľko opakovaním je možné doceliť zvolenie vhodnejšieho kanálu, ak bude k dispozícii z pohľadu siete. Keďže ide predovšetkým o optimalizovanie siete ako celku pri zvolenej spolupracujúcej stratégii. Jedna iterácia je vhodná na výber najlepšieho dostupného kanála pre skúmané zariadenie, ale ak si susediace zariadenie zvolí určitý kanál, tak skúmané zariadenie by pri opätovnom ohodnotení mohlo dostať iný vhodný kanál na zmenu. Z tohto dôvodu je vhodné použiť FL viacnásobne. Princíp spočíva v ohodnotení kanálov, pridelenie kanálov každému uzlu podľa najvyššej hodnoty ohodnotenia. Každý jeden uzol si zvolí ten najlepší možný kanál, pričom poradie použitia tejto metódy je rovnaké ako pri metóde FL. Teda číslo zariadenia predstavuje ID zariadenia a zariadenie s nižším číslom použije túto metódu ako prvé. Ide o metódu používanú na každom jednom zariadení samostatne, ale opäť pri simulácii je potrebné zachovať isté poradie. No v reálnej prevádzke systému na zariadeniach bude prebiehať hodnotiacia metóda samostatne na každom zariadení. Teda po spustení vyhodnotí zariadenie, ktorý kanál je najvhodnejší a ten sa zvolí. Typ hry, ktorý sa využije v tomto návrhu k prideleniu kanálov pre bezdrôtové siete, je formou podobný dileme väzňa. Nakoľko nevieme dopredu povedať čo daný hráč spraví, ale predpokladáme, že sa bude snažiť zvoliť si taký ťah, aby sa zlepšila hodnota pre celé zoskupenie a nielen pre jednotlivca. Teda ide o stratégiu, v ktorej zariadenia majú spolupracovať a zdieľať získané informácie a tým zlepšiť manažment. Zariadenie vykoná snímanie spektra. Rovnako pri procese snímania získa toto zariadenie riadiace informácie, ktoré obsahujú informácie o susediacich zariadeniach spolu s informáciou, aké kanály dané zariadenie využíva.

### III. SIMULÁCIE A VÝSLEDKY

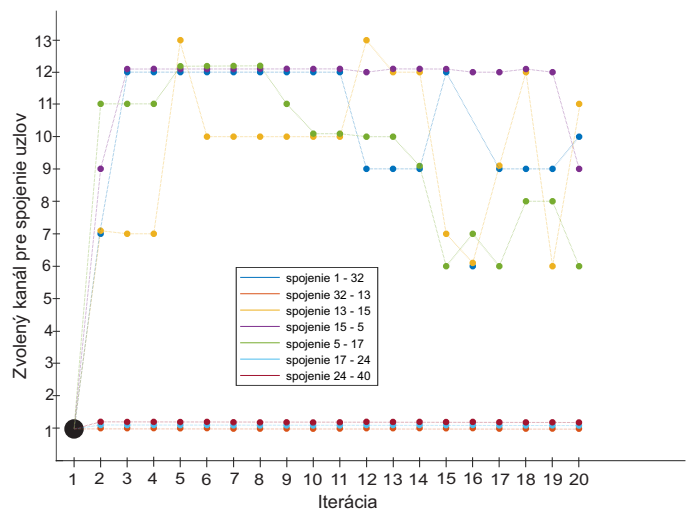
Pre overenie navrhnutých metód je potrebné si definovať jednotlivé parametre a tými sú prevádzka, RSS a hodnota SIR. Hodnota parametra RSS sa určuje podľa intenzity prijatého signálu zariadením od vysielaného zariadenia v rádiovom dosahu. RSS je nízke, ak vzdialenosť je veľká, teda hodnota je menšia ako 30. Normálna hodnota RSS je, ak vzdialenosť má hodnotu v intervale medzi 30 a 70. Vysoká hodnota RSS je, ak vzdialenosť je malá pre RSS väčšia ako 70. Parameter prevádzky je na začiatku simulácie definovaný ako hodnota 10 pre počiatočný kanál. Následne sa prevádzka vygeneruje v rozsahu od 10 do 90 pri zmene kanála spojenia dvoch zariadení. Hodnota parametra SIR sa určuje podľa zariadení v rádiovom dosahu a ich využívaných kanáloch a intenzita tohto ovplyvňovania je podľa ich vzdialenosti. Zariadenie nachádzajúce sa bližšie ovplyvňuje spojenie viac ako zariadenie nachádzajúce sa vo veľkej vzdialenosti. Pre lepšiu prehľadnosť výsledkov je zvolená cesta zo zdrojového zariadenia Z1 do cieľového Z40 a na tejto ceste je zobrazené, ako sa menia použité kanály a tiež ako sa mení ohodnotenie tohto spojenia. Cesta je zvolená pomocou algoritmu dijkstra, teda určenia najkratšej cesty medzi dvoma zariadeniami na základe spojení, ktoré sa nachádzajú v skúmanej sieti. Nakoľko pri simulovaní je potrebné stanoviť si poradie ako bude prebiehať vyhodnocovanie, každé zariadenie má svoje ID číslo, toto číslo reprezentuje poradie vyhodnocovania. V simulácii toto číslo označuje poradie, na ktorom zariadení sa spustí metóda. Prvý ťah vykoná zariadenie Z1 a bude to voľba kanála pre susediace zariadenie s najnižším ID číslom po zvolení tohto komunikačného kanála bude voľba kanálu pre ďalšie spojenie so zariadením s vyšším ID číslom. Ak nebude mať zariadenie žiadne ďalšie susediace zariadenia, prejde sa na výber pre nasledujúce zariadenie podľa ID poradia. Zariadenie Z2 vykoná svoj ťah podobne, ako to spravilo zariadenie Z1. Rozdiel bude iba v tom, že bude potrebné zohľadňovať výber zariadenia Z1 a vykonať ťah vzhľadom na predchádzajúci výber. Nakoľko pri simuláciách je zvolená stratégia zdieľania informácií a teda snaha o dosiahnutie použitia optimálnych kanálov a dosiahnutie optimálnosti siete a nie zmena kanála pre dané zariadenie. Na začiatku simulácie je všetkým spojeniam priradený kanál 1. A to z dôvodu, aby bolo možné vykonať počiatočné nastavenie, ako aj počiatočné výpočty na porovnanie pri voľbe nového kanála v druhej iterácii. Každý jeden uzol vie v jednom časovom okamihu používať iba jedno spojenie k svojmu susediacemu zariadeniu. Jednotlivé pridelené kanály pre spojenie dvoch zariadení predstavuje iba prípravu kanála na ich komunikáciu, ak bude potrebné vykonať prenos dát. Zmena týchto kanálov prebieha v každom jednom časovom kroku, kedy dochádza k zmene pohybu. V jednom časovom okamihu, kedy sa zariadenia nehýbu, je vykonaných 20 iterácií. Každá iterácia si zvolí vhodnejší kanál, ak je podľa stanovených podmienok k dispozícii.

A. Návrh teórie hier ako metódy prerozdelenia spektra

Pri využívaní teórie hier (TH) je zvolený vhodný kanál pre každé jedno susediace zariadenie. Každé zariadenie je schopné komunikovať iba s jedným zariadením v jednom časovom okamihu, teda ide o pripravenosť zariadení pre nastavenie a začatie prenosu dát v spojení. Pri tejto simulácii nie je správne a dostatočné si stanoviť limitnú hodnotu *threshold* na zvolenie vhodného kanála a to z dôvodu zmien vstupných parametrov pri každom časovom kroku, kedy nastane pohyb zariadení. Pri zmene pohybu nastane zhoršenie, prípadne zlepšenie parametrov a stanovením jednej pevnej hodnoty sa obmedzí výber vhodného kanála. A nie je možné si určiť všeobecnú hodnotu vhodnú pre každú jednu možnú situáciu, kedy by sa vykonala zmena a kedy nie. Bolo by to možné iba ak by bol určený jeden najdôležitejší parameter a následne, ak je splnená hodnota tohto parametra je možné ďalej hodnotiť kvalitu spojenia. Preto vhodnejšie je stanoviť si rozdiel ohodnotenia aktuálneho možného použitého kanála a ohodnotenie predošle zvoleného kanála. A využívať históriu použitého kanála v predošlom časovom okamihu. Ohodnotenie, ak by sme použili predošlé, nešlo by o aktuálnu informáciu, nakoľko v nasledujúcom časovom okamihu nastáva zmena polohy jednotlivých zariadení a to ovplyvňuje hodnotu používaných parametrov. Z toho dôvodu sa použije hodnotenie predošle zvoleného kanála v aktuálne vyšetřovanom časovom okamihu voči možnému použiteľnému kanálu. Ak je táto hodnota väčšia ako rozhodovacia hodnota, môžeme vykonať zmenu kanála. V jednom okamihu daná hodnota bude dostatočná, v nasledujúcom bude nedostatočná. Ohodnotenie by bolo možné dodatočnými pravidlami a šlo by o kombináciu TH a pravidiel a to by smerovalo k použitiu princípu zjednodušenej verzii fuzzy logiky. Výsledné pridelenie kanálov podľa tejto metódy je zobrazené na obr. 11, v ktorom je zvýraznená vyšetřovaná cesta zo zdrojového zariadenia do cieľového. Analyzovanie jednotlivých spojení a použitých kanálov medzi zariadeniami je na tejto zvolenej ceste. V TH sa využíva práve ten kanál, ktorý je najlepší z pohľadu SIR, ktorý určujeme podľa parametra RSS. Zároveň porovnávame hodnotu SIR medzi aktuálnym vyšetřovaným kanálom a predošle zvoleného kanála. Rozdiel týchto hodnôt musí byť väčší ako hodnota 20. Táto hodnota predstavuje rozdiel hodnoty predošle zvoleného kanála a kanála s najlepšou hodnotou ohodnotenia podľa parametra SIR, pričom tento parameter ovplyvňuje RSS hodnotu. Aby neprebíhalo prepínanie kanála v každej iterácii, ak prípadná zmena kanála nemá pozitívny úžitok. Ako aj scenáru, kedy zmena by bola nižšia ako stanovená rozhodovacia hodnota, teda zmena by nepriniesla podstatnejšie zlepšenie hodnotenia. Snaha je použiť neprekrývajúce sa kanály, nakoľko sú najvhodnejšie a až následne sa používajú zvyšné kanály s istou hodnotou rušenia, no vždy je snaha vybrať taký, aby bolo toto rušenie, čo najnižšie. Obr. 12 zobrazuje zvolené kanály pre jednotlivé iterácie pri použití tejto metódy. Pričom v každej iterácii, ak je vhodnejší kanál na použitie, tak sa využije podľa stanovenej rozhodovacej úrovne. V prípade, ak nebude k dispozícii vhodnejší ako aktuálne zvolený kanál,

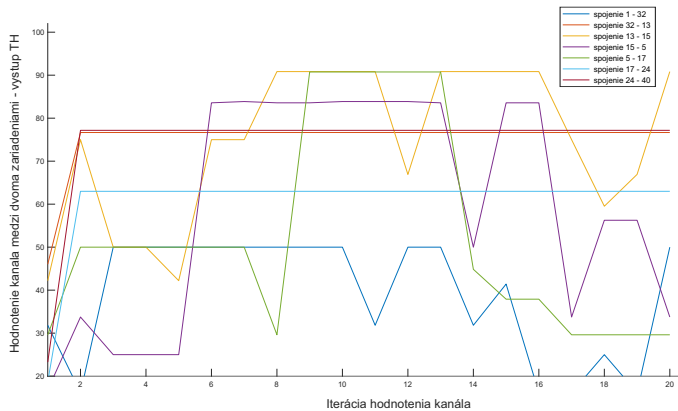


Obr. 11. Topológia siete prerozdelením kanálov podľa metódy teórie hier.



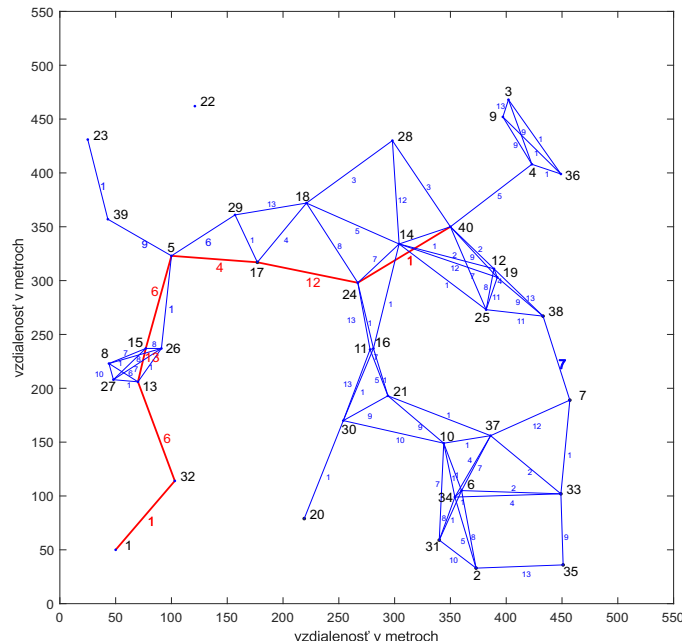
Obr. 12. Použité kanály na zvolenej ceste podľa teórie hier.

nenastane zmena, prípadne, ak by zmena nebola dostatočne výhodná, nie je dôvod vykonávať zmenu pre nízku hodnotu zlepšenia ako je stanovená. Obrázok vyjadruje ako zariadenie potrebuje aj niekoľko krokov iterácie aby mohlo prepnúť na vhodnejší kanál a práve toto čakanie je spôsobené ťahmi, ktoré vykonávajú ostatné zariadenia v sieti. Pre optimalizovanie siete je potrebných viac ako len dva kroky iterácií. Pri jednom kroku výberu sa zariadenie orientuje iba na využitie vhodnejšieho kanála ako je ten aktuálny, no pri viacnásobnom používaní sa vyhodnocujú výbery ostatných zariadení, ktoré už vykonali zmenu v predošlej iterácii a je snaha zlepšiť už aktuálne zvolený vhodnejší kanál. Zmena môže nastať, nakoľko niektoré zariadenia si mohli zvoliť práve tie kanály, ktoré zlepšia výber



Obr. 13. Hodnotenie použitých kanálov na zvolenej ceste podľa teórie hier.

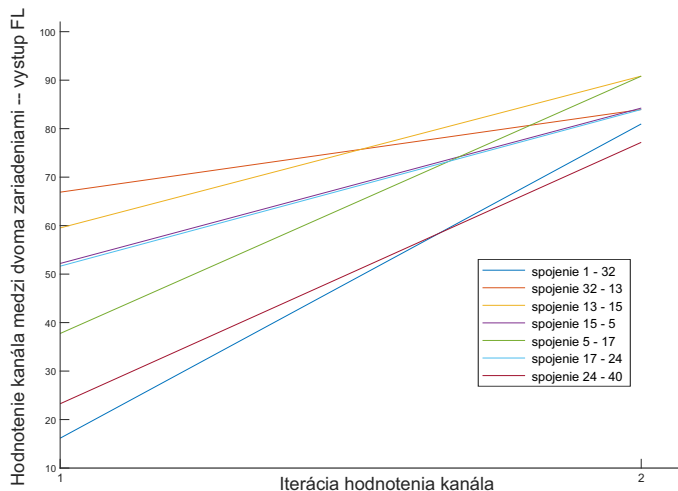
aktuálne vyšetřovaného a je možné vybrať opätovne lepší kanál ako je ten aktuálny. Na obr. 13 je zobrazené ohodnotenie jednotlivých používaných kanálov počas 20 iterácií, kedy je snaha zvoliť optimálny kanál pre zvolené spojenie v každom jednom kroku iterácie z dostupných parametrov vyjadrujú kvalitu spojenia. Prevádzka ako parameter ovplyvňuje hodnotenie zvoleného spojenia, nakoľko k jej zmene dochádza pri prepnutí zvoleného kanála. V niektorých prípadoch je ohodnotenie rovnaké ako predošlé, no na zachovanie tohto ohodnotenia je potrebná práve zmena kanála. Každý jeden krok v procese výberu je zvolený najvhodnejší kanál ako bol ten predošlý, ak je rozdiel hodnotenia viac ako 20%. Podľa tejto rozhodovacej hodnoty v niektorých spojeniach na zvolenej ceste sú zmeny kanálov nemenné niekoľko iterácií. Hodnotenie v tejto simulácii sa mení častejšie z dôvodu zmeny nielen hodnoty SIR, ale aj pre generovanie novej hodnoty prevádzky pri vykonaní tejto zmeny kanála. Ohodnotenie a teda výsledná hodnota kvality spojenia je pomocou FL, ktorá pracuje s tromi parametrami RSS, SIR a prevádzka. Podrobné popísanie tohto hodnotenia je v nasledujúcej kapitole venovanej simuláciám pri využívaní FL. Ohodnotenie na vytvorenie tohto obrázku je rovnakou metódou ako pri fuzzy logike a inteligentnej metóde a to pre porovnanie týchto troch metód a výber komunikačného kanála. Proces výberu kanála je závislý od vstupných parametrov a ich porovnávaní z predošle zvolenou hodnotou toho istého parametra. TH pracuje so vstupnými parametrami a ich hodnotami priamo. Fuzzy logika potrebuje pravidlá a funkcie na definovanie vhodnosti jednotlivých parametrov a ich rozdelenie do skupín, ktoré budú označovať, kedy je daný parameter viac vhodný a kedy len vhodný. Pri zvolenej metóde sa stanovuje rozhodovacia hodnota rozdielu ako aj potrebná hodnota prevádzky, aby sme mohli využiť daný kanál pre spojenie.



Obr. 14. Prerzdelenie kanálov podľa metódy fuzzy logiky.

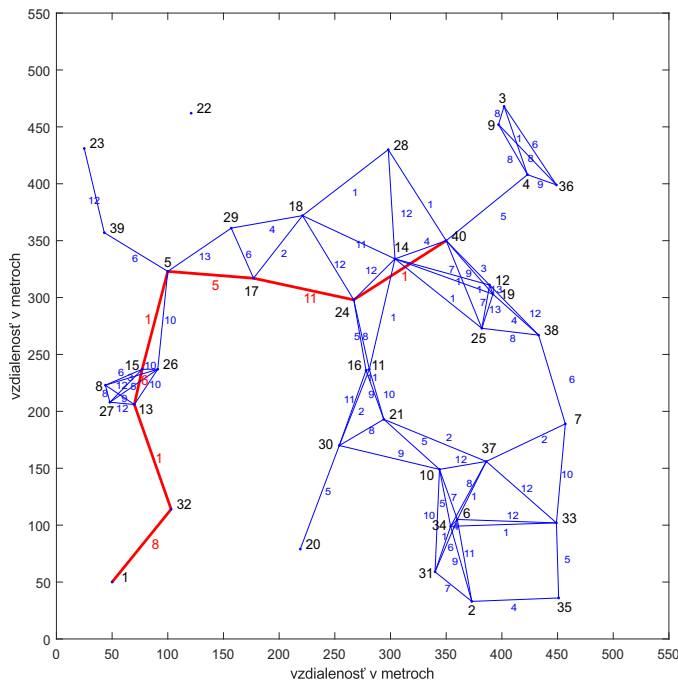
### B. Návrh fuzzy logiky ako metódy prerzdelenia spektra

Fuzzy logika ako použitá metóda je zameraná na rozdelenie kanálov a tým optimalizovať sieť. Je potrebné brať do úvahy aj prípad, kedy sú pridelené rovnaké kanály na komunikáciu medzi rôznymi uzlami. V topológii na obr. 14 môžeme vidieť zvolené kanály pre jednotlivé zariadenia, ale v jednom okamihu zariadenie je schopné komunikovať iba s jedným susediacim zariadením. Ostatné kanály sú pripravené na prípadnú komunikáciu so susedmi. Funkcie príslušnosti používajú trojuholníkový tvar funkcie na definovanie jednotlivých hodnôt v krajných prípadoch intervalu a funkcia lichobežníkového tvaru sa používa v ostatných hodnotách parametra. Priebeh týchto funkcií je možné vidieť v predchádzajúcej kapitole. Logika používa pravidlá, na základe ktorých sa stanovuje, či je daný výrok pravdivý alebo nepravdivý. V tomto prípade uvažujeme o pravidlách, vychádzajúc z hodnôt parametrov RSS, prevádzka a SIR. Hodnotu RSS je schopné mobilné zariadenie si zmerať a určiť na základe intenzity prijatého signálu. Teda predpokladáme, že zariadenie je schopné určiť si túto hodnotu, a preto využívame na definovanie iba vzdialenosť dvoch zariadení, ktorá nám určí hodnotu tohto parametra. Výsledná hodnota fuzzy logiky na základe stanovených pravidiel je *viac vyhovujúca, menej vyhovujúca, vyhovujúca* prípadne *nevyhovujúca*, priebeh tejto funkcie príslušnosti je zobrazený na obr. 10. Po stanovení pravidiel fuzzy logiky prebehne simulácia, v ktorej sa podľa vyhodnotenia parametrov (RSS, prevádzky, SIR) na základe definovaných pravidiel postupne vyhodnocuje výhodnosť použitia jednotlivých kanálov. Výsledkom fuzzy logiky je hodnota pre každý jeden kanál. Táto hodnota predstavuje výhodnosť použitia daného kanála. Výsledná hodnota je stanovená podľa vstupných parametrov a pravidiel teda ide o ohodnotenie



Obr. 15. Hodnotenie použitých kanálov na zvolenej ceste.

kanálov pre spojenie dvoch zariadení na základe informácií získaných z okolia ako aj prenosom informačných dát. Zariadenie si takto zvolí kanál s najvyššou hodnotou, nakoľko ide o najvhodnejší kanál. Následne pomocou fuzzy logiky sú kanály prerozdelené pomocou stanovených a opísaných pravidiel. Pravidlá sú definované pre jednotlivé hodnoty vstupných parametrov. Simulácia obsahuje 40 zariadení a poradie voľby komunikačného kanála je podľa poradia. Tento proces môžeme priradiť k výberu kanála na základe MAC adresy, kde sa určí poradie podľa hodnoty tejto adresy. V tejto metóde výberu je iba jedna iterácia okrem počiatočného stavu, aby výber bol jednorázový. Ak by bol v simulácii použitý pohyb, tento výber kanála sa bude opakovať pri zmene pohybu pre každé jedno zariadenie nezávisle od seba iba podľa poradia ID teda čísla zariadenia. V reálnej prevádzke každé zariadenie si získa potrebné informácie a vykoná proces prerozdelenia kanálov pomocou tejto metódy. FL ako metóda na základe vstupov určí výstupnú hodnotu (ide o jednu iteráciu, kedy sa vyberie ten najvhodnejší kanál). Na prerozdelenie a zlepšenie kvality siete je postačujúce zvoliť si túto metódu, nakoľko jednotlivé zariadenia si zvolia optimálny kanál na komunikáciu z dostupných a zároveň vhodných na použitie. Každé zariadenie reaguje na predošle zvolené kanále jednotlivých zariadení a výber kanála je z ohľadom na ich výber. Obr. 15 zobrazuje ohodnotenie zvolených kanálov pre spojenie dvoch zariadení na zvolenej ceste medzi zdrojovým a cieľovým zariadením. Počiatočné ohodnotenie je nízke, ak je v okolí veľký počet rušiacich zariadení. Pri zmene na vhodnejší kanál dochádza k vyššiemu ohodnoteniu pomocou fuzzy logiky. V nasledujúcej metóde sa využije práve tento spôsob vyhodnocovania, v ktorom je na definovanie kanála použitý interval a nie iba ohodnotenie boolovského typu.



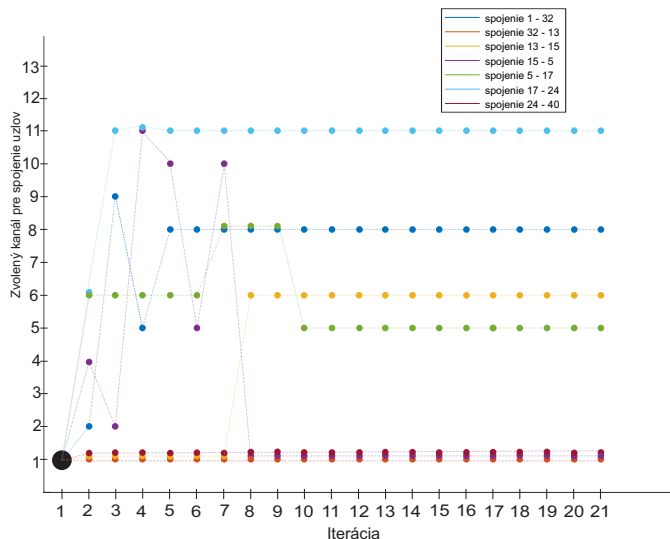
Obr. 16. Topológia siete prerozdelením kanálov podľa inteligentnej metódy.

C. Návrh inteligentnej metódy na prerozdelenie spektra

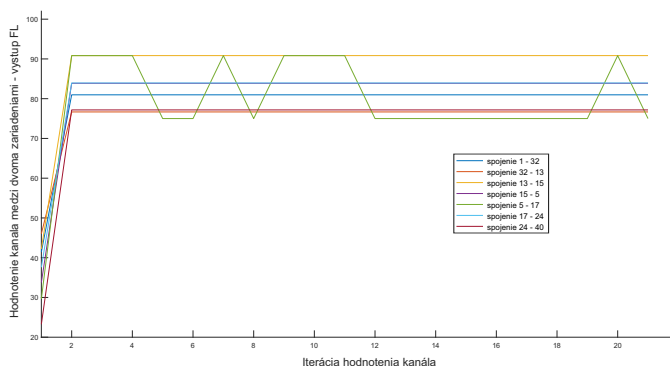
V simulácií pre inteligentné prerozdelenie kanálov sa používa 20 iterácií, aby sa vykonala zmena využívaných kanálov, ak je to možné v rámci jedného časového kroku, kedy zariadenia nemenia svoju polohu. Proces prerozdelenia kanálov je proces, ktorý prebehne v rámci dvoch časových úsekov, v ktorých sa zariadenia pohnú z pôvodného miesta na nové. Na získanie vstupných parametrov do metódy je potrebný čas no následné rozhodovanie a prepnutie sa vykoná v rámci jedného časového kroku. Zmena nastane, ak je rozdiel ohodnotenia aktuálne najlepšieho kanála a predošle zvoleného kanála väčší ako stanovený rozhodovací rozdiel potrebný na vykonanie zmeny. Ak nastane situácia, kedy bude hodnota zvoleného kanála rovnaká ako predošle zvolený kanál, tak sa kanál nezmení. Využitím opakovania ohodnotenia kanálov je možné nájsť optimálny komunikačný kanál pre každý jeden uzol. Pri opakovaných simuláciách sa zistilo, že počet opakovaní nemusí byť veľký, nakoľko pri opakovaní nedochádza k tak razantným zvyšovaniam hodnotenia kanála, ak je zvolená vhodne rozhodovacia hodnota. Najväčší skok je práve v druhej iterácii, kedy z pridelenia komunikačného kanála 1 sa podľa parametrov zmení na vhodnejší pomocou fuzzy logiky. Následné ohodnocovanie možných využívaných kanálov sa ohodnotenie znižuje z dôvodu využívania všetkých 13 kanálov pre jednotlivé zariadenia a nebude dosiahnuté tak nízke rušenie. Výstupom tejto metódy a konečné pridelenie kanálov pre jednotlivé spojenia zariadení je zobrazené na obr. 16. Na tomto obrázku je pre každé spojenie dvoch uzlov pridelený komunikačný kanál no v jednom okamihu bude možné komunikovať iba s jedným zariadením a teda ostatné spojenia sa nebudú používať. Zvýraznené cesta je zo zdrojového zari-

adenia do cieľového podľa algoritmu dijkstra založeného na výpočet najkratšej cesty podľa spojení medzi zariadeniami v sieti. Ohodnotenie jednotlivých parametrov je podľa FL teda spôsobu ako je opísaný v predchádzajúcej kapitole. Rovnako spôsob vyhodnocovania je za pomoci pravidiel a funkcií príslušnosti pre jednotlivé parametre ako pri fuzzy logike. Inteligentná metóda využíva ohodnotenie kanálov pomocou fuzzy logiky, zároveň pri výbere sa zohľadňuje zdieľanie informácií medzi zariadeniami a teda stratégia spolupráce zariadení.

Nasledujúci obr. 17 zobrazuje celkový priebeh zmien kanálov počas celkového trvania iterácií v jednom časovom okamihu. Je vidieť ako zmena kanálov nastáva do 10. iterácie a už pri 8. iterácii je nastavený optimálny kanál skoro pre každé jedno spojenie pre zvolenú cestu okrem jedného spojenia 5 – 17, ktoré potrebuje ďalšie dve iterácie na ukončenie procesu výberu optimálneho kanála. Zmena nastáva ako bolo spomenuté skôr, ak výsledné ohodnotenie predošle zvoleného kanála a aktuálne najlepšie ohodnoteného kanála je viac ako 20. Teda zmena kanála bude znamenať zlepšenie ohodnotenie kanála o 20% a túto hodnotu považujeme za dostatočne výhodnú, aby sa vykonala zmena kanála. Ohodnotenie kanála je z intervalu 0 do 100, teda rozdiel môžeme považovať za zmenu o 20% nakoľko toto ohodnotenie je bezrozmerné číslo. Pri tejto zvolenej hodnote je možné na príslušnom obrázku tohto scenára vidieť, ako sa ohodnotenie práve v prípade spojenia 5 – 17 mení do 10. iterácie z celkového trvania iterácií. Ostatné spojenia si zachovávajú hodnotu ohodnotenia používaného kanála. Pri zvolení si nižšej rozhodovacej hodnoty sa zvýši počet zmien vykonaných na jednotlivých spojeniach medzi skúmanými zariadeniami na zvolenej ceste. Oproti tomu, ak sa stanoví rozhodovacia hodnota na 30 prípadne viac, tak nebude prebiehať zmena kanála tak často a bude postačovať aj 5 iterácií na dosiahnutie optimálneho zvolenia kanálov pre zvolenú cestu. Nezmení sa kanál, nakoľko je potrebné, aby rozdiel predošle zvoleného a aktuálne vyšetřovaného kanála na použitie je viac ako zvolená hodnota. Ohodnotenie použitých kanálov na zvolenej ceste je zobrazené na obr. 18. Je možné vidieť ako pre zachovanie ohodnotenia kanála je potrebné v niektorých prípadoch zmenu kanála. Podľa tohto obrázku je aj zrejmé, že nastane prípad, kedy si zariadenie zachová ohodnotenie kanála aj pri nezmenenom používaní kanála. Ide o prípady, v ktorých nie je veľký počet susediacich zariadení, ktoré môžu ovplyvňovať jednotlivé komunikačné kanály a teda sa nebude meniť ohodnotenie používaného kanála. Prípadne stav kedy susediace zariadenie zmenilo kanál na vhodnejší a táto zmena pomohla zachovať si hodnotenie aj pre zariadenie, ktoré nevykonalo zmenu kanála. Ak si zariadenie zachová kanál a susediace zariadenia si zvolí vhodnejší tak z pohľadu skúmaného sa ohodnotenie zníži, no je stále dostatočné na zachovanie kvalitného spojenia. Ak vhodnejší kanál nie je k dispozícii. Snaha je o zlepšenie siete ako celku a preto je možné akceptovať aj zhoršenie hodnotenia používaného kanála, ak je táto hodnota prijateľná a nespôsobí razantné zníženie kvality spojenia a to až na neakceptovanú úroveň. Tieto obrázky ukazujú iba zmenu hodnotenia a používania



Obr. 17. Použité kanály na zvolenej ceste podľa inteligentnej metódy.



Obr. 18. Hodnotenie použitých kanálov na zvolenej ceste.

kanálov na zvolenej ceste, no ostatné zariadenia rovnako v jednotlivých iteráciách menia používané kanály a tie ovplyvnia výslednú hodnotu.

#### IV. ZÁVER

Článok sa zameriava na manažment rádiových zdrojov pre bezdrôtové mobilné siete, v ktorých je možné využívať rôzne modely pohybu. Efektívne rozdelenie kanálov sa vykonáva prostredníctvom fuzzy logiky, teórii hier a poslednou metódou je inteligentná metóda vytvorená kombináciou teórii hier a fuzzy logiky. Pre vhodné fungovanie manažmentu pridelovania kanálov bolo potrebné zvoliť vhodné parametre, ktoré charakterizujú kvalitu spojenia v dostatočnej miere. Zvolená hra a stratégia v simuláciách sa orientuje viac na rýchlosť, ale za cenu presnosti ohodnotenia jednotlivých parametrov vo zvolenej stratégii dilemy vážna použitej v simuláciách. No je ukázané ako pri určení si počtu iterácií a rozhodovacej hodnoty je možné docieľiť optimalizovanie voľby kanála podľa t'ahov predošlých zariadení. Zároveň vhodnou hodnotou rozhodovania sa obmedzí neustála zmena kanála, ak zmena neprinesie postačujúce zlepšenie. Pri použití FL je za cenu dlhšieho trvania ohodnotenia vyššia presnosť v definovaní jednotlivých

parametrov, nakoľko FL dovoľuje definovať parameter aj čiastočne a nie iba binárnou hodnotou. Pri jednej iterácii je manažment rýchlejší oproti inteligentnej metóde, nakoľko je potrebné zmeniť kanále pre spojenia iba raz. Pri inteligentnej metóde je potrebný čas na vykonanie viacerých iterácií. Ak sa počet vstupov bude zväčšovať, tak rovnako sa bude aj predlžovať proces ohodnotenia. Nie je to veľmi vhodné, ak čas potrebný na vykonanie zmeny bude trvať niekoľko sekúnd, kedy sa zmenia vstupné parametre a ich ohodnotenie už nebude aktuálne. Nakoľko využívanie tejto metódy má byť na mobilných zariadeniach, kde sa používateľ môže pohybovať a teda parametre sa budú meniť pomerne rýchlo.

#### POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla v spolupráci Ministerstva školstva Slovenskej republiky pod výskumom VEGA 1/0492/18, KEGA 046TUKE-4/2018 a APVV-17-0208.

#### LITERATÚRA

- [1] Afroz, F.; Subramanian, R.; Heidarz, R.; Sandrasegaran, K.; Ahmed, S.; SINR, RSRP, RSSI and RSRQ measurements in long term evolution networks, International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), Vol. 7, No. 4, August 2015.
- [2] Ahmed, E.; Gani, A.; Abolfayli, S.; Yao, L. J.; Khan, U.; Channel assignment algorithms in cognitive radio networks: taxonomy, open issues, and challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014.
- [3] Akyildiz, I. F.; Lee, W.-Y.; Vuran, M. C.; Mohanty, S.; Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey, Elsevier, Computer Networks 50, 2006.
- [4] Arslan, H.; Cognitive radio software defined radio, and adaptive wireless system, Springer, 2007.
- [5] Başar, T.; Zaccour, G.; editors. Handbook of Dynamic Game Theory. Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-44374-4, 2018.
- [6] Dadios, E., P.; Fuzzy logic – controls, concepts, theories and applications, InTech, ISBN 978-953-51-0396-7, First published March, 2012, Printed in Croatia, 2012.
- [7] Han, Z.; Niyato, D.; Saad, W.; Başar T.; Hjørungnes, A.; Game theory in wireless and communications networks Theory, Models, and Applications, Cambridge University Press 2012.
- [8] Hossain, E.; Rasti, M.; Bao Le, L.; Radio Resource Management in Wireless Networks An Engineering Approach, Cambridge University Press, ISBN: 978-1-107-10249, 2017.
- [9] Hrabčák, D.; Matis, M.; Nezník, D.; Doboš, L.; Papaj, J.; Proposal of simple metrics for evaluation of social ties in mobility models for MANET networks, In: ELMAR 2017. Zagreb: University of Zagreb, p. 87–90, ISBN 978-953-184-230-3, 2017.
- [10] Matis, M.; Nezník, D.; Hrabčák, D.; Doboš, L.; Intelligent channel assigning in CR-MANET based on spectrum sensing, In: ELMAR 2017. Zagreb: University of Zagreb, p. 83–86, ISBN 978-953-184-230-3, 2017.
- [11] Munoz-Garcia, F.; Toro-Gonzalez, D.; Strategy and Game Theory: Practice Exercises with Answers, Springer; 2nd ed. edition, ISBN: 978-3-030-11902-0, 2019.
- [12] Nezník, D.; Doboš, L.; Fuzzy logika ako nástroj na hodnotenie kanálov v CR-MANET. In: Electrical Engineering and Informatics 9: proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. Košice: FEI TU, s. 263–267, ISBN 978-80-553-2713-6, 2018.
- [13] Nezník, D.; Doboš, L.; Fuzzy logic based channel ranking for CR-MANET, In: Radioelektronika 2018: 28th International conference. Prague, Czech Republic. April 19-20, 2018. Piscataway (USA): Institute of Electrical and Electronics Engineers, s. 1–5, ISBN 978-1-5386-2485-2, 2018.
- [14] Nezník, D.; Game theory for wireless networks, In: SCYR 2019. Košice: TU, 2019 s. 89–90, ISBN 978-80-553-3273-4, 2019.
- [15] Nezník, D.; Channel ranking in wireless network with CR, In: SCYR 2018. Košice: TU, s. 51–52, ISBN 978-80-553-2972-7, 2018.
- [16] Nezník, D.; Doboš, L.; Manažment frekvenčného spektra v bezdrôtových sieťach s CR technológiou, 2018. In: Electrical Engineering and Informatics 9: proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. Košice: FEI TU, s. 448–451, ISBN 978-80-553-2713-6, 2018.
- [17] Nezník, D.; Doboš, L.; Papaj, J.; Radio resource management for wireless networks, In: Radioelektronika 2019: 29th International conference. Danvers (USA): Institute of Electrical and Electronics Engineers s. 317–322 [USB-key, print], ISBN 978-1-5386-9323-0, Czech Republic, 16–18 April 2019.
- [18] Nezník, D.; Doboš, L.; Papaj, J.; Teória hier pre bezdrôtové siete, In: Electrical Engineering and Informatics 10: Proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. Košice (Slovensko): Technická univerzita v Košiciach s. 290–294, ISBN 978-80-553-3342-7, 2019.
- [19] Pandit, S.; Singh, G.; Spectrum sharing in cognitive radio networks, Springer, 2017.
- [20] Perahia, E.; Stacey, R.; Next generation wireless LANs Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n, Cambridge University Press, 2013.
- [21] Setoodeh, P.; Haykin, S.; Fundamentals of cognitive radio, Wiley, 2017.
- [22] Song, J. B.; Li, H.; Coupechoux, M.; Game Theory for Networking Applications., 2019, Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-93058-9.
- [23] Tomar, G.; Bagwari, A.; Kanti, J.; Cognitive radio networks and applications, Taylor & Francis Group, LLC, 2017.
- [24] Trestian, R., Ormond, O., Muntean, G.-M., Game theory-based network selection: Solutions and challenges. IEEE Communications surveys & tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 1212–1231, 2012.
- [25] Wang, Ch.; A Study of Membership Functions on Mamdani-Type Fuzzy Inference System for Industrial Decision-Making, A Thesis Presented to the Graduate and Research Committee of Lehigh University in Candidacy for the Degree of Masters of Science in Mechanical Engineering and Mechanics Lehigh University, 2015.
- [26] Wyglinski, A. M.; Nekovee, M.; Hou, T.; Cognitive radio communications and networks, Elsevier, 2010.
- [27] Yu, F. R., Tang, H.; Cognitive radio mobile ad hoc networks, Vol. 507, New York: Springer, 2011.
- [28] Yücek, T., Arslan, H.; A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications, IEEE Communications survey & Tutorials, Vol. 11, No. 1, First Quarter 2009.
- [29] Zhang, W.; Handbook of Cognitive Radio., ISBN 978-981-10-1394-2, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019.

# UWB senzorové systémy založené na zákaznických integrovaných obvodoch ASIC

Martin Pečovský

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Technická univerzita v Košiciach  
Košice, Slovensko  
martin.pecovsky@tuke.sk

Pavol Galajda

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

**Abstrakt**—Tento článok sa zaoberá prehľadom výsledkov výskumu, ktoré boli dosiahnuté počas 4-ročného obdobia skúmania témy UWB senzorových systémov založených na zákaznických integrovaných obvodoch. Prvá časť článku pojednáva o pokroku v miniaturizácii širokopásmových antén pre UWB radary emitujúce M-postupnosť. Ďalšia časť sa zaoberá návrhom integrovaných aktívnych filtrov pre tieto radary. Závěry výskumu sú zosumarizované v poslednej časti článku.

**Kľúčové slová**—*component; formatting; style; styling; insert (key words)*

## I. ÚVOD

V dnešnej spoločnosti musia byť denne vykonané mnohé kritické rozhodnutia, aby sa predišlo či už menším osobným, alebo väčším globálnym katastrofám, napríklad v oblastiach priemyslu, dopravy či armády. Pre správne rozhodnutia potrebujeme spoľahlivé informácie získané v dostatočnom časovom predstihu. Na to, aby sme boli týmito informáciami zásobovaní, potrebujeme nie len telekomunikačné siete, ale aj širokú škálu spoľahlivých senzorov s vysokým rozlíšením. Jedným zo senzorových konceptov spĺňajúcich tieto požiadavky sú radary s veľmi veľkou šírkou pásma, tzv. UWB radary (z angl. ultra wideband – ultraširokopásmový). Vďaka ich veľkej šírke pásma sú tieto radary schopné zachytiť veľké množstvo informácií nielen o vonkajšej, ale aj o vnútornej štruktúre testovaných objektov. Tieto radary postupne prenikajú do všetkých odvetví hospodárstva a oblastí života a tak sa stávajú vylepšenými očami našich áut, ňufákmi vyhľadávacích psov, pomocníkmi zdravotníkov i zmyslami priemyselných či domácich robotov. Veľkou mierou sa tak podieľajú na rozvoji často diskutovaných riešení zvaných Internet vecí (IoT, z angl. Internet of Things) a Priemysel 4.0.

Vývoj UWB radarov emitujúcich M-postupnosť má mnohoročnú tradíciu na našom pracovisku. V spolupráci s Technickou univerzitou v Ilmenau a spoločnosťou Ilmsens, GmbH. (Nemecko) sme súčasťou napínaveho výskumu v oblasti spracovania radarových dát ako aj vývoja UWB hardvéru, vďaka ktorému sa systémy využívajúce M-postupnosť postupne stali jedným zo štandardov v oblasti senzorov krátkého dosahu. S vylepšovaním tejto technológie a rýchlym vývojom v tejto oblasti sa objavujú aj nové možnosti využitia radarov emitujúcich M-postupnosť, ktoré zasa kladú

nové požiadavky na technológiu. V poslednej dobe sú to najmä požiadavky na miniaturizáciu a znižovanie výrobných nákladov zariadení. Napriek úspešnej integrácii základných obvodov UWB radaru emitujúceho M-postupnosť [1][2], niektoré analógové vstupno-výstupné obvody týchto radarov boli dosiaľ vždy realizované prostredníctvom diskretných prvkov. Jedným z problémov sú tiež rozmery antén radaru, ktoré sú napriek výraznému pokroku v miniaturizácii iných obvodov stále závislé na pracovnej vlnovej dĺžke rovnako ako v začiatkoch skúmania elektromagnetických vln. To je problémom najmä pre senzory pracujúce na nižších frekvenciách, ako sú radary na vyhľadávanie objektov pod zemou (GPR, z angl. ground penetrating radar) a na skúmanie vnútornej štruktúry materiálov.

V tomto článku poukážeme na niektoré spôsoby, ktorými by bolo možné eliminovať vyššie spomenuté nedostatky hardvéru UWB radarov emitujúcich M-postupnosť. Hlavným východiskom pre navrhované riešenia je možnosť návrhu a výroby zákaznických integrovaných obvodov, ktoré umožňujú značné zmenšenie a zjednodušenie spomínaných radarových senzorov. Zároveň v článku navrhujeme spôsoby využitia zákaznických integrovaných obvodov ako aktívnych prvkov pre elektricky krátke antény. Využitelnosť navrhovaných prístupov je overená laboratórnymi meraniami zhotovených prototypov.

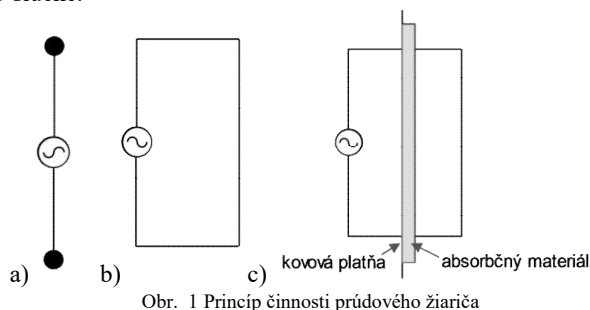
## II. ELEKTRICKY KRÁTKE AKTÍVNE ANTÉNY PRE UWB RADARY EMITUJÚCE M-POSTUPNOSŤ

Ako vhodný prístup k miniaturizácii antén UWB radarov emitujúcich M-postupnosť navrhujeme využitie elektricky krátkych aktívnych antén, konkrétne elektricky krátko dipólu a tzv. prúdového žiariča. Nakoľko bol v tejto oblasti vykonaný rozsiahly výskum, ktorého niektoré výsledky sú predmetom patentového konania, opíšeme v tejto časti článku len základné teoretické východiská a najvýznamnejšie dosiahnuté výsledky.

### A. Aktívna vysielacia UWB anténa založená na princípe prúdového žiariča

Priekopníkom myšlienky prúdového žiariča (LCR, z angl. large current radiator) bol Harmuth [3] [4] [5] koncom 80-tych rokov 20. storočia. Prúdový žiarič vychádza z princípu

Hertzovho dipólu. Jeho činnosť je vysvetlená na obr. 1. Uvažujme Hertzov dipól, t.j. dipól malej dĺžky s guľovými kapacitnými zakončeniami na koncoch (obr. 1a). Hertzov dipól je napájaný striedavým prúdom, ktorý cez ramená dipólu tečie do kapacít na jeho koncoch, čím budí elektromagnetické vlnenie úmerné prvej časovej derivácii prúdu šíriace sa prostredím. V praxi je však náročné efektívne realizovať túto anténu, pretože na vybudenie prúdu v dipóle by bolo potrebné vysoké napätie alebo vysoká kapacita na jeho koncoch. Tento nedostatok je možné obísť tým, že konce dipólu prepojíme vodičom (obr. 1b). Náboj prinesený prúdom teda nie je potrebné uskladňovať v kapacitách, ale má voľnú cestu v slučke.



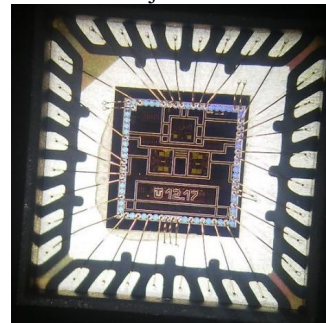
Obr. 1 Princíp činnosti prúdového žiariča

Vodičom spájajúcim konce dipólu však tečie prúd rovnakej veľkosti a opačného smeru, vyžaruje teda elektromagnetické vlnenie s opačným smerom vektora intenzity elektrického poľa. Polia sa sčítajú a výsledkom je slabé vyžarovanie úmerné druhej derivácii prúdu [6]. Sčítaniu polí sa dá zabrániť vloženie platne s vysokou permeabilitou, ktorá odrazí prichádzajúce vlnenie späť do daného polpriestoru bez zmeny fázy intenzity elektrického poľa, teda výsledné polia sa sčítajú. Vysokofrekvenčné materiály s dostatočne vysokou permeabilitou sú však ťažko dostupné.

V praxi sa dá prúdový žiarič realizovať pomocou prepážky z absorbčného materiálu medzi dipólom a návratovým vodičom, čím sa polpriestory oddelia za cenu pohltienia časti žiarenia. V práci [6] je uvedené ako najlepšie praktické riešenie použiť kovovú platňu pokrytú absorbčným materiálom s relatívnou permeabilitou okolo 10 a dostatočnými ohmickými stratami, čo zabezpečí odrazenie časti žiarenia vo fáze a pohltienie ostávajúcej časti (obr. 1c). Je potrebné tiež obmedziť šírenie elektromagnetického vlnenia okolo prepážky [7].

Napriek tomu, že princíp prúdového žiariča bol publikovaný pred približne 30 rokmi, tieto antény nenašli široké uplatnenie. Hlavným dôvodom boli nelinearity budiacich obvodov, ktoré predurčovali tieto žiariče iba pre vyžarovanie impulzov. Problémy tiež predstavovala potreba použitia absorbčných materiálov. V rámci tejto práce bol navrhnutý inovatívny spôsob budenia LCR pomocou zákaznickeho integrovaného obvodu, ktorého základom je diferenciálny zosilňovač. Okrem budiaceho obvodu bola tiež navrhnutá vylepšená konštrukcia prúdového žiariča spájajúca žiarič aj s budičom do jedného celku. Fotografia prototypu

zapuzdreného zákaznickeho integrovaného obvodu určeného pre budenie prúdového žiariča je na obr. 2.



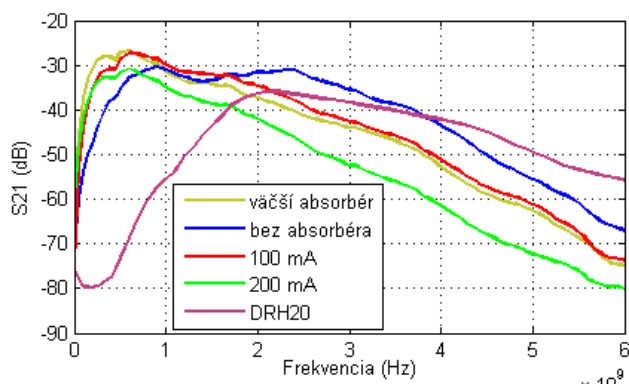
Obr. 2 Fotografia prototypu zapuzdreného zákaznickeho integrovaného obvodu určeného na budenie prúdového žiariča

Vytvorených a otestovaných bolo niekoľko vysielacích antén založených na princípe LCR, odlišujúcich sa veľkosťou, konštrukciou žiariča a použitým absorbérom. Výsledky merania jednej z navrhovaných štruktúr vo viacerých vyhotoveniach sú zobrazené na obr. 3. Meranie bolo vykonané pri vzdialenosti asi 3 m medzi anténami pomocou sieťového analyzátora. Na vysielacej strane (port 1) bola pripojená testovaná anténa, na strane prijímacej bola použitá širokopásmová laboratórna anténa HL562 [8]. Navrhovaná aktívna LCR anténa bola testovaná v 4 rozdielnych konfiguráciách – bez vrstvy absorbéra, so zväčšenou plochou absorbéra, a v základnom prevedení pri max. prúde cez žiarič rovnom 100 a 200 mA. Pre porovnanie bola za rovnakých podmienok odmeraná aj profesionálna anténa DRH20 [9].

Z porovnania je zrejmé, že všetky prevedenia navrhovanej antény majú dolnú medznú frekvenciu výrazne nižšiu než DRH20. Zároveň sú rozmery navrhovanej antény podstatne menšie – 3,5 x 3 x 3 cm v porovnaní s 10,4 x 12,2 x 7,8 cm u DRH20 [9]. 10 dB šírka pásma navrhovanej antény v základnom prevedení pri max. prúde 100 mA siaha od 160 MHz do 2,4 GHz, čo predstavuje zlomkovú šírku pásma 187%, pričom anténa je schopná vyžarovať elektromagnetické vlnenie i na frekvenciách, kde je vlnová dĺžka viac ako 50-násobkom rozmerov antény. Pri nastavení max. prúdu na 200 mA sa napriek očakávaniam vlastnosti antény ďalej nezlepšujú. Príčinou môže byť nasýtenie tranzistorov koncového stupňa budiča antény, alebo nedostatočné vybudenie aktívneho obvodu striedavým signálom na vstupe.

Vplyv absorbčného materiálu na činnosť LCR ukazuje porovnanie výsledkov meraní bez absorbéra a s dvojnásobne zväčšeným absorbérom. Plocha absorbéra LCR antény má viditeľný vplyv na schopnosť vyžarovať nízke frekvencie, čo je vidieť z obr. 3. V praxi je potrebné hľadať vhodný kompromis medzi veľkosťou a množstvom použitého absorbčného materiálu, ktorý vplyva najmä na cenu a hmotnosť antény a potrebou funkčnosti na veľmi nízkych frekvenciách. Bez absorbéra dosahuje anténa o niečo lepšie výsledky v pásme nad 2 GHz.





Obr. 3 Prenosový koeficient navrhovanej aktívnej vysielacej LCR antény: žltá – so zväčšenou plochou absorbéra, modrá – bez absorbéra, červená – prúd koncového stupňa zosilňovača rovný 100 mA, zelená – prúd koncového stupňa zosilňovača rovný 200 mA. Prenosový koeficient antény DRH20 pre porovnanie (fialová).

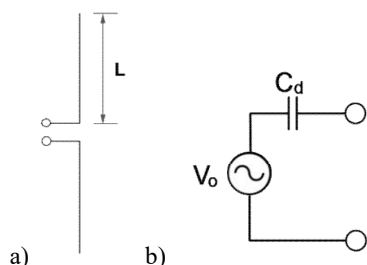
**B. Aktívna prijímacia UWB anténa založená na princípe elektricky krátkeho dipólu**

Krátky dipól je jednou z najjednoduchších antén. Skladá sa z dvoch vodivých ramien dĺžky  $L$  napájaných v strede (obr. 4a), ktoré sú krátke v porovnaní s vlnovou dĺžkou (zvyčajne  $L/\lambda < 0,1$ ). Ramená môžu byť rozšírené do rôznych tvarov pre zmenšenie frekvenčnej závislosti parametrov antény. Krátky dipól má typicky vysokú vstupnú impedanciu skladajúcu sa z veľmi nízkeho vyžarovacieho odporu a reaktancie kapacitného charakteru. Vyžarovací odpor krátkeho dipólu je typicky menší ako  $10 \Omega$  a s rastúcou dĺžkou dipólu rastie kvadraticky [10].

Pri zanedbaní strát v anténe a malého vyžarovacieho odporu je teda možné krátky dipól z hľadiska impedancie zaťažujúcej vysielateľ modelovať ako samotnú kapacitu  $C_d$ . Z hľadiska krátkeho dipólu ako prijímacej antény ho je možné modelovať ako napätový zdroj s kapacitou zapojenou v sérii. Napätie krátkeho dipólu naprázdno je

$$V_o = E \cdot L_{ef} \tag{3}$$

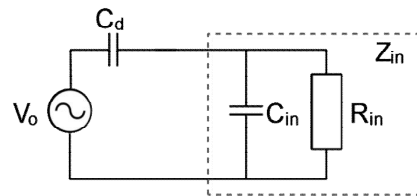
kde  $L_{ef}$  je efektívna dĺžka dipólu závislá od jeho rozmerov a  $E$  je veľkosť intenzity elektrického poľa pozdĺž antény [11]. Náhradný model krátkeho dipólu ako prijímacej antény je na obr. 4b.



Obr. 4 a) krátky dipól, b) náhradný model krátkeho dipólu ako prijímacej antény

Zatiaľ čo prúdový žiarič bol navrhovaný ako vysielacia

anténa, krátky dipól môže byť v UWB radarovom systéme využívaný primárne na príjem signálu. Z rov. (3) vidíme, že veľkosť napätia indukovaného v dipóle naprázdno nie je závislá od frekvencie signálu. Dôležitou vlastnosťou prijímacieho zosilňovača krátkeho dipólu z hľadiska vplyvu na šírku frekvenčného pásma (najmä dolnú medznú frekvenciu) je jeho vstupná impedancia. Jej význam možno odvodiť z obr. 5.



Obr. 5 Model pripojenia zosilňovača ku krátkeho dipólu

Zdroj napätia  $V_o$  a kapacita  $C_d$  tvoria model krátkeho dipólu opísaný vyššie. Vstupnú impedanciu zosilňovača  $Z_{in}$  modelujeme ako paralelnú kombináciu odporu  $R_{in}$  a kapacity  $C_{in}$ . Z modelu je zrejme, že zatiaľ čo vstupná kapacita zosilňovača vytvára s kapacitou dipólu frekvenčne nezávislý napätový delič, vstupný odpor zosilňovača zapríčiňuje stratu napätia na vstupe zosilňovača v oblasti nízkych frekvencií. Správnym návrhom vstupu zosilňovača je teda možné dosiahnuť vyrovnanú frekvenčnú charakteristiku v danom pásme aj napriek malým rozmerom antény v porovnaní s vlnovou dĺžkou [7].

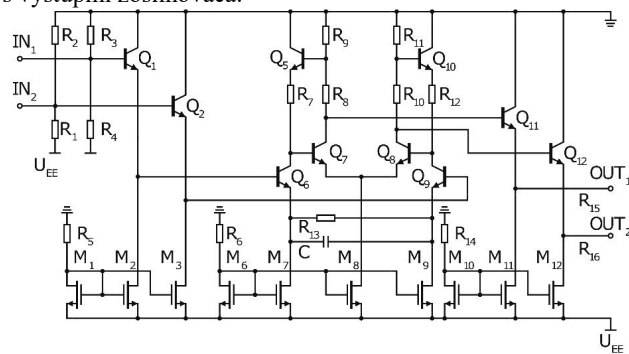
Vychádzajúc z vyššie uvedených faktov bol navrhnutý integrovaný diferenciálny zosilňovač s vysokou vstupnou impedanciou, ktorý môže byť využitý ako aktívny prvok elektricky krátkeho dipólu. Hlavnými požiadavkami na tento obvod sú:

- vysoká vstupná impedancia
- veľmi veľká šírka pásma
- dostatočné zosilnenie

nízky šum

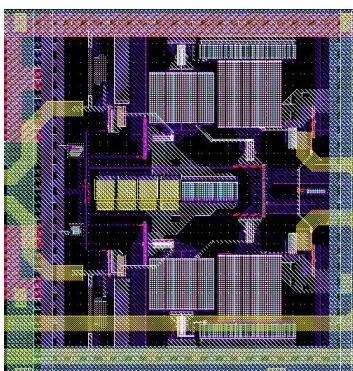
Schéma navrhovaného zosilňovača je na obr. 6. Vstupný signál z antény je privedený na bázy emitorových sledovačov tvorených tranzistorami Q1 a Q2. Tieto zabezpečujú vysokú vstupnú impedanciu obvodu. Rezistory R1 až R4 určujú jednosmerný pracovný bod vstupných tranzistorov. Kvôli zachovaniu vysokej vstupnej impedancie majú vysoký odpor, rádovo niekoľko k $\Omega$ . Jadrom zosilňovača je diferenciálny stupeň v prevedení Cherry-Hooper, skôr publikovaný v [12] a [13]. Jeho hlavnou výhodou je väčšia nezávislosť zisku od šírky pásma (typicky pre zosilňovače platí, že pri väčšej šírke pásma je možné dosiahnuť len nižší zisk a naopak), čo ho robí veľmi vhodným pre UWB aplikácie, umožňuje v danej technológii dosiahnuť vyššiu šírku pásma a zároveň dostatočný zisk. Výstup zosilňovača je znovu tvorený emitorovými sledovačmi, ktoré zabezpečujú oddelenie záťaže od diferenciálneho stupňa. Vďaka nim dosahuje zosilňovač nízku výstupnú impedanciu, čo umožňuje jeho univerzálne použitie.

Výstupné prispôsobenie ku  $50 \Omega$  impedancii je potrebné zabezpečiť externými rezistormi zapojenými v sérii s výstupmi zosilňovača.



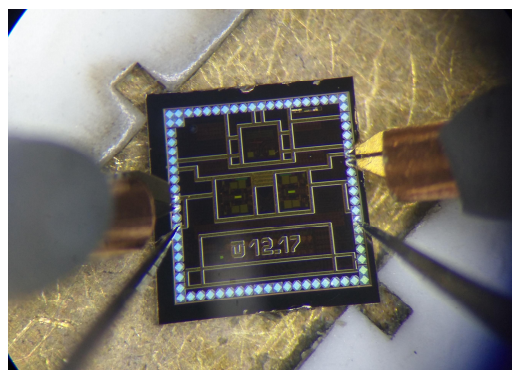
Obr. 6 Schéma integrovaného zosilňovača pre elektricky krátky dipól

Rozmiestnenie prvkov na čipe (layout) zosilňovača je zobrazený na obr. 7. Obvod bol navrhnutý v prostredí Cadence a zaberá plochu  $490 \times 500 \mu\text{m}$ . Rozmiestnenie prvkov na čipe je symetrické, čo zodpovedá diferenčnej štruktúre obvodu. Väčšinu plochy čipu zaberajú rezistory, ktoré musia mať dostatočnú šírku, aby nebula prekročená maximálna prúdová hustota odporovej vrstvy a zároveň bol zabezpečený dostatočný prúd pre tranzistory, ktorých pracovný bod bol optimalizovaný na dosiahnutie čo najväčšej šírky pásma.



Obr. 7 Rozmiestnenie prvkov na čipe zosilňovača pre elektricky krátku aktívnu anténu

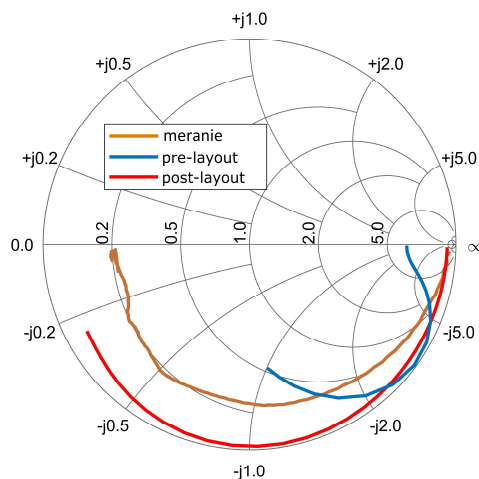
Navrhnutý obvod bol vyrobený v cenovo dostupnej technológii  $0,35 \mu\text{m}$  SiGe BiCMOS dodávanej rakúskou spoločnosťou AMS v rámci projektu Europractice. Pre zníženie nákladov na výskum bolo na čipe s rozmermi  $2 \times 2 \text{ mm}$  vyrobených viacero štruktúr. Fotografia čipu s prototypom obvodu s pripojenými meracími hrotmi je zobrazená na obr. 8.



Obr. 8 Fotografia čipu s prototypom zosilňovača pre elektricky krátku prijímaciu anténu s priloženými meracími hrotmi

Ďalej uvedieme výsledky meraní a simulácií navrhovaného integrovaného aktívneho prvku pre elektricky krátku dipólovú prijímaciu anténu. Výsledky simulácií budú uvedené v 2 stupňoch návrhu: pre-layout simulácie zahŕňajú len modely súčiastok danej technológie, zatiaľ čo simulácie post-layout počítajú aj s parazitnými prvkami zapríčinenými rozmiestnením súčiastok a ich prepojeniami na čipe.

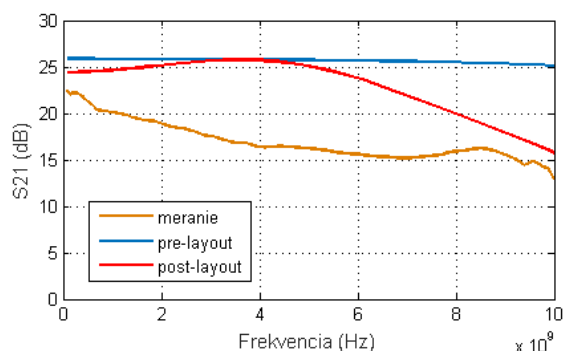
Vstupná impedancia zosilňovača je zobrazená na obr. 9 pomocou Smithovho diagramu koeficientu odrazu na vstupe S11. Meranie bolo vykonané priamo na nezapuzdrenom čipe pomocou sieťového analyzátora v single-ended móde, t.j. impedancia vstupu IN voči zemi. Diferenčná impedancia by mala byť približne dvojnásobná. Zo Smithovho diagramu je zrejme, že vstupná impedancia zosilňovača je vysoká a má kapacitný charakter. Merané výsledky približne zodpovedajú paralelnej kombinácii ideálneho rezistora s odporom  $2,3 \text{ k}\Omega$  a kondenzátora s kapacitou  $1 \text{ pF}$ .



Obr. 9 Koeficient odrazu na vstupe (S11) navrhovaného zosilňovača pre elektricky krátku prijímaciu anténu

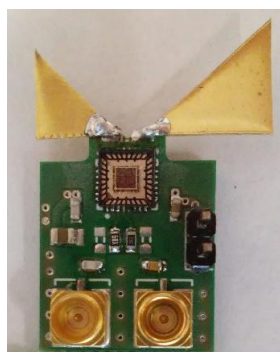
Ďalšou významnou charakteristikou zosilňovača je zisk, zobrazený ako parameter S21 na obr. 10 v decibelovej mierke. Predkladané výsledky zisku dobre ilustrujú rozdiely medzi simuláciami v jednotlivých fázach návrhu obvodu

a meraniami prototypu. Výsledkom pre-layout simulácie je zisk 26 dB pri šírke pásma viac ako 12 GHz. Po zahrnutí parazitných prvkov layoutu v post-layout simulácii je už šírka pásma redukovaná na 7,5 GHz. Meranie na čípe ukázalo ešte väčší pokles zisku s frekvenciou, ten mohol však byť čiastočne spôsobený aj prechodovým odporom meracích hrotov pri meraní na čípe. Meraný zisk zosilňovača klesá od 22 dB pri 100 MHz na asi 15 dB pri 9 GHz. Tento pokles však pre zamýšľanú aplikáciu zosilňovača ako aktívneho prvku elektricky krátkej antény nie je na závädu, keďže môže čiastočne kompenzovať horšiu funkciu samotnej antény pri nižších frekvenciách.



Obr. 10 Výsledky simulácií a merania na čípe dopredného prenosového koeficientu navrhovaného zosilňovača

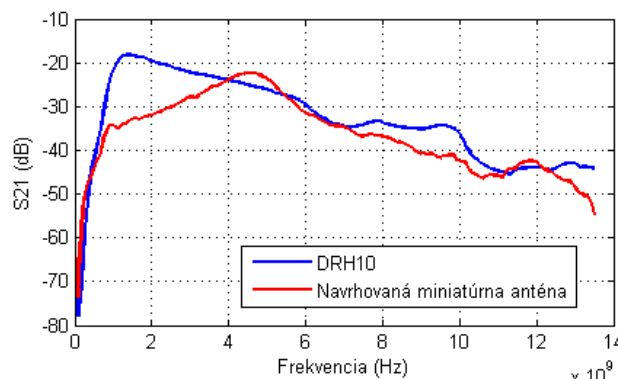
Zosilňovač opísaný vyššie bol využitý ako aktívny prvok elektricky krátkej dipólovej antény. Fotografia prototypu antény je na obr. 12. Ako anténny prvok je použitý krátky dipól rozšírený do tvaru motýlika. Tento má ramená nerovnakej dĺžky, čím sa podarilo znížiť vplyv rezonancie antény a indukčností bondovacích vodičov zapuzdreného čipu. Navrhnutý integrovaný zosilňovač s vysokou vstupnou impedanciou je zapuzdrený v štandardnom puzdre QFN32 a osadený priamo v napájacom bode antény. Výstupy zosilňovača sú impedančne prispôbené na impedanciu 50  $\Omega$  a opatrené koaxiálnymi konektormi. Celkové rozmery aktívnej antény vrátane plošného spoja so zosilňovačom sú 30 x 20 x 5 mm.



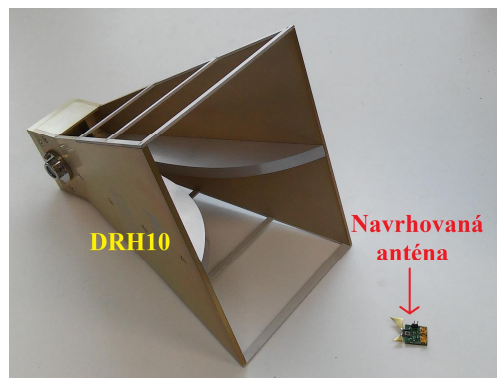
Obr. 11 Fotografia prototypu miniatúrnej prijímacej antény pre UWB radary emitujúce M-postupnosť

Výsledky merania prenosového koeficientu navrhovanej antény pomocou sieťového analyzátoru sú zobrazené na obr. 13. Anténa bola meraná podobnou metódou ako

miniaturná vysielačacia anténa opísaná v predchádzajúcej podkapitole. Ako vysielačacia anténa bola však v tomto prípade použitá anténa QRH400 s dolnou medznou frekvenciou 400 MHz [14] a vzdialenosť medzi anténami bola 1 m. Pre porovnanie je na obr. 13 znázornený aj prenosový koeficient antény DRH10 a na obr.14 je fotografia týchto dvoch antén porovnávajúca ich rozmery. Z výsledkov merania je zrejmé, že navrhovaná miniaturná aktívna prijímacia anténa je schopná dosiahnuť podobné vlastnosti ako referenčná anténa DRH10 napriek tomu, že jej rozmery a hmotnosť sú mnohonásobne menšie. Cenou za zmenšenie rozmerov antény je potreba napájania, o približne 10 dB nižšia úroveň signálu na frekvenciách pod 3 GHz a tiež vyšší šum v porovnaní s pasívnou anténou plných rozmerov.



Obr. 12 Porovnanie meraného prenosového koeficientu navrhovanej prijímacej antény s profesionálnou anténou DRH10



Obr. 13 Porovnanie veľkosti navrhovanej prijímacej antény s profesionálnou anténou DRH10

### III. INTEGROVANÉ AKTÍVNE FILTRE PRE UWB RADARY EMITUJÚCE M-POSTUPNOSŤ

Ďalšími súčasťami UWB radarov emitujúcich M-postupnosť, ktoré boli dosiaľ realizované pomocou pomerne rozmerných pasívnych štruktúr umiestnených mimo hlavného čipu či čipovej sady radaru sú filtre. Tieto filtre sú dôležité najmä pre dodržanie frekvenčnej masky vysielačného signálu určenej regulačnými autoritami, ako aj na zníženie šumovej šírky pásma prijímača a zabránenie aliasingu. V tejto časti článku opíšeme dva návrhy integrovaných aktívnych filtrov,

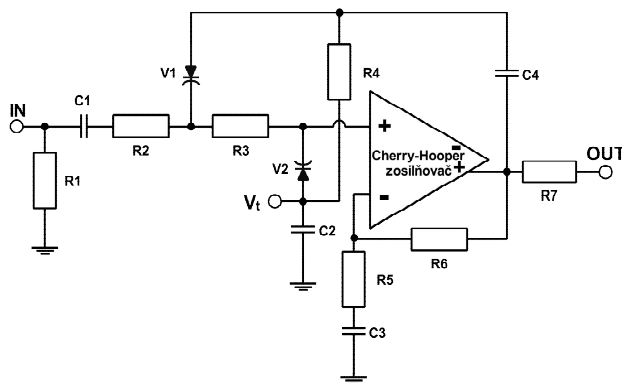
ktoré sú určené pre UWB radary emitujúce M-postupnosť pracujúce v ECC pásme od 6 do 8,5 GHz.

Hlavnými ťažkosťami, s ktorými je potrebné sa vysporiadať pri návrhu integrovaných filtrov sú:

- ťažká až nemožná realizácia indukčností a veľkých kapacít
- pomerne veľké odchýlky parametrov prvkov medzi jednotlivými čipmi
- maximálny zisk a šírka pásma zosilňovačov stanovené cenovo prijateľnou technológiou

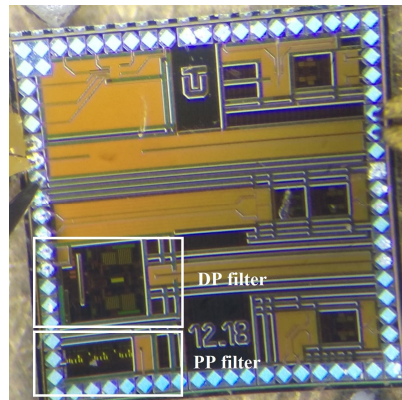
#### A. Aktívny dolnopriepustný filter

Zjednodušená schéma navrhovaného aktívneho dolnopriepustného filtra pre UWB radary emitujúce M-postupnosť je uvedená na obr. 14. Filter je navrhnutý podľa známej topológie typu Sallen-Key s niekoľkými úpravami. V prvom rade, vo filteri sú namiesto pevných kondenzátorov využité varikapky, ktoré umožňujú ladenie filtra pomocou externého jednosmerného napätia  $V_t$ . To umožňuje nielen využitie filtra vo viacerých aplikáciách s rôznou požadovanou medznou frekvenciou, ale aj doladenie filtra v prípade, že bude medzná frekvencia výrazne ovplyvňovaná zmenami hodnôt prvkov na čipe spôsobenými odchýlkami technológie. Ďalšou úpravou klasickej topológie je využitie diferencného zosilňovača typu Cherry-Hooper na mieste operačného zosilňovača. Vzhľadom na tranzitnú frekvenciu technológie 0,35  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS, v ktorej je filter vyrobený, je ťažké vyrobiť v nej zosilňovač, ktorý by zodpovedal predpokladom o ideálnom operačnom zosilňovači v dostatočnom frekvenčnom pásme pre navrhovaný filter. Vzhľadom na to bol Cherry-Hooper zosilňovač najvýhodnejším riešením. Využitý bol podobný zosilňovač ako je ukázaný v predchádzajúcej kapitole na obr. 6.



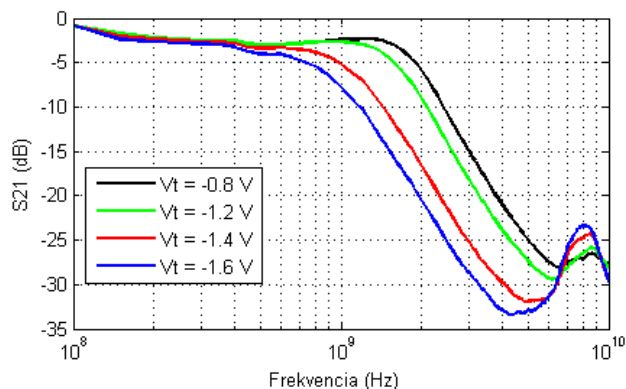
Obr. 14 Schéma navrhovaného dolnopriepustného filtra

Fotografia vyrobeného prototypu čipu, ktorý okrem iných štruktúr obsahuje aj oba filtre opísané v tomto článku, je na obr. 15. Dolnopriepustný filter zaberá plochu 550 x 480  $\mu\text{m}$ , zatiaľ čo pásmový priepust len 140 x 420  $\mu\text{m}$ . Spotreba dolnopriepustného aktívneho filtra je 157 mA pri napájacom napätí 3,3 V.



Obr. 15 Fotografia čipu s obvody dolnopriepustného (DP) a pásmovopriepustného (PP) filtra

Dopredný prenosový koeficient navrhovaného dolnopriepustného filtra meraný priamo na čipe pomocou testovacej stanice je znázornený na obr. 16. Parametrom zobrazených kriviek je hodnota ladiaceho napätia  $V_t$ . Medzná frekvencia pre 3 dB pokles je nastaviteľná od 750 do 1900 MHz v rozsahu ladiaceho napätia od -0,8 do -1,6 V proti zemi. Tento rozsah s rezervou umožňuje doladenie filtra na menovitou medznú frekvenciu 1 GHz, prípadne i využitie filtra v aplikáciách s inou medznou frekvenciou v rámci spomínaného rozsahu. Prenos za medznou frekvenciou klesá so sklonom približne 11 dB na oktávu, čo je vzhľadom na nedostupnosť zosilňovača s parametrami blížiacimi sa ideálnemu operačného zosilňovaču prijateľný výsledok.

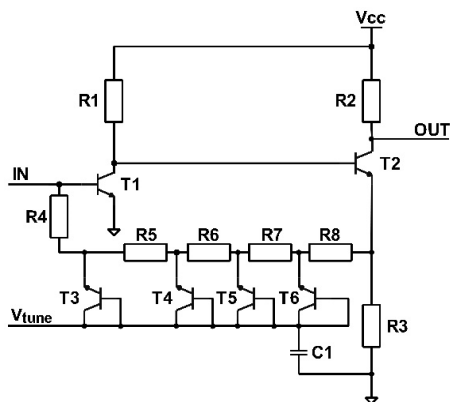


Obr. 16 Prenosový koeficient ( $S_{21}$ ) navrhovaného dolnopriepustného filtra

#### B. Aktívny pásmovopriepustný filter

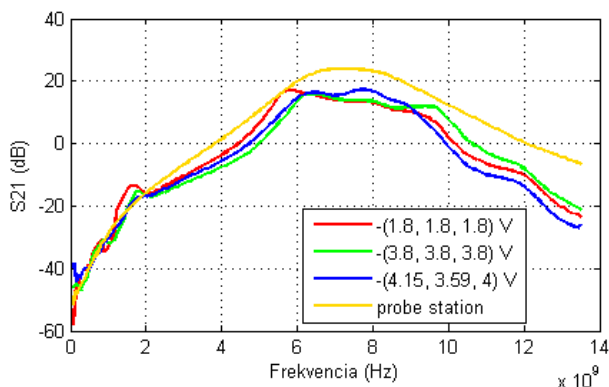
Navrhnutý bol tiež integrovaný pásmovopriepustný aktívny filter pre pásmo od 6 do 8,5 GHz. V porovnaní s dolnopriepustným filterom s menovitou medznou frekvenciou 1 GHz je návrh filtra na niekoľkonásobne vyššej frekvencii náročnejší. Schéma jedného stupňa navrhovaného filtra je na obr. 17. Filter je založený na širokopásmovom nízkošumovom zosilňovači so spätnou väzbou publikovanom v [15]. Rezistor v obvode spätnej väzby je však nahradený dolnopriepustným RC filterom zloženým z rezistorov R4 až R8 a záverne polarizovaných PN priedochodov tranzistorov T3 až T6. PN

priechody sú využité namiesto kondenzátorov pre zabezpečenie možnosti jemného ladenia filtra a teda kompenzácie prípadných výrobných odchýlok pomocou jednosmerného ladiaceho napätia. S takto zapojenou spätnou väzbou by teoreticky mal vzniknúť hornopriepustný filter. Prírodný pokles zisku zosilňovača pri vysokých frekvenciách však zabezpečuje charakteristiku typu pásmového priepustu. Výsledný filter je tvorený tromi takto zapojenými stupňami radenými do kaskády, čím je dosiahnutá dostatočná strmlosť filtra.



Obr. 17 Zjednodušená schema jedného stupňa navrhovaného integrovaného pásmovopriepustného filtra

Výsledky merania prenosového koeficientu  $S_{21}$  navrhovaného filtra sú zobrazené na obr. 18 pri troch nastaveniach ladiacich napätí. Napätia na všetkých ladiacich vstupoch v hodnote  $-1,8$  V zodpovedajú priepustnému pásmu nastavenému najnižšie vo frekvenčnom spektre, zatiaľ čo napätia nastavené na  $-3,8$  majú opačný vplyv, t.j. posun priepustného pásma k vyšším frekvenciám. Modrou farbou je vyznačená krivka najlepšie aproximujúca ECC pásmo pri ladiacich napätíach  $(V_{t1}; V_{t2}; V_{t3}) = (-4,15; -3,59; -4)$  V. 3 dB medzné frekvencie filtra v tomto prípade sú 6 GHz a 8,4 GHz. Žltou farbou je znázornený výsledok merania priamo na čipe pomocou testovacej stanice (probe station). Pri porovnaní s meraniami zapuzdreného prototypu je na ňom viditeľné lineárne zvyšovanie prenosového koeficientu s frekvenciou. Tento jav je pravdepodobne spôsobený elimináciou indukčností bondovacích drôtov pri tejto meracej metóde.



Obr. 18 Prenosový koeficient ( $S_{21}$ ) navrhovaného pásmovopriepustného filtra

#### IV. ZÁVER

V tomto článku boli opísané štyri zákaznické integrované obvody určené pre UWB radary emitujúce M-postupnosť. Prvé dva obvody predstavujú zosilňovače prispôbené špeciálne pre ich uplatnenie v elektricky krátkych aktívnych anténach. Využitie zákaznických integrovaných obvodov v týchto prípadoch tak umožňuje nielen miniaturizáciu elektronického obvodu, ale aj podstatné zmenšenie a zlacnenie konštrukcie širokopásmových antén za súčasného zachovania, prípadne aj zlepšenia ich vlastností najmä v pásme frekvencií pod 3 GHz. Koncept vysielacej antény založený na prúdovom žiariči využívajúcom zákaznický integrovaný obvod ako budič antény sa ukázal ako veľmi efektívny pre aplikácie vyžadujúce vysielanie pomerne nízkych frekvencií, akými sú radary na vyhľadávanie objektov pod zemou a na zisťovanie vnútornej štruktúry materiálov.

Ďalšími dvoma zákaznickými integrovanými obvodmi sú aktívne filtre určené taktiež pre použitie v UWB radaroch emitujúcich M-postupnosť. Napriek ťažkostiam spojeným s návrhom integrovaných filtrov pre vysokú frekvenciu v nízkonákladovej  $0,35 \mu\text{m}$  SiGe BiCMOS technológii sa využitím pomerne nezvyčajných zapojení podarilo splniť základné požiadavky, ktorými bola medzná frekvencia 1 GHz pre dolnopriepustný filter a priepustné pásmo od 6 do 8,5 GHz pre pásmovopriepustný filter s dostatočnou preladiťnosťou pre prípad výrazných výrobných odchýlok. Všetky dosiahnuté výsledky sú podložené výsledkami meraní či už priamo na čipe, alebo na testovacích plošných spojoch.

Výzvami pre ďalší výskum v tejto oblasti by malo byť najmä ďalšie zlepšovanie parametrov vyššie prezentovaných obvodov, ktoré sa týka najmä ich dynamických a šumových vlastností. Okrem vylepšovania uvedených topológií obvodov by bolo vhodné overiť i možnosti implementácie ďalších obvodov, prípadne ich adaptáciu v technológiách s vyššou tranzitnou frekvenciou. Následne by tieto komponenty mohli byť integrované na jeden čip spolu so základnými obvodmi UWB radaru emitujúceho M-postupnosť, čím by bol vytvorený tzv. systém na čipe.

#### POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná v rámci projektov APVV-15-0692, APVV-15-0055, APVV-18-0373, VEGA 1/0772/17, VEGA 1/0584/20 a KEGA 062TUKE-4/2017.

#### POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Ziga, M., Galajda, P., Slovak, S. & Kmec, M. (2015). Determination of the quality of frying oil based on UWB impedance spectrometer. In 16th International Radar Symposium (IRS), June 2015, pp. 955–960.
- [2] Kmec, M., Galajda, P., Herrmann, R., Schilling, K., & Slovák, S. (2016, April). Integrated wideband reflectometer with on-line reference measurement capability. In *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2016 26th International Conference* (pp. 83–86). IEEE.
- [3] Harmuth, H. F. (1981). Nonsinusoidal waves for radar and radio communication. NASA STI/Recon Technical Report A, 81.
- [4] Harmuth, H. F. (1985). U.S. Patent No. 4,506,267. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [5] Harmuth, H. F., & Ding-Rong, S. (1983). Antennas for nonsinusoidal waves. I. Radiators. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (1), 13–24.

- [6] H. F. Harmuth, N. J. Mohamed „Large-current radiators,“ *IEEE Proceedings-H*, Vol. 139, No. 4, 1992
- [7] Pečovský, M., Galajda, P., Slovák, S. „Návrh elektroniky pre budenie poľa UWB antén“ In *Electrical Engineering and Informatics*, Technical University of Košice, Košice, 2016, ISBN: 978-80-553-3342-7
- [8] Rohde & Schwarz HF – VHF/UHF – SHF Antennas Catalog 2012/2013. Available online: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HL562\\_catalog\\_2013\\_98\\_99.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HL562_catalog_2013_98_99.pdf).
- [9] DoubleRidged HornAntenna–Model DRH20 Antenna Specification. RFspin. Available online: <https://www.rfspin.cz/uploads/files/cdec441762bd53775373920472559df73fd0b5cd/drh20.pdf>.
- [10] Černohorský, D., Tichý, J. (1977). *Vyzařování a šíření rádiových vln, II. Díl - Antény*. Vojenská akademie Antonína Zápotockého.
- [11] R. Perez, *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. Academic Press, 2013, 1098 s. ISBN 9781483288970
- [12] Cherry, E. M., & Hooper, D. E. (1963, February). The design of wide-band transistor feedback amplifiers. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* (Vol. 110, No. 2, pp. 375-389). IET Digital Library.
- [13] Sokol, M., Galajda, P., Slovák, S., & Pečovský, M. (2018, June). Modified Cherry-Hooper Amplifier for UWB Applications in 0.35  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS Technology. In *2018 19th International Radar Symposium (IRS)* (pp. 1-7). IEEE.
- [14] Quad Ridged Waveguide Horn – Model QRH400. Antenna specifications. RFSpin, 2011. Available online. <http://www.rfspin.cz/uploads/files/9fe29453c57d504c6d650c1ff0c9f4abe4da0d8c/qrh400.pdf>.
- [15] Lintignat, J., Grima, M. L., Darfeuille, S., Barelaud, B., Jarry, B., Barth, S., ... & Gamand, P. (2008). BiCMOS differential low noise amplifier for radioastronomy application. SKADS, ASTRON, The Netherlands, SKADS Memo, 12, 2008.

# Analýza sériovej a paralelnej spolupráce DC/DC meničov

Dávid Schweiner

Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky  
Technická univerzita v Košiciach  
Košice, Slovensko  
david.schweiner@tuke.sk

Dobroslav Kováč

Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky  
Technická univerzita v Košiciach  
Košice, Slovensko  
dobroslav.kovac@tuke.sk

**Abstrakt**—Tento článok obsahuje popis novovytvorených simulačných modelov v Exceli, pričom taktiež popisuje ich výhody a zdôvodňuje ich použitie. Článok tiež obsahuje výsledky simulácií paralelného a kaskádneho zapojenia DC/DC meničov. Tieto výsledky sú ďalej vyhodnotené a stanovené odporúčania pre použitie týchto zapojení.

**Kľúčové slová**—DC/DC menič, paralelné zapojenie, sériové zapojenie, simulácia, Excel

**Abstract**—This article contains a description of the newly created simulation models in Excel, also describing their advantages and justifying their use. The paper also contains results of simulations of parallel and cascade connection of DC/DC converters. These results are further evaluated and recommendations are made for the use of these connections.

**Keywords**—DC/DC converter, parallel connection, cascade connection, simulation, Excel

## I. ÚVOD

V nedávnej minulosti sa vo veľkej miere využívali nespínané napájacie zdroje pre napájanie rôznych zariadení a spotrebičov. Tieto zdroje pre svoju činnosť využívajú sieťové transformátory, ktoré zvyčajne pracujú na frekvencii 50Hz. Sieťový transformátor s takto nízkou frekvenciou má nevýhody spočívajúce vo veľkých rozmeroch, pomerne vysokej hmotnosti a relatívne vysokých nákladoch. V súčasnosti, aj kvôli týmto dôvodom, boli vo väčšine oblastí tieto klasické (nespínané) zdroje nahradené spínanými zdrojmi. Spínané jednosmerné zdroje pre svoju činnosť využívajú jednosmerné DC/DC meniče, ktoré buď nevyužívajú transformátor vôbec, alebo využívajú vysokofrekvenčný transformátor za účelom galvanického oddelenia vstupu od výstupu (pracovné frekvencie sa pohybujú v desiatkach až stovkách kHz). Aj keď sa, vďaka nižšiemu šumu, v niektorých aplikáciách stále ešte využívajú klasické zdroje, kvôli vyššej účinnosti, menším rozmerom, nižšej hmotnosti a nižším nákladom, sa v mnohých aplikáciách uprednostňujú práve spínané zdroje. Nevýhodou spínaných zdrojov je ich väčšie elektromagnetické rušenie, ktoré je spôsobené vysokou frekvenciou spínania (vlastnosť DC/DC meničov).

Tento článok skúma možnosti použitia DC/DC meničov v paralelnom a kaskádnom zapojení. Obidve tieto zapojenia majú potenciál priniesť výhody v podobe zvýšenia celkového

výstupného výkonu. Paralelné zapojenie môže teoreticky zvyšovať celkový výstupný prúd, keďže výstupné prúdy z každého meniča sa pri paralelnom zapojení sčítajú. Kaskádne zapojenie môže, na druhú stranu, zlepšiť možnosti použitia vyššieho napätia. Paralelné a kaskádne zapájanie viacerých meničov však nie je štandardným spôsobom ich použitia a nemusí pracovať spoľahlivo a stabilne. Z tohto dôvodu je potrebné tieto možnosti preskúmať väčším počtom simulácií a meraní, otestovať viaceré spôsoby zapojenia a zo zistených poznatkov vyvodit' závery a odporúčania pre použitie daných zapojení.

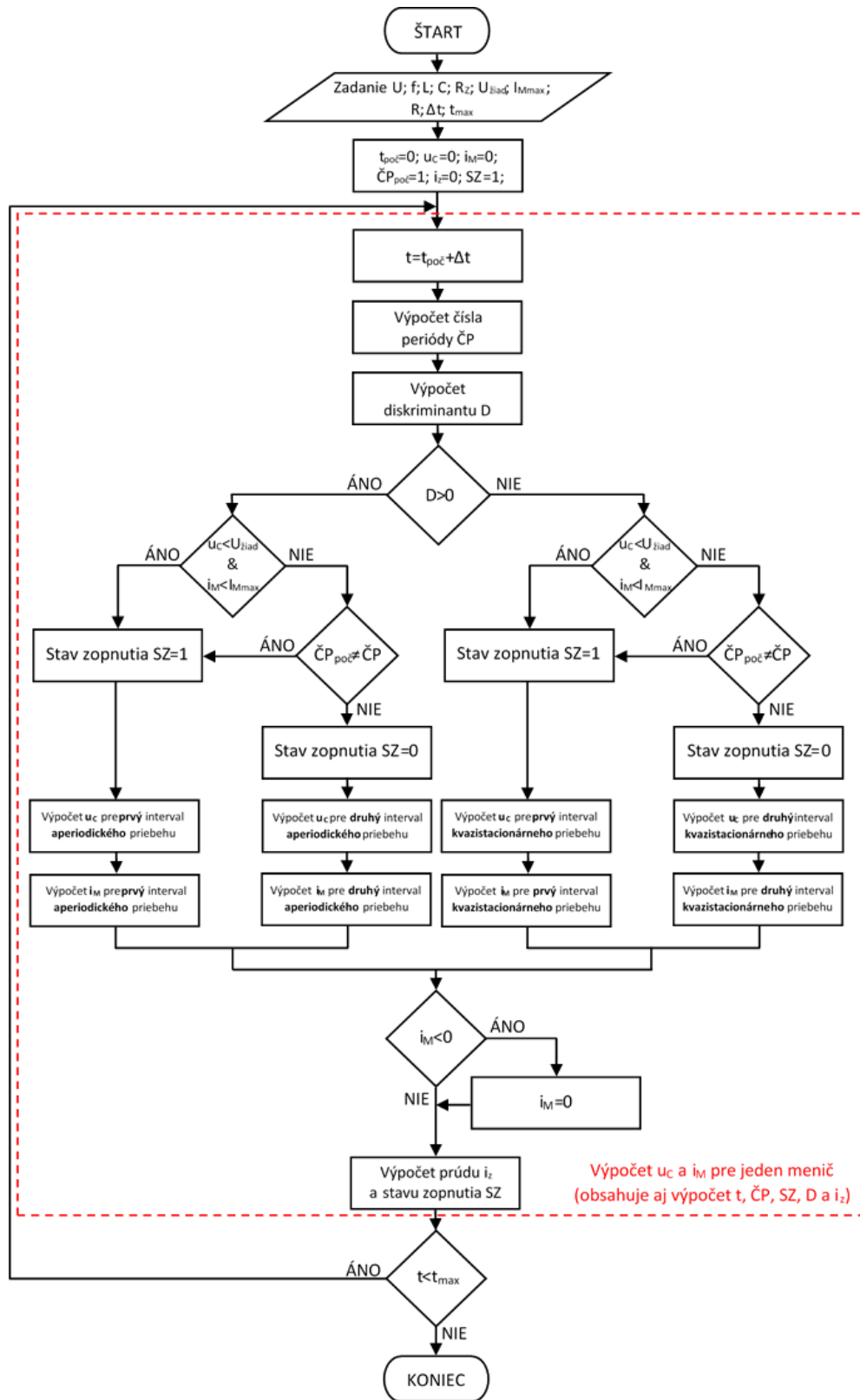
## II. SIMULAČNÉ MODEL V EXCELI

Znižovací DC/DC menič je možné popísať pomocou výpočtu prechodných dejov (v angl. transient analysis). Takýmto spôsobom je možné zostaviť matematický model DC/DC meniča. Tento model následne môže byť použitý pre výpočet, resp. určenie priebehu výstupného napätia a prúdu v meniči. Matematický model má výhodu v tom, že je univerzálny, založený na teoretických poznatkoch z elektrotechniky a matematiky. Na základe zostaveného matematického modelu, je možné navrhnúť a vytvorit' nové simulačné modely v programe MS Excel, ktoré pomôžu pri simulácií paralelných a kaskádnych zapojení. Výpočty prechodného deja pri spínaní znižovacieho DC/DC meniča, ktoré boli použité pre tvorbu simulačných modelov, boli publikované v časopise JIEE [2], [3]. Pre výpočet prechodných dejov bola použitá metóda Laplace-Carsonovej transformácie.

Spolu bolo teda v programe Excel navrhnutých sedem simulačných modelov, konkrétne model pre samostatný DC/DC menič, model pre paralelné zapojenie DC/DC meničov so spoločným kondenzátorom, model pre paralelné zapojenie DC/DC meničov so samostatnými kondenzátormi a model pre kaskádne zapojenie DC/DC meničov, pričom prvé tri menované boli vyhotovené aj vo variante, ktorá simuluje dynamickú záťaž.

### A. Simulačný model pre samostatný DC/DC menič

Na obrázku 1 nižšie je možné vidieť vývojový diagram, podľa ktorého bol vypracovaný simulačný model pre jeden DC/DC menič.



Obr. 1. Vývojový diagram simulačného modelu pre jeden samostatný DC/DC menič



Prvý blok vo vývojovom diagrame definuje zadanie parametrov meniča. Tieto parametre nastavuje užívateľ podľa toho, aký menič chce simulovať. Týmito parametrami sú: vstupné napätie  $U$ , spínacia frekvencia  $f$ , kapacita meniča  $C$ , indukčnosť meniča  $L$ , odpor záťaže  $R_z$ , požadované výstupné napätie  $U_{z\text{iad}}$ , maximálny dovolený prúd meniča  $I_{M\text{max}}$ , vnútorný odpor meniča  $R$ , časový krok výpočtu  $\Delta t$  a maximálny čas výpočtu  $t$ .

V druhom bloku sú zadané počiatočné hodnoty premenných, ktoré sa v ďalšej časti vypočítavajú v závislosti na čase. Spomínané premenné a ich počiatočné hodnoty sú (uvažuje sa, že sa jedná o počiatočné podmienky v okamihu zapnutia meniča): počiatočný (aktuálny) čas  $t_{\text{poč}}=0\text{s}$ , výstupné napätie meniča (napätie na svorkách kondenzátora)  $u_c=0\text{V}$ , prúd meniča  $i_M=0\text{A}$ , počiatočné číslo periódy  $\check{C}P_{\text{poč}}=1$ , výstupný prúd (prúd tečúci do záťaže)  $i_z=0\text{A}$ , stav zopnutia  $SZ=1$  (1 znamená zopnutý tranzistor, 0 znamená rozopnutý). V ďalších krokoch prebieha výpočet aktuálneho času  $t$  a výpočet čísla periódy  $\check{C}P$ . Aktuálny čas sa vypočíta pripočítaním kroku výpočtu  $\Delta t$  k predchádzajúcemu času. Výpočet čísla periódy kontroluje, či predchádzajúci čas  $t$  nebol väčší ako číslo periódy  $\check{C}P$ , ktoré sa násobí hodnotou periódy  $T = (1/f)$ . V ďalšej časti prebieha výpočet diskriminantu  $D$ , ktorý je dôležitý pre určenie typu výpočtu. Pre diskriminant, ktorý má kladnú hodnotu ( $D > 0$ ), sa ďalej použijú rovnice pre aperiodický priebeh veličín, ak je však diskriminant záporný ( $D < 0$ ), použijú sa rovnice pre výpočet kvazistacionárneho priebehu veličín. Vývojový diagram sa kvôli tejto skutočnosti rozdeľuje na dve rovnaké časti s týmto rozdielom, teda jedna časť vypočítava rovnice pre aperiodický priebeh a tá druhá pre kvazistacionárny. Rovnica (1) vyjadruje výpočet diskriminantu  $D$ .

$$D = \left( RC + \frac{L}{R_z} \right)^2 - \left( 4LC \cdot \left( 1 + \frac{R}{R_z} \right) \right) \quad (1)$$

Po rozhodnutí, ktorý typ výpočtu sa na základe diskriminantu použije, sa testujú dve základné podmienky, ktoré prioritne rozhodujú, či bude spínací tranzistor otvorený (teda či sa bude vypočítavať prvý interval). Tieto podmienky sú: vypočítané napätie  $u_c$  (v predchádzajúcom kroku) nesmie prekročiť hodnotu požadovaného napätia na výstupe  $U_{z\text{iad}}$  a zároveň vypočítaný prúd  $i_M$  (v predchádzajúcom kroku) nesmie prekročiť nastavenú maximálnu hodnotu prúdu  $I_{M\text{max}}$ . V prípade, že sú tieto podmienky splnené, stav zopnutia  $SZ$  sa nastaví na 1 a prebieha výpočet napätia  $u_c$  a prúdu  $i_M$  pre prvý interval (zopnutý tranzistor). V prípade, že tieto podmienky splnené neboli, skontroluje sa zmena čísla periódy  $\check{C}P$ . Ak sa perióda od posledného kroku zmenila, tak algoritmus pokračuje nastavením stavu zopnutia  $SZ$  na 1 a výpočtom pre prvý interval. V opačnom prípade sa stav zopnutia  $SZ$  nastaví na 0 a prebieha výpočet pre druhý interval (tranzistor rozopnutý).

V nasledujúcej časti vývojového diagramu sa kontroluje, či vypočítaná hodnota prúdu  $i_M$  nie je záporná, ak záporná je, tak prúd  $i_M$  sa nastaví na 0 a algoritmus pokračuje výpočtom výstupného prúdu  $i_z$  a stavu zopnutia  $SZ$ . V prípade, že

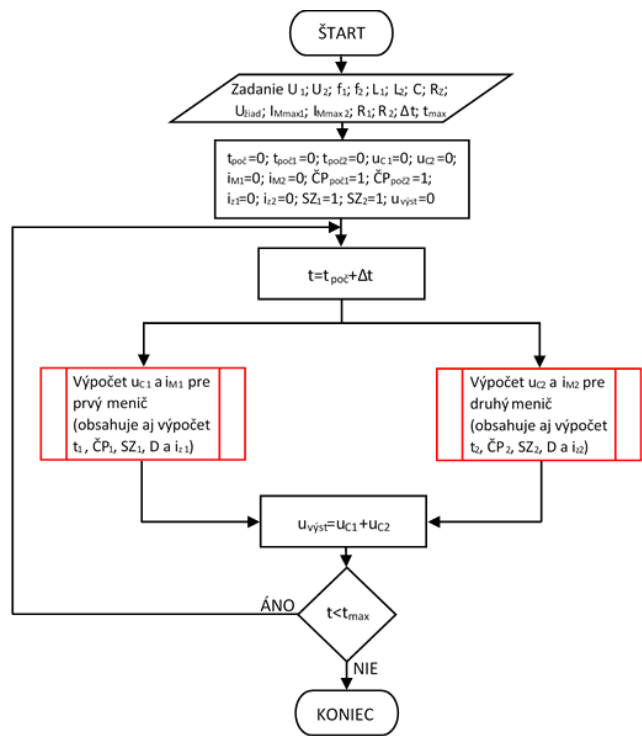
hodnota prúdu  $i_M$  záporná nie je, algoritmus rovno pokračuje výpočtom  $i_z$  a  $SZ$ .

V poslednom kroku sa kontroluje, či nebol dosiahnutý maximálny čas  $t_{\text{max}}$ , ak nebol dosiahnutý, algoritmus sa vracia pred výpočet aktuálneho času  $t$  a čísla periódy  $\check{C}P$ . Celý cyklus sa takto opakuje, až kým nie je dosiahnutý maximálny čas výpočtu. V prípade, že bol dosiahnutý, vývojový diagram končí.

Časť výpočtu, ktorá je zvýraznená červeným blokom obsahuje samotný výpočet  $u_c$  a  $i_M$  (zahŕňa aj výpočet  $t$ ,  $D$ ,  $SZ$ ,  $\check{C}P$  a  $i_z$ ) pre jeden menič. Tento celý blok predstavuje výpočet parametrov jedného meniča, pričom rovnaký algoritmus je použitý v simulačných modeloch pre paralelné a kaskádne zapojenie dvoch DC/DC meničov.

**B. Simulačný model pre paralelne zapojené DC/DC meniče so spoločným filtračným kondenzátorom**

Vývojový diagram tejto paralelnej topológie, ktorá využíva spoločnú filtračnú kapacitu, je možné vidieť na obrázku 2.



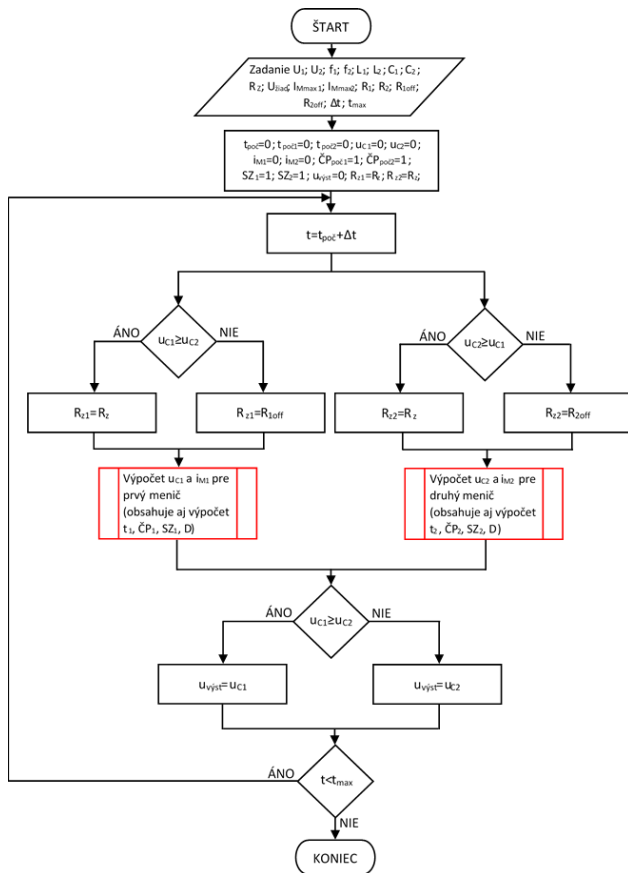
Obr. 2. Vývojový diagram simulačného modelu pre dva paralelne zapojené DC/DC meniče so spoločným kondenzátorom

Prvé dva bloky predstavujú zadanie požadovaných parametrov (konštánt) a tiež zadenie počiatočných hodnôt premenných, podobne, ako tomu bolo v prvom vývojovom diagrame na obrázku Obr. 1. Tieto premenné a konštanty ostávajú rovnaké (ako v prípade samostatného meniča), avšak väčšina z nich musí byť zadená pre každý menič zvlášť. Tretí blok predstavuje krok výpočtu, teda vypočítava aktuálny čas  $t$  pripočítaním  $\Delta t$  k počiatočnému času  $t_{\text{poč}}$ . Nižšie sú dva bloky zvýraznené červenou farbou, ktoré

predstavujú rovnaký podprogram pre každý menič zvlášť. Obsah podprogramu je zvýraznený červeným rámečkom na obrázku Obr. 1. Tento podprogram obsahuje hlavný výpočet napätia  $u_C$  a  $i_M$ , spolu s výpočtom ďalších pomocných parametrov. Tieto dva bloky predstavujú dva meniče, ktoré sú v paralelnom zapojení (viď nasledujúci blok). Nasledujúci blok sčítava vypočítané napätia  $u_{C1}$  a  $u_{C2}$  z obidvoch predchádzajúcich blokov podprogramu. Napätia obidvoch meničov sa totiž sčítavajú vo výstupnej spoločnej kapacite (keďže sa jedná o akumuláciu prúdov obidvoch meničov za element času, teda o akumuláciu nábojov od týchto paralelných meničov). Posledný rozhodovací blok iba kontroluje, či bol dosiahnutý maximálny nastavený čas  $t_{max}$ . V prípade, že tento čas dosiahnutý nebol, výpočet sa vracia pred tretí blok, v ktorom sa opäť zvýši krok výpočtu.

**C. Simulačný model pre paralelne zapojené DC/DC meniče so samostatnými filtračnými kondenzátormi**

Vývojový diagram tejto paralelnej topológie, ktorá využíva samostatné filtračné kapacity, je možné vidieť na obrázku 3.



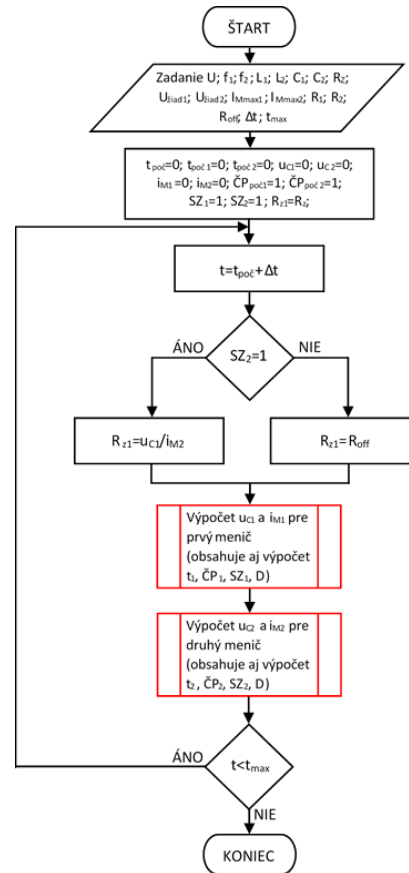
Obr. 3. Vývojový diagram simulačného modelu pre dva paralelne zapojené DC/DC meniče so spoločným kondenzátorom

Prvé tri bloky diagramu sú totožné s tými v predchádzajúcom prípade (použitie spoločnej kapacity), definujú parametre meničov, počítačové hodnoty premenných a tiež pripočítavanie kroku výpočtu po každom cykle. V tejto

topológii sa však počíta s použitím **sčítacích diód**, ktoré majú zabezpečiť stabilné fungovanie paralelného zapojenia tým, že zabránia „prelivu“ energií medzi oboma meničmi. Vzhľadom na túto skutočnosť, nasledujúce bloky diagramu rozhodujú, ktoré napätie z dvoch meničov je väčšie ( $u_{C1}$  alebo  $u_{C2}$ ) a podľa toho určujú ich výstupný odpor (záťaž). Menič, ktorého napätie je väčšie, je pripojený na výstup, teda k záťaži  $R_z$ , ktorú zadal používateľ. Menič, ktorého napätie je menšie, je odpojený od výstupu veľkým odporom  $R_{off}$ , čo predstavuje odpor sčítacej diódy v nevodivom stave (na jej katóde je kladnejší potenciál ako na jej anóde). Nasleduje samotný výpočet aktuálnej hodnoty napätia  $u_C$  a prúdu  $i_M$  (bloky podprogramu vyznačené červenou farbou). Následne algoritmus rozhoduje, ktoré z dvoch vypočítaných napätí  $u_{C1}$  a  $u_{C2}$  je väčšie, to sa potom použije ako výsledné výstupné napätie  $u_{vyst}$  (sčítacie diódy prepúšťajú na výstup vyššie napätie). V závere algoritmus kontroluje, či bol dosiahnutý maximálny stanovený čas. Ak áno, výpočet končí, ak nie, výpočet sa vracia späť k pripočítaniu  $\Delta t$  (krok výpočtu) k aktuálnemu času.

**D. Simulačný model pre kaskádne zapojené DC/DC meniče**

Vývojový diagram kaskádnej topológie je možné vidieť na obrázku 4.



Obr. 4. Vývojový diagram simulačného modelu pre dva kaskádne zapojené DC/DC meniče

Po zadefinovaní vstupných parametrov, počiatkových podmienok a štandardom pripočítavani kroku výpočtu  $\Delta t$  (prvé tri bloky vo vývojovom diagrame), nasleduje rozhodovací proces, ktorého úlohou je určiť hodnotu odporovej záťaže pre prvý menič  $R_{z1}$ . Ak je tranzistor v druhom meniči zopnutý ( $SZ_2=1$ ), tak sa hodnota odporu  $R_{z1}$  bude rovnáť podielu napätia  $u_{C1}$  (napätie prvého meniča na vstupe druhého) a prúdu  $i_{M2}$  (prúd prechádzajúci druhým meničom). Ak je tranzistor v druhom meniči zatvorený ( $SZ_2 \neq 1$ , resp.  $SZ_2=0$ ), hodnota odporu  $R_{z1}$  sa bude rovnáť odporu zatvoreného tranzistora  $R_{off}$  (hodnota, ktorú môže zadať používateľ modelu). Následne, ako je možné vidieť na obrázku 4, prebiehajú výpočty pre obidva meniče za sebou (v sérii), teda nie súčasne (paralelne), ako tomu bolo v predchádzajúcich prípadoch. Bloky podprogramu označené červenou farbou sú rovnaké, ako tie, ktoré boli použité pri modeloch pre paralelné zapojenie DC/DC meničov. Obsah použitého podprogramu je vyznačený na obrázku 1. Vypočítané hodnoty prvého meniča sa používajú pre výpočty parametrov druhého meniča. Na záver prebieha kontrola, či bol dosiahnutý maximálny stanovený čas výpočtu  $t_{max}$ . Ak tento čas dosiahnutý bol, algoritmus končí, ak nie, algoritmus sa vracia ku kroku kedy sa pripočítava čas  $\Delta t$  k aktuálnemu času  $t$ .

### III. UKÁZKA SIMULAČNÉHO MODELU

Ukážku jedného finálneho simulačného modelu (paralelné zapojenie so samostatnými kapacitami), ktorý dokáže simulovať aj dynamické zmeny záťaže, je možné vidieť na obrázku 5.



Obr. 5. Ukážka simulačného modelu pre dva paralelne zapojené DC/DC meniče so samostatnými kapacitami

Ako je možné vidieť na obrázku 5, simulačný model obsahuje dva grafy, ktoré zobrazujú priebeh výstupného napätia a prúdu cievky v meniči, pre oba meniče. Ďalej je možné vidieť polia pre zadávanie požadovaných hlavných parametrov meniča a celého výpočtu. Tieto bunky sú zvýraznené žltou farbou a zadáva ich používateľ. Parametre, ktoré sa v týchto bunkách dajú nastaviť sú: vstupné napätie  $U$ , spínacia frekvencia  $f$ , indukčnosť  $L$ , kapacita  $C$ , hodnota odporu záťaže  $R_z$ , požadované výstupné napätie  $U_{z\text{iad}}$ , maximálna dovolená hodnota prúdu  $I_{M\text{max}}$ , vnútorný odpor meniča  $R$  a krok výpočtu  $\Delta t$ . Model tiež obsahuje dve tlačidlá ActiveX, ktoré spúšťajú program makro napísaný v prostredí VBA (Visual Basic for Applications). Žlté tlačidlo vypočíta

maximálne zvlnenie výstupného napätia, maximálny rozkmit prúdu cievky v meniči a tiež priemernú dobu periódy zvlnenia výstupného napätia. Modré tlačidlo sa používa pri simulácii dynamickej zmeny záťaže. Toto tlačidlo nastaví parameter kroku výpočtu  $\Delta t$  tak, aby k zmene záťaže (výstupný odpor  $R_z$ ) došlo v čo najkritickejšom okamihu.

### IV. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

Výsledky simulácií samostatného DC/DC meniča v ustálenom stave pre dve rôzne hodnoty záťaže ( $R_{z1}=1,2\Omega$  a  $R_{z2}=20\Omega$ ) sa nachádzajú v tabuľkách 1 a 2.

TABUĽKA I. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ SAMOSTATNÉHO DC/DC MENIČA V USTÁLENOM STAVE PRE ODPOR ZÁŤAŽE  $R_{z1}=1,2\Omega$

$U_{\text{vst}}$ [V]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20	0,0950305	3,0426891	0,0001202
30	0,0916888	3,3027232	0,0001154
40	0,0966205	3,3418728	0,0001154
50	0,1062294	3,267252	0,0001154
60	0,0963751	3,4011192	0,0001154
$f$ [Hz]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20000	0,0847589	3,0849027	0,0001
40000	0,0835944	3,1231344	0,0001063
52000	0,0966205	3,3418728	0,0001154
80000	0,0902113	3,2145847	0,0001125
100000	0,1029354	3,3024828	0,0001225
$L$ [ $\mu$ H]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
50	0,038429	3,5209071	0,0000432
100	0,068023	3,5270075	0,0000817
150	0,0966205	3,3418728	0,0001154
250	0,1480815	3,1849807	0,0001827
350	0,1731063	2,9789162	0,0002355
$C$ [ $\mu$ F]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
150	0,3255774	3,3118843	0,0001154
250	0,1981093	3,3110835	0,0001154
500	0,0966205	3,3418728	0,0001154
750	0,0654629	3,3189603	0,0001154
1000	0,0499141	3,3127677	0,0001154

TABUĽKA II. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ SAMOSTATNÉHO DC/DC MENIČA V USTÁLENOM STAVE PRE ODPOR ZÁŤAŽE  $R_{z2}=20\Omega$

$U_{\text{vst}}$ [V]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20	0,0158432	0,8576403	0,0000625
30	0,0276993	0,9977932	0,0000914
40	0,03155	1,1064579	0,000101
50	0,0707291	1,6620581	0,0001923
60	0,0752793	1,6841109	0,0002067
$f$ [Hz]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20000	0,0898342	1,8153987	0,0002375
40000	0,0637346	1,5482766	0,0001813
52000	0,03155	1,1064579	0,000101
80000	0,0329456	1,530989	0,0001032

100000	0,0339536	1,176424	0,0001075
<b>L</b> [μH]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
50	0,0252057	1,570914	0,0000673
100	0,049584	1,6760554	0,0001346
150	0,03155	1,1064579	0,000101
250	0,054298	1,2020911	0,0001731
350	0,0466469	0,9637284	0,0001634
<b>C</b> [μF]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
150	0,1962563	1,5256738	0,0001635
250	0,0501236	1,0251578	0,0000817
500	0,03155	1,1064579	0,000101
750	0,0231716	1,234535	0,0001106
1000	0,0393148	1,7341828	0,0002116

Výsledky simulácií samostatného DC/DC meniča pri vyšetrovaní dynamickej zmeny záťaže (zmena z  $R_{z1}=1,2\Omega$  na  $R_{z2}=20\Omega$ ) je možné vidieť v tabuľke 3.

TABUĽKA III. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ SAMOSTATNÉHO DC/DC MENIČA PRE DYNAMICKÚ ZMENU ODPOROVEJ ZÁŤAŽE Z  $R_{z1}=1,2\Omega$  NA  $R_{z2}=20\Omega$

<b>U<sub>vst</sub></b> [V]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
20	0,7575524	2,8208409	0,0004471
30	0,8285714	2,9738172	0,0005048
40	0,5530809	3,0001816	0,000399
50	0,8909134	2,829428	0,000524
60	0,5092959	2,7799047	0,0004519
<b>f</b> [Hz]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
20000	0,8603348	3,2364289	0,000575
40000	0,9149095	3,2056211	0,0005375
52000	0,5530809	3,0001816	0,000399
80000	0,8914197	2,9012582	0,0005344
100000	0,6638184	2,1219037	0,0003925
<b>L</b> [μH]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
50	0,323795	3,2358278	0,0001971
100	0,6401973	3,2484608	0,0003894
150	0,5530809	3,0001816	0,000399
250	1,0961115	2,3431478	0,0006875
350	1,6698975	2,1577329	0,0009182
<b>C</b> [μF]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
150	2,5227025	2,7143976	0,0003991
250	1,6594404	3,0538199	0,0004856
500	0,5530809	3,0001816	0,000399
750	0,5023989	2,7554781	0,0004664
1000	0,4271387	3,0112186	0,000548

Výsledky simulácií dvoch paralelne zapojených DC/DC meničov so spoločnou kapacitou v ustálenom stave pre dve rôzne hodnoty záťaže ( $R_{z1}=1,2\Omega$  a  $R_{z2}=20\Omega$ ) sa nachádzajú v tabuľkách Tab. 4 a Tab. 5.

TABUĽKA IV. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ DVOCH PARALELNE ZAPOJENÝCH DC/DC MENIČOV SO SPOLOČNOU KAPACITOU V USTÁLENOM STAVE PRE ODPOR ZÁŤAŽE  $R_{z1}=1,2\Omega$

<b>U<sub>vst</sub></b> [V]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
20	0,0918473	2,0161902	0,0001066
30	0,0834698	2,0325862	0,0000895
40	0,0964822	2,0213607	0,0000735
50	0,090484	2,0780106	0,0000922
60	0,0818278	1,9505047	0,00012
<b>f</b> [Hz]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
20000	0,1663055	2,5476785	0,0001947
40000	0,0876783	2,0472136	0,0001138
52000	0,0964822	2,0213607	0,0000735
80000	0,089554	2,0085541	0,0001249
100000	0,0857975	1,9798745	0,0001
<b>L</b> [μH]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
50	0,0704754	2,7549218	0,0000348
100	0,0796032	2,2452401	0,0000649
150	0,0964822	2,0213607	0,0000735
250	0,1285764	1,9799447	0,0001666
350	0,1370724	1,8262775	0,000256
<b>C</b> [μF]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
300	0,2783979	2,0198383	0,0001012
500	0,1603475	2,0059348	0,0000896
1000	0,0964822	2,0213607	0,0000735
1500	0,0626618	2,1026548	0,0000857
2000	0,0473434	2,1197763	0,000094

TABUĽKA V. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ DVOCH PARALELNE ZAPOJENÝCH DC/DC MENIČOV SO SPOLOČNOU KAPACITOU V USTÁLENOM STAVE PRE ODPOR ZÁŤAŽE  $R_{z2}=20\Omega$

<b>U<sub>vst</sub></b> [V]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
20	0,4268324	0,8845097	0,0002855
30	0,4327515	1,0978681	0,00034
40	0,4540123	1,1981275	0,0003026
50	0,5108678	1,1386595	0,0004298
60	0,4802057	1,4548604	0,0004203
<b>f</b> [Hz]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
20000	0,3776764	1,6465089	0,0004349
40000	0,458059	1,0984241	0,0003572
52000	0,4540123	1,1981275	0,0003026
80000	0,5257031	0,9986923	0,0004176
100000	0,5717208	0,8989384	0,0003761
<b>L</b> [μH]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
50	0,0983253	1,6464204	0,0000164
100	0,318129	1,2728713	0,0003667
150	0,4540123	1,1981275	0,0003026
250	0,7986378	0,7193242	0,0005255
350	1,0839459	0,8134357	0,000496
<b>C</b> [μF]	<b>Zvlnenie</b> <b>napätia [V]</b>	<b>Rozkmit prúdu</b> <b>[A]</b>	<b>Čas periódy</b> <b>[s]</b>
300	1,301667	1,1982476	0,0003577
500	0,8263021	1,1981781	0,0003461

1000	0,4540123	1,1981275	0,0003026
1500	0,3384117	1,1981136	0,000332
2000	0,2248036	1,1981053	0,0002921

Výsledky simulácií dvoch paralelne zapojených DC/DC meničov so spoločnou kapacitou pre dynamickú zmenu záťaže (zmena z  $R_{z1}=1,2\Omega$  na  $R_{z2}=20\Omega$ ) je možné vidieť v tabuľke 6.

TABUĽKA VI. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ DVOCH PARALELNE ZAPOJENÝCH DC/DC MENIČOV SO SPOLOČNOU KAPACITOU PRE DYNAMICKÚ ZMENU ODPOROVEJ ZÁŤAŽE Z  $R_{z1}=1,2\Omega$  NA  $R_{z2}=20\Omega$

$U_{vst}$ [V]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20	0,7575524	2,8208409	0,0004471
30	0,8285714	2,9738172	0,0005048
40	0,5530809	3,0001816	0,000399
50	0,8909134	2,829428	0,000524
60	0,5092959	2,7799047	0,0004519
f [Hz]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20000	0,8603348	3,2364289	0,000575
40000	0,9149095	3,2056211	0,0005375
52000	0,5530809	3,0001816	0,000399
80000	0,8914197	2,9012582	0,0005344
100000	0,6638184	2,1219037	0,0003925
L [μH]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
50	0,323795	3,2358278	0,0001971
100	0,6401973	3,2484608	0,0003894
150	0,5530809	3,0001816	0,000399
250	1,0961115	2,3431478	0,0006875
350	1,6698975	2,1577329	0,0009182
C [μF]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
150	2,5227025	2,7143976	0,0003991
250	1,6594404	3,0538199	0,0004856
500	0,5530809	3,0001816	0,000399
750	0,5023989	2,7554781	0,0004664
1000	0,4271387	3,0112186	0,000548

Výsledky simulácií dvoch paralelne zapojených DC/DC meničov so samostatnými kapacitami v ustálenom stave pre dve rôzne hodnoty záťaže ( $R_{z1}=1,2\Omega$  a  $R_{z2}=20\Omega$ ) sa nachádzajú v tabuľkách 7 a 8.

TABUĽKA VII. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ DVOCH PARALELNE ZAPOJENÝCH DC/DC MENIČOV SO SAMOSTATNÝMI KAPACITAMI V USTÁLENOM STAVE PRE ODPOR ZÁŤAŽE  $R_{z1}=1,2\Omega$

$U_{vst}$ [V]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20	0,085161	2,311895	0,0000529
30	0,0676324	2,2081935	0,0000481
40	0,0803045	2,4071596	0,0000324
50	0,0730072	2,2864803	0,0000457
60	0,0684969	2,4145531	0,0000529
f [Hz]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20000	0,1658644	3,0449599	0,0000625
40000	0,0856173	2,4041071	0,0000469

52000	0,0803045	2,4071596	0,0000324
80000	0,0519114	2,0892999	0,0000383
100000	0,0554948	2,135946	0,00005
L [μH]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
50	0,0709386	3,1371367	0,0000217
100	0,0721499	2,6683339	0,0000337
150	0,0803045	2,4071596	0,0000324
250	0,0690086	1,978599	0,0000721
350	0,0963438	1,8741892	0,0001466
C [μF]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
150	0,2318114	2,2722252	0,0000493
250	0,1576252	2,4382582	0,0000397
500	0,0803045	2,4071596	0,0000324
750	0,0527447	2,3669561	0,0000445
1000	0,0347316	2,2374764	0,0000517

TABUĽKA VIII. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ DVOCH PARALELNE ZAPOJENÝCH DC/DC MENIČOV SO SAMOSTATNÝMI KAPACITAMI V USTÁLENOM STAVE PRE ODPOR ZÁŤAŽE  $R_{z2}=20\Omega$

$U_{vst}$ [V]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20	0,1914523	0,837841	0,0000721
30	0,1802254	1,0313414	0,0001178
40	0,1968819	1,071771	0,0001154
50	0,2154122	1,2583134	0,0001034
60	0,2381599	1,4647954	0,0001659
f [Hz]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20000	0,1013297	1,7227599	0,0002437
40000	0,1892197	1,3508829	0,0001469
52000	0,1968819	1,071771	0,0001154
80000	0,2474571	0,9786865	0,0000906
100000	0,262731	0,9321342	0,0000663
L [μH]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
50	0,0868082	1,9547056	0,0000865
100	0,0965541	1,188057	0,0000961
150	0,1968819	1,071771	0,0001154
250	0,3577411	0,9530625	0,0001118
350	0,5035357	0,8193594	0,0001178
C [μF]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
150	0,7801334	1,0253913	0,0000937
250	0,4276014	1,1183936	0,000113
500	0,1968819	1,071771	0,0001154
750	0,1370742	1,211307	0,0001443
1000	0,1220125	1,2112889	0,0001082

Výsledky simulácií dvoch paralelne zapojených DC/DC meničov so samostatnými kapacitami pre dynamickú zmenu záťaže (zmena z  $R_{z1}=1,2\Omega$  na  $R_{z2}=20\Omega$ ) je možné vidieť v tabuľke 9.

TABUĽKA IX. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ DVOCH PARALELNE ZAPOJENÝCH DC/DC MENIČOV SO SAMOSTATNÝMI KAPACITAMI PRE DYNAMICKÚ ZMENU ODPOROVEJ ZÁŤAŽE Z  $R_{z1}=1,2\Omega$  NA  $R_{z2}=20\Omega$

$U_{vst}$ [V]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20	0,1911081	3,0174067	0,0001455
30	0,2673669	3,0178152	0,0001767
40	0,2908388	3,0339632	0,0001923
50	0,286769	3,05944	0,0002548
60	0,2796739	3,0395295	0,0002716
f [Hz]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
20000	0,3053925	3,0407527	0,0002438
40000	0,175381	3,0425036	0,0001734
52000	0,2908388	3,0339632	0,0001923
80000	0,284971	3,0349912	0,0002078
100000	0,266063	3,0458065	0,0001838
L [μH]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
50	0,1136388	3,0876701	0,0000841
100	0,2121774	3,066546	0,0001683
150	0,2908388	3,0339632	0,0001923
250	0,4338616	3,0123494	0,0002797
350	0,3206573	3,0094016	0,0002716
C [μF]	Zvlnenie napätia [V]	Rozkmit prúdu [A]	Čas periódy [s]
150	0,8953617	3,0445296	0,0001899
250	0,5331259	3,0412739	0,0001899
500	0,2908388	3,0339632	0,0001923
750	0,1935596	3,0435396	0,0002308
1000	0,373348	0,6058231	0,0000192

#### V. VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Pri statickej analýze samostatného DC/DC meniča, sú najzaujímavejšie priebehy zobrazujúce závislosť zmeny zvlnenia výstupného napätia od indukčnosti a kapacity. Grafy ukazujú, že s narastajúcou indukčnosťou sa zvlnenie zväčšuje, zatiaľ čo s narastajúcou kapacitou sa znižuje. Z toho vyplýva, že pre zníženie zvlnenia výstupného napätia, je možné znižovať indukčnosť a/alebo zvyšovať kapacitu. Avšak, znižovanie indukčnosti môže byť realizované iba po určitú minimálnu hodnotu, aby mohol menič správne fungovať. Pri veľkom znížení indukčnosti sa môže činnosť meniča dostať do oblasti prerušovaných prúdov. Podobne, aj zvyšovanie hodnoty kapacity nie je možné vykonať bez limitu, pretože to negatívne ovplyvňuje dynamiku meniča, resp. rýchlosť jeho odozvy na dynamické zmeny záťaže.

Konkrétne pri zvýšení hodnoty indukčnosti z  $50\mu\text{H}$  na  $350\mu\text{H}$  sa zvlnenie výstupného napätia zvýši z  $0,038\text{V}$  na  $0,173\text{V}$  (pri výstupnom napätí  $5\text{V}$  a hodnote záťažného odporu  $R_{z1}=1,2\Omega$ ). Pri zvýšení indukčnosti o  $300\mu\text{H}$  sa teda zvlnenie výstupného napätia zvýši o takmer  $150\text{mV}$ . To je spôsobené tým, že pri zvýšenej indukčnosti sa v cievke akumuluje väčšia energia, ktorú už príslušná kapacita nedokáže absorbovať bez výrazného nárastu napätia. Pri použití malej kapacity s hodnotou  $150\mu\text{F}$  je zvlnenie výstupného napätia  $0,326\text{V}$ . Pri zvýšení kapacity na  $1000\mu\text{F}$  je možné toto zvlnenie znížiť až na hodnotu  $0,05\text{V}$  (pri hodnote indukčnosti  $150\mu\text{H}$ ). Vzhľadom

k týmto výsledkom, majú teda obidva parametre (indukčnosť a kapacita) zásadný vplyv na zvlnenie výstupného napätia. Aj keď vplyv kapacity na výstupné napätie je ešte výraznejší ako vplyv indukčnosti, je potrebné aby boli hodnoty týchto dvoch prvkov vyvážené. V tomto prípade, použitie indukčnosti s hodnotou  $150\mu\text{H}$  a kapacity s hodnotou  $500\mu\text{F}$ , sa na základe odsimulovaných priebehov javí ako vhodný kompromis z pohľadu veľkosti zvlnenia výstupného napätia.

Ukazuje sa, že rozkmit prúdu v meniči je relatívne konštantný pri sledovaných parametroch. Najvýraznejšie zníženie rozkmitu spôsobuje zvýšenie indukčnosti. Pri zvýšení indukčnosti o  $300\mu\text{H}$  (z  $50\mu\text{H}$  na  $350\mu\text{H}$ ) sa rozkmit prúdu znižuje približne o  $0,5\text{A}$  (z hodnoty  $3,52\text{A}$  na  $2,97\text{A}$ ). Vo všeobecnosti zvýšenie ohmickej záťaže na výstupe vo všetkých prípadoch významnejšie znižuje rozkmit prúdu. Pokles je približne  $2\text{A}$  pri zvýšení záťaže z  $1,2\Omega$  na  $20\Omega$ . Podobne, aj čas periódy zvlnenia výstupného napätia je vo väčšine prípadov bez výrazných zmien. Jedine pri zvýšení indukčnosti sa čas tejto periódy výraznejšie predlžuje. Konkrétne pri zmene indukčnosti z  $50\mu\text{H}$  na  $350\mu\text{H}$  sa čas periódy predlžuje o približne  $0,2\text{ms}$  (z hodnoty  $43,2\mu\text{s}$  na hodnotu  $235,5\mu\text{s}$ , pri hodnote záťaže  $R_{z1}=1,2\Omega$ ). To je spôsobené tým, že väčšia hodnota indukčnosti vyžaduje dlhší čas na akumulovanie potrebnej energie v cievke. Podobné predĺženie času periódy zvlnenia výstupného napätia by však malo nastať aj pri zvýšení kapacity kondenzátora, čo sa pri grafoch pre statickú analýzu nepotvrďuje. Keďže je sledovaný ustálený stav, kedy už cievka dokáže dodávať dostatok prúdu do kondenzátora, teda jeho nabitie netrvá výrazne dlhšie, resp. sa ani nestihne dostatočne vybiť v predchádzajúcej perióde. Grafy pre dynamickú analýzu však už ukazujú aj vplyv zvýšenia kapacity na čas tejto periódy. Konkrétne pri zvýšení výstupnej kapacity z  $500\mu\text{F}$  na  $1\text{mF}$  sa čas periódy zvyšuje približne o  $150\mu\text{s}$  (z hodnoty  $399\mu\text{s}$  na hodnotu  $548\mu\text{s}$ ).

Pri pohľade na grafy dynamickej analýzy je možné pozorovať dôležitosť vhodného vyváženého jednotlivých parametrov. Pri hraničných hodnotách ( $20\text{V}$  a  $60\text{V}$  pre vstupné napätie  $U_{vst}$ ,  $50\mu\text{H}$  a  $350\mu\text{H}$  pre indukčnosť  $L$ ,  $150\mu\text{F}$  a  $1000\mu\text{F}$  pre kapacitu  $C$ ,  $20\text{kHz}$  a  $100\text{kHz}$  pre spínaciu frekvenciu  $f$ ) nastavovaných parametrov sú výkyvy sledovaných parametrov vyššie, zatiaľ čo pri stredných hodnotách, ktoré boli zvolené za „referenčné“ sú sledované parametre väčšinou najnižšie (čo je žiaduce hlavne pri zvlnení výstupného napätia). Týmto „referenčnými“ hodnotami sú: napájacie napätie  $U_{vst}=40\text{V}$ , spínacia frekvencia  $f=52\text{kHz}$ , indukčnosť  $L=150\mu\text{H}$ , kapacita  $C=500\mu\text{F}$ , vnútorný odpor meniča  $R=0,1\Omega$  a požadované výstupné napätie  $U_{vst}=5\text{V}$ . Z daných pozorovaní a výsledkov sa tieto parametre javia ako najvhodnejšie, keďže prinášajú dobrú odozvu na dynamickú zmenu záťaže. Je to možné pozorovať aj na grafoch zobrazujúcich závislosti pre čas periódy zvlnenia výstupného napätia, kedy pri použití spomínaných hodnôt je tento čas najnižší. Nižší čas tejto periódy by mal prakticky znamenať aj nižšie zvlnenie výstupného napätia, čo je pre použitie meničov v napájacích zdrojoch najdôležitejším parametrom. Zvýšenie hodnoty kapacity prináša zníženie zvlnenia v statickom stave a taktiež znižuje prepätie pri dynamickej zmene záťaže (tzv. odľahčenie meniča). Zvýšenie kapacity však zároveň prináša aj zhoršenie odozvy meniča na dynamické zmeny. Z toho

vyplýva, že pri navrhovaní každého meniča je potrebné hľadať vhodné parametre vzhľadom na kladené požiadavky, napr. prípustná veľkosť zvlnenia výstupného napätia alebo požadovaná rýchlosť meniča. Na to môže dobre poslúžiť aj navrhnutý simulačný nástroj v Exceli.

Pri statickej analýze paralelných zapojení, sú výsledky obidvoch topológií veľmi podobné, rozdiely v zvlnení napätia sú veľmi malé, pohybujú sa v rozpätí od 0,01V po 0,06V (vyššie zvlnenie má topológia so spoločným kondenzátorom). Rozkmit prúdu je vo väčšine simulačných výsledkov vyšší pre topológiu so samostatnými kapacitami, rozdiel sa pohybuje od 0,2A do 0,5A. Najvýraznejšie rozdiely v týchto topológiách je možné pozorovať pri čase periódy zvlnenia výstupného napätia. Pre simuláciu s použitím najvyššej indukčnosti  $L=350\mu\text{H}$  (vtedy je pre odpor  $R_z=1,2\Omega$  tento čas najvyšší) je výsledný čas periódy pre topológiu so spoločným kondenzátorom 256 $\mu\text{s}$ , pre topológiu so samostatnými kondenzátormi je to 147 $\mu\text{s}$ . Z toho vyplýva, že použitie menších kapacít pre každý menič zvlášť, je z pohľadu dynamiky systému výhodnejšie, ako použitie jednej väčšej spoločnej kapacity (s ekvivalentnou hodnotou kapacity).

Pri výsledkoch dynamickej analýzy je možné pozorovať podobný rozdiel v čase periódy zvlnenia výstupného napätia. Pri použití indukčnosti  $L=350\mu\text{H}$  je pre topológiu so spoločnou kapacitou tento čas 508 $\mu\text{s}$  a pre topológiu so samostatnými kapacitami je 272 $\mu\text{s}$ . Teda takmer dvojnásobný čas, podobne ako tomu bolo pri statickej analýze. Rozdiel vo zvlnení výstupného napätia je však výraznejší ako pri statickej analýze. Pri použití indukčnosti  $L=250\mu\text{H}$  je zvlnenie pre spoločný kondenzátor 0,827V a pre samostatné kondenzátory je to 0,434V, teda opäť takmer dvojnásobný rozdiel. Pri použití tzv. „referenčných hodnôt“, ktoré boli spomenuté pri analýze výsledkov pre jeden DC/DC menič vyššie (vtedy mali tieto hodnoty dobré výsledky aj pri dynamickej analýze, aj pri statickej analýze zvlnenia výstupného napätia), je rozdiel medzi týmito dvoma topológiami nezanedbateľný. Pri použití spoločného kondenzátora je zvlnenie 0,547V a pri použití samostatných kapacít je to 0,291V, teda opäť takmer dvojnásobne nižšie zvlnenie v prípade druhej menovanej topológie.

Z daných výsledkov vyplýva, že predovšetkým z hľadiska dynamiky systému a lepšej odozvy na zmenu záťaže, je lepšou topológiu tá, ktorá používa samostatnú kapacitu pre každý menič.

## VI. PRÍNOS SIMULAČNÝCH MODELOV V EXCELI

Simulačné modely v Exceli boli vytvorené na základe výsledkov prechodnej analýzy štandardného zapojenia znižovacieho DC/DC meniča. Inými slovami, simulačné modely boli vytvorené pomocou teoretických poznatkov z elektrotechniky a matematiky. To znamená, že simulačné výsledky z týchto modelov môžu byť aplikované všeobecne, na širší rad znižovacích DC/DC meničov, teda použitie týchto modelov nie je obmedzené iba pre zapojenie s konkrétnou súčiastkou (napr. konkrétny integrovaný spínaný regulátor). Výsledky simulácií realizovaných pomocou týchto modelov môžu byť o niečo menej presné v porovnaní so

simulačnými výsledkami, ktoré boli získané pomocou špecializovaných nástrojov (napr. PSpice) pre konkrétne súčiastky (modely z knižnice by mali presne zodpovedať reálnym typom). Avšak zhotovené simulačné modely ponúkajú pomerne presný obraz o fungovaní meniča (prípadne ich sériovo-paralelných zapojení). Navyše presnosť je možné meniť parametrom  $\Delta t$ , ktorý predstavuje krok výpočtu. Čím je krok výpočtu menší, tým je simulácia presnejšia, avšak menší krok výpočtu vyžaduje viac výpočtov (riadkov v Exceli), v dôsledku čoho sa zväčšuje objem dát v simulačnom modeli a tiež sa mierne predlžuje trvanie simulačných výpočtov.

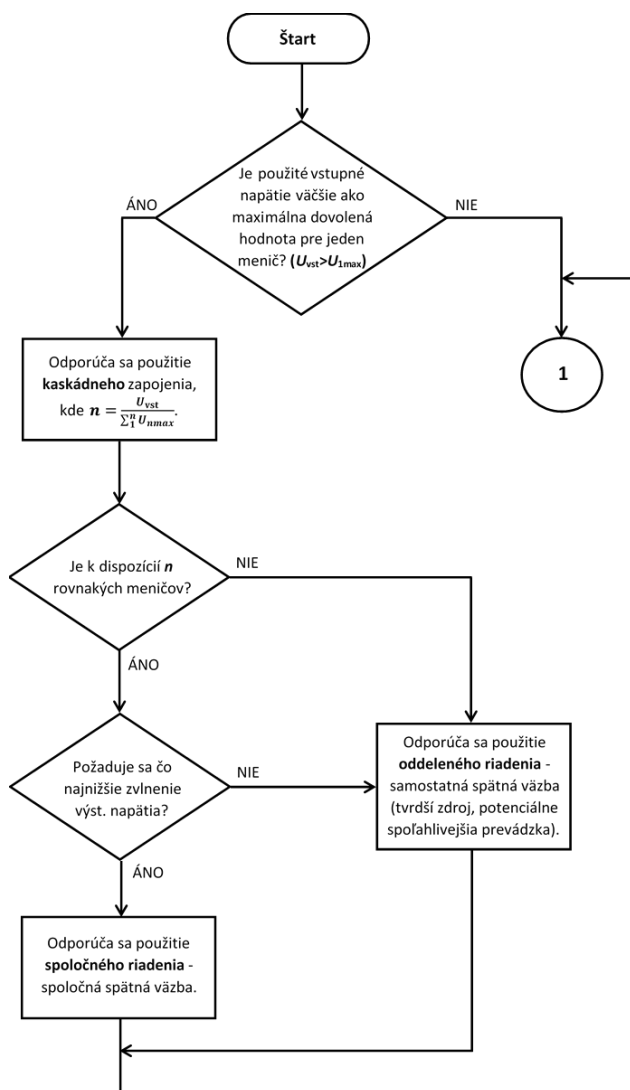
Veľkou výhodou simulačných modelov v Exceli je modifikovateľnosť a možnosť tieto modely rôzne prispôbovať a rozširovať o nové funkcie. Z jednoduchého simulačného modelu pre jeden DC/DC menič, ktorý nemal žiadne rozšírené makro funkcie, boli vytvorené modely pre simuláciu paralelných topológií a kaskády, pričom dokážu vypočítavať a zobrazovať maximálne zvlnenie výstupného napätia, rozkmit prúdu cievky v meniči a dobu periódy zvlnenia výstupného napätia. Neskôr boli modely upravené tak, aby umožnili simulovať a zistiť odozvu na dynamické zmeny odporovej záťaže na výstupe.

Ďalším významným prínosom (ak nie najvýznamnejším) je rýchlosť simulácie a možnosť pozorovať vplyv zmien parametrov meniča v reálnom čase. Pri zmene niektorého z parametrov meniča (napr. indukčnosť alebo kapacita) trvá výpočet simulácie iba niekoľko sekúnd, pričom sa daná zmena následne prejaví graficky. Konkrétne pri zmene indukčnosti druhého meniča (paralelné zapojenie so samostatnými kapacitami) zo 100 $\mu\text{H}$  na 150 $\mu\text{H}$  trval priemerný čas výpočtu 5s (viď obrázok Obr. 118). Pri použití simulačného programu PSpice (v rámci OrCAD systému) je priemerný čas simulácie pri akejkoľvek zmene 24s (paralelné zapojenie so samostatnými kapacitami, viď obrázok Obr. 119). Najvýraznejší rozdiel medzi týmito dvoma simulačnými nástrojmi, z hľadiska rýchlosti simulácie, sa však prejavuje pri kaskádnom zapojení dvoch meničov (program musí vypočítavať prechodný dej, pričom vstupnými parametrami sú výsledky iného prechodného deja). Pri rovnakej zmene indukčnosti ako v predchádzajúcom prípade, trvá simulácia v modeli Excel (kaskádne zapojenie) približne **12 sekúnd** (viď obrázok Obr. 120). Simulácia rovnakej zmeny v kaskádnom zapojení pomocou programu PSpice (viď obrázok Obr. 121), trvá približne **1 minútu a 35 sekúnd**. Časy simulácie sa samozrejme môžu u rôznych zariadení líšiť, avšak je veľmi pravdepodobné, že simulácia v Exceli bude vždy výrazne rýchlejšia v porovnaní so systémom PSpice, najviac však pri zložitejších zapojeniach (paralelné topológie a hlavne kaskáda). Vďaka rýchlosti simulácie a spôsobu vykresľovania grafického priebehu (plynulá zmena v reálnom čase), umožňujú vytvorené modely lepšie odporovať vplyvy spôsobené zmenou niektorého z parametrov.

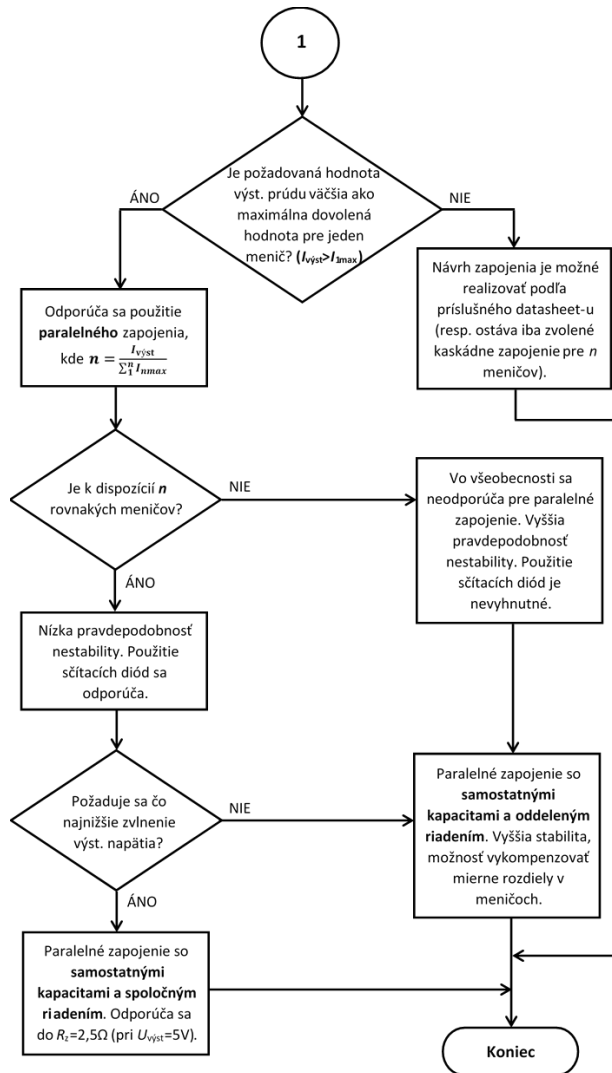
## VII. ZÁVEREČNÉ ODPORÚČANIA

Na základe všetkých zistení (výsledky simulácií a meraní), ktoré boli zhrnuté vyššie, je možné vytvoriť vývojový diagram, ktorý poslúži ako univerzálny návod pre voľbu zapojenia

(paralelne, kaskádne, alebo ich kombinácia) meničov na základe konkrétnych požiadaviek (obrázky 6 a 7).



Obr. 6. Prvá časť diagramu, ktorý slúži ako návod pre voľbu zapojenia



Obr. 7. Druhá časť diagramu, ktorý slúži ako návod pre voľbu zapojenia

POĎAKOVANIE

Článok bol vypracovaný s podporou slovenského grantového projektu FEI-2020-61.

LITERATÚRA

- [1] V. Šimko, D. Kováč, I. Kováčová, "Teoretická elektrotechnika 2," *Elfa*, Košice, 2000. ISBN 80-88964-44-X.
- [2] D. Schweiner, D. Kováč, "Výpočet prechodného deja pri spínaní znižovacieho DC/DC meniča pre aperiodický priebeh veličín," *JIEE Časopis priemyselnej elektrotechniky*. Roč. 2, č. 1, 2018. ISSN 2454-0900.
- [3] D. Schweiner, D. Kováč, "Výpočet prechodného deja pri spínaní znižovacieho DC/DC meniča pre kvazistacionárny priebeh veličín," *JIEE Časopis priemyselnej elektrotechniky*. Roč. 2, č. 2, 2018. ISSN 2454-0900.



# Vypočítateľná Lean Formalizácia Mriežok a Celulárnych Automatov

František Silváši

Technická Univerzita v Košiciach

Email: frantisek.silvasi@tuke.sk

Martin Tomášek

Technická Univerzita v Košiciach

Email: martin.tomasek@tuke.sk

**Abstrakt**—This paper is a summary of the dissertation thesis "Computable Lean Formalization of Grids and Cellular Automata". We show how to define two-dimensional orthogonal rectangular lattices in the mechanized environment of Lean. Furthermore, we build a theory of computable cellular automata thereupon. We demonstrate on pertinent examples the significance of preservation of computability by using it to formally prove selected properties.

**Abstrakt**—Tento článok je sumarizácia dizertačnej práce "Computable Lean Formalization of Grids and Cellular Automata". Ukážeme, ako v mechanizovanom prostredí interaktívneho dokazovača Lean definovať dvoj-rozmerné ortogonálne obdĺžnikové mriežky, nad ktorými následne vybudujeme vypočítateľnú teóriu celulárnych automatov. Na vhodných príkladoch ukážeme význam zachovania vypočítateľnosti a ako ju použiť pri formálnych dokázoch vybraných vlastností.

**Kľúčové slová** – Automatizácia Dôkazov, Celulárne Automaty, Formalizácia, Lean, Vypočítateľnosť

## I. ÚVOD A KONTEXT

Táto práca technicky predstavuje dve separátne mechanizácie – formalizácia mriežok a na nej postavená teória celulárnych automatov. Interaktívny dokazovač viet použitý pre vývoj je Lean[1], čo je dôkazový asistent založený na teórii závislých typov. Taktiež je dôležité zopakovať, že tento článok je sumár dizertačnej práce prvého autora, ktorá tranzitívne obsahuje výsledky už publikované[8].

Treba podotknúť, že kladieme veľký dôraz na zachovanie vypočítateľnosti v zmysle reflexie na malej škále[2]. Hlavným dôvodom je to, že chceme mať schopnosť simulácie celulárnych automatov priamo v Leane, čo nám taktiež pomôže s vypočítateľnými dôkazmi. Dobrým príkladom v tomto smere je formalizácia problému štyroch farieb[3] (tzv. Four-Color theorem), ktorá využíva formálne overené výpočty preto, lebo aj pôvodný matematický dôkaz daného problému bol silne závislý na tom, že bolo nutné počítačom overiť niekoľko tisíc možností priestorového rozloženia grafov. V našom prípade sa zachovanie vypočítateľnosti prejavuje v rôznych aspektoch, ako napr. obmedzenie veľkostí mriežok na konečné, čo tranzitívne ovplyvňuje ohraničenie konfigurácií celulárnych automatov.

Prirodzene koncept údajov, ktoré sú opísané tak, že je podstatná ich relatívna pozícia je bežný. Asi najzjavnejším príkladom sú matice, kde poloha prvku je rovnako

dôležitá ako jeho hodnota. Vzhľadom na všadeprítomnosť tejto jednoduchšej konštrukcie nie je prekvapivé, že existuje veľa štúdií, ktoré sa jej venujú. Avšak pohľad autorov na vec sa javí byť konzistentný vo všetkých prípadoch a vedie k strate abstrakcie – deje sa to, že autori neuvažujú o takýchto štruktúrach abstraktne ako o relatívne umiestnených prvkoch, ale zameriavajú sa na ich konkrétny prípad použitia. To vedie k tomu, že je stále ad-hoc vytvorené nové riešenie bez toho, aby sa dal využiť už existujúci, všeobecný postup. Napríklad, dá sa predpokladať, že každý moderný dokazovač poskytuje rozhranie k maticiam, prirodzene spolu s formuláciou ich vlastností a s korešpondujúcimi dôkazmi. Žiaľ by bolo komplikované použiť toto riešenie napríklad pre implementáciu šachovnice – prirodzene je z tohto pohľadu sémantika konceptov extrémne odlišná a to aj napriek tomu, že technicky by matica mohla reprezentovať dvoj-rozmerné pole osem krát osem, ktoré obsahuje nejaký súčtový typ reprezentujúci šachové figúrky. Ako konkrétne príklady kontrastu môžeme uviesť dve štúdie používajúce Coq – Magaudove matice[4] a Malikovičove šachové algoritmy[5]. Prvá z nich na preprezentáciu používa zoznamy obmedzenej dĺžky a poskytuje rôzne operácie nad maticami, zatiaľ čo druhá používa binárne funkcie z riadku a stĺpcu ku mapovanej hodnote a definuje šachové algoritmy. Aj napriek tomu, že pojednávajú o rozdielnych konceptoch, zdieľajú abstraktnú vlastnosť takú, že tvoria mriežku.

Čo sa týka formalizácie celulárnych automatov, nevieme o tom, že by existovalo akékoľvek iné riešenie, takže je ťažké ju porovnať s inými prístupmi – radi by sme ale poznamenali, že sa jedná viac-menej o špecifický prípad všeobecných automatov, ktoré boli adresované v mnohých štúdiách, počnúc všeobecnými prístupmi, napríklad mechanizácia celej triedy konečnostavových automatov[6] až po viac špecializované aplikácie, napríklad formalizácia regulárnych jazykov[7], ktoré sú úzko spojené s konečnými automatmi.

## II. FORMALIZÁCIA

Celá formalizácia v Leane je dostupná na <https://github.com/frankSil/CAExtensions>. Je kompletná v zmysle takom, že sú dokázané všetky Leanom predpísané dôkazové obligácie. Inými slovami, ak sme ochotní veriť, že Lean odmietne všetky nekorektné dôkazy, tak si môžeme byť istí, že naše uvažovanie je vporiadku. Taktiež by sme radi poznamenali, že uvedieme len najrelevantnejšie vety a definície. Dôkazy

budú formulované v prirodzenom jazyku a ich Lean verzia je v spomínanom repozitári – v prípade akýchkoľvek nejasností je možné sa pozrieť do kódu, kde je všetko veľmi explicitne sformulované a dokázané.

### A. Mriežky a ich implementácia

Mriežky definujeme postupne. Najprv máme relatívnu verziu, teda bez referenčného bodu:

```
class relative_grid (α : Type*) :=
  (carrier : Type)
  (rows    : α → ℕ)
  (cols    : α → ℕ)
  (nonempty : Πg, rows g * cols g > 0)
  (contents : Πg,
    fin (rows g) → fin (cols g) →
      carrier
  )
```

Z definície vyplýva, že je možné definovať akúkoľvek konkrétnu inštanciu tohto abstraktného predpisu, vzhľadom na parameterizáciu nad  $\alpha$ . Člen *carrier* reprezentuje typ prvkov mriežky. Prirodzene každá mriežka má konečný počet riadkov (*rows*) a stĺpcov (*cols*) – tie sú striktné pozitívne, čo je zabezpečené poľom *nonempty*. Najdôležitejšia časť definície je funkcia *contents*, ktorá reprezentuje údaje pre fixnú mriežku  $g$  ako mapovanie z riadku a stĺpca k zodpovedajúcemu prvku. Všimnime si, že závislé typy nám pomôžu zaručiť konečnosť reprezentácie, keďže *fin n* je množina  $\{0 \dots n-1\}$  a tranzitívne je teda obmedzený definičný obor funkcie *contents*.

Prechod ku absolútnej verzii je triviálny, stačí pridať dvojicu súradníc  $x$  a  $y$ , v našom prípade označenú ako *point*.

```
class grid (α : Type*)
  extends relative_grid α :=
  (bl : α → point)
```

Triedy (*class*) v Leane reprezentujú len abstraktné popisy, preto je potrebné vytvoriť taktiež konkrétne inštalácie a uviesť mapovanie k ich abstraktnému rozhraniu. My uvedieme dve možnosti, no je dobré si uvedomiť, že celé rozhranie je navrhnuté s možnosťou rozšírenia, preto tieto dva príklady taktiež slúžia ako návod pre zostrojenie ďalších konkrétnych implementácií.

Ako prvý príklad uvedieme mriežku reprezentovanú ako jednorozmerné pole, ktorého dĺžka je obmedzená na úrovni typov. Tieto polia sú v Leane už definované, kde *vector*  $\alpha$   $n$  reprezentuje pole prvkov typu  $\alpha$  s  $n$  prvkami. Malá poznámka, skutočná definícia je rozdelená na mriežku s referenčným bodom a bez – ako sme už spomínali, v prípade záujmu je možné konzultovať github repozitár.

```
structure vec_grid0 (α : Type) :=
  (r : ℕ)
  (c : ℕ)
  (h : r * c > 0)
  (contents : vector α (r * c))
  (o : point)
```

Mapovanie na triedu je relatívne jednoduché, jediná netriviálna časť je korešpondencia poľa s funkciou – riešenie je mapovanie páru koordinátov  $(y, x)$  na  $n$ tý prvok vektoru kde

$n = y * g.c + x$ . Takto interpretujeme lineárnu reprezentáciu ako dvojicu koordinátov. V Leane:

```
instance ag_vec_grid0 {α : Type} :
  relative_grid (vec_grid α) := {
  carrier := α,
  rows    := λg, g.r,
  cols    := λg, g.c,
  nonempty := λg, g.h,
  contents := λg y x,
    g.contents.nth {
      y.1 * g.c + x.1, ...,
    }
  bl      := λg, g.o
}
```

Niekedy použijeme ... pre chýbajúce dôkazy – tie sú samozrejme dostupné v kóde. Napríklad tu sa vyskytli pre dôkaz toho, že  $y.1 * g.c + x.1 < g.c * g.r$ , čo je samozrejme jednoduché dokázať. Druhá implementácia je založená na funkcii. Jej definícia v Leane je nasledovná:

```
structure fgrid0 (α : Type) :=
  (r : ℕ)
  (c : ℕ)
  (h : r * c > 0)
  (o : point)
  (contents : bounded o.y (o.y + r) →
    bounded o.x (o.x + c) → α)
```

Mapovanie je triviálne, takže jeho špecifiká v texte neuvedieme. Jedna z najdôležitejších operácií je možnosť extrahovať prvky mriežky z jej abstraktnej reprezentácie – zakrátko ukážeme, aké využitia má, no najprv sa pozrime na proces, akým také niečo docielime. Najjednoduchšia reprezentácia prvkov je jednoducho lineárny zoznam, kde zachováme relatívnu pozíciu riadok po riadku. Postup bude nasledovný. Najprv potrebujeme vygenerovať koordináty všetkých prvkov mriežky. Potom ich potrebuje preložiť vzhľadom na relatívny bod  $(0, 0)$ , aby sme mohli použiť *contents* definície *relative\_grid*. Následne už len potrebujeme mapovať koordináty cez spomínanú funkciu.

Generovanie koordinátov prebieha v dvoch fázach. Najprv potrebujeme funkciu generujúcu jeden riadok. Definujeme ju nasledovne.

```
def grp (a b row : ℤ) : list point :=
  map (uncurry point.mk) $
  zip (range_pure a b)
      (repeat row |b - a|)
```

kde *range\_pure a b* je jednoducho  $a, a+1, \dots, b-1$ . Následne ju vieme použiť na pokrytie celej mriežky.

```
def gip (p1 p2 : point) : list point :=
  join (map (grp p1.x p2.x)
    (range_pure p1.y p2.y))
```

Čo sa prekladu koordinátov týka, vzhľadom na rovnakú kardinalitu  $\mathbb{N}$  a  $\mathbb{Z}$  je zjavné, že sa jedná o izomorfné reprezentácie toho istého konceptu, takže existuje translácia oboma smermi. My uvedieme len tú relevantnú – z absolútnych do 0-relatívnych. Ešte poznamenáme, že *grid\_point* je absolútny bod zatiaľčo *relative\_point* je relatívny bod.

```
def relpoint_of_gpoint {α : Type*} [grid α]
```

```
{g : α} (p : grid_point g) :
relative_point g
:= ⟨
  ⟨|p.y.1 - gbl.y|, ...⟩,
  ⟨|p.x.1 - gbl.x|, ...⟩
⟩
```

Teraz pomocná funkcia pre finálne mapovanie – tá nám umožní získať prvok na pozícii  $(x, y)$  v mriežke.

```
def abs_data {α : Type*} [grid α] (g : α)
(gp : grid_point g) :=
let rp := relpoint_of_gpoint gp in
(contents g) rp.x rp.y
```

Konečne môžeme definovať funkciu, ktorá nám transformuje abstraktnú mriežku na zoznam jej prvkov.

```
def generate {α : Type*} [grid α] (g : α)
:= map (
abs_data g o grid_point_of_prod
o inject_into_bounded g
) (attach $ gip g)
```

Pre túto funkciu budeme používať prefixnú notáciu  $\wp$  s najvyššou možnou prioritou. Na chvíľu sa pozastavme aby sme poznamenali, že v práci sme formulovali a dokázali množstvo vlastností všetkých týchto funkcií – sú samozrejme k nahliadnutiu v priloženom repozitári a taktiež sa veľa z nich nachádza explicitne v dizertačnej práci. Treba poznamenať, že budeme používať notáciu  $|x|$  aj ako absolútnu hodnotu, aj ak veľkosť/dĺžku štruktúry (zoznamu, mriežky, atp.). Pre zjednodušenie práce v Leane kde máme homogénnu rovnosť, absolútnu hodnotu budeme používať aj ako injekciu  $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$ .

Z hľadiska vypočítateľnosti je táto definícia relatívne zaujímavá. Napríklad ju môžeme použiť na serializáciu abstraktných mriežok na človekom čitateľnú reprezentáciu. Pre nás je ešte viac relevantná v kontexte formálneho uvažovania o mriežkach – budeme ju používať na konverziu výrokovej rovnosti na vypočítateľnú / rozhodnuteľnú. Platí totiž nasledovná dôležitá veta:

**Veta 1.** *Pre ľubovoľné dve mriežky typu  $fgrid_0$ , označené  $g_1$  a  $g_2$  s rovnakým počtom riadkov a stĺpcov a so zhodnými počítateľnými bodmi,  $g_1 = g_2 \iff \wp g_1 = \wp g_2$ .*

*Dôkaz.* Pre smer  $\rightarrow$  je dôkaz triviálny. Teraz potrebujeme ukázať injektivitu funkcie *generate* pre  $fgrid_0$ . Z predpokladov vyplýva, že stačí ukázať  $g_1.contents = g_2.contents$ , pre nás len z extensionálneho hľadiska, teda  $g_1.contents \langle x, \dots \rangle \langle y, \dots \rangle = g_2.contents \langle x, \dots \rangle \langle y, \dots \rangle$ . Nech  $i := |x - g_1.o.y| * g_1.c + |y - g_1.o.x|$ . Zjavne,  $0 \leq i < |g_1|$ . Dve sekvencie sú ekvivalentné práve vtedy keď majú zhodné prvky na každej i-tej pozícii, takže máme

$$n^{th} \wp g_1 i = n^{th} \wp g_2 i$$

Tiež platí (dôkaz v dizertačnej práci), že  $n$ ty prvok  $\wp g$ , pre  $n < |g|$ , je  $abs\_data\ g\ (gbl.y + n / cols, gbl.x + n \bmod cols)$ , kde  $gbl$  je ľavý spodný roh mriežky. Preto sa dostávame ku kroku

$$g_1.contents\ p_1\ p_2 = g_2.contents\ p_1\ p_2$$

kde

$$p_1 = \langle g_1.o.y + \frac{|y - g_1.o.x| + |x - g_1.o.y| * g_1.c}{g_1.c}, \dots \rangle$$

$$p_2 = \langle g_1.o.x + |y - g_1.o.x| \bmod g_1.c, \dots \rangle$$

a s trochou modulárnej aritmetiky máme  $p_1 = \langle x, \dots \rangle$  and  $p_2 = \langle y, \dots \rangle$ , čím je dôkaz hotový.  $\square$

Prirodzene, táto ekvivalencia platí aj pre  $vec\_grid_0$ . Vo všeobecnosti pre ľubovoľnú mriežku neplatí. Funkciu *generate* a *abs\_data* vieme využiť aj na vzájomné konverzie medzi našimi konkrétnymi reprezentáciami.

## B. Celulárne automaty

Mriežky teraz môžeme využiť pre ukladanie konfigurácií celulárnych automatov. Ich abstraktnú definíciu preskočíme, no zaujatý čitateľ môže konzultovať napríklad štúdiu Kutriba[9]. Naša definícia v Leane je nasledovná.

```
structure cautomaton (α : Type)
[decidable_eq α] :=
(g      : vec_grid0 α)
(empty  : α)
(neigh  : point → list point)
(bound  : (bounding_box → bounding_box)
⊕
(α → vec_grid0 α → point → α)
)
(f      : α → list α → α)
```

Štruktúra má dva závislé argumenty –  $\alpha : Type$ , ktorý reprezentuje typ bunky celulárneho automatu a  $Leanom$ –vynútenú vlastnosť týchto buniek (*decidable\_eq*  $\alpha$ ), a sice ich rozhodnuteľnú ekvivalenciu.

Pole  $g$  reprezentuje konfiguráciu automatu ako mriežku inštancie  $vec\_grid_0$ . Tu sa naša formalizácia líši od abstraktnej definície celulárnych automatov, keďže sme obmedzení na dvojrozmerné ortogonálne obdĺžnikove mriežky konečnej veľkosti. Vzhľadom na zachovanie vypočítateľnosti sme museli zaručiť konečnosť reprezentácie. Tvar mriežky je obmedzený kôli jednoduchosti implementácie – je treba ale poznamenať, že majorita zaujímavých študovaných celulárnych automatov má práve takýto tvar.

Následne máme pole *empty*, ktoré reprezentuje prázdnu časť mriežky – pochádza z množiny všetkých buniek, takže je možné mať buď explicitný prázdny stav, alebo jednoducho použiť jeden zo stavov buniek. Pole *neigh* je susedstvo, ktoré každému koordinátu priradí zoznam jeho susedov a pole *f* reprezentuje správanie samotného konkrétneho automatu. Teda je to funkcia, ktorá vypočíta nový stav zo stavu bunky a jej susedstva.

Doposiaľ bola definícia takmer úplne verná abstraktnému modelu, až na drobné obmedzenia mriežky. Teraz sa pozrieme na pole *bound* – je to časť definície, ktorá je unikátna pre našu formalizáciu. Jedná sa o vzájomne exkluzívne definície – ľavá časť reprezentuje tzv. funkciu rozšírenia. Tá popisuje, akým spôsobom sa modifikuje mriežka pri každej novej generácii celulárneho automatu, keďže ten môže expandovať. Na druhej strane, práva časť sumy reprezentuje hraničnú funkciu, ktorej

úlohou je popísať správanie automatu a susedstiev v prípade, že sme na hrane mriežky. Všimnime si, že tieto dva koncepty spolu súvisia aspoň z toho pohľadu, že ak definujeme hraničnú funkciu, nemôžeme uvažovať rozširovanie mriežky, ktoré sa automaticky správa ako funkcia identity. Naopak, ak špecifikujeme rozširovanie mriežky, okraje konfigurácií sa správajú ako konštantná funkcia, ktorá je stále v stave *empty*.

Teraz si treba uvedomiť, že pri používaní funkcie rozšírenia nám potenciálne vznikajú redundantné prázdne bunky v konfigurácii, čo negatívne ovplyvňuje ekvivalenciu konfigurácií – tú budeme implicitne považovať ako ekvivalenciu automatov a to aj napriek tomu, že to nie je verné abstraktnému modelu. Toto rozhodnutie sme urobili v záujme zachovania vypočítateľnosti, keďže za normálnych podmienok na ekvivalenciu celulárnych automatov ako takých potrebujeme zistiť rovnosť funkcií, čo vo všeobecnosti nie je rozhodnuteľný problém. Celkovo sa táto funkcia rozšírenia v matematickom modeli ani nevyskytuje – preto chceme, aby jej prítomnosť bola čo najviac transparentná. Na základe tejto úvahy teda ešte potrebujeme predstaviť kanonické formy automatov, konkrétnejšie, ich konfigurácií. Najprv funkcia, ktorá vypočíta kanonickú formu konfigurácie – to je najmenšia možná mriežka, ktorá pokryje všetky neprázdne (tie, ktoré nie sú *empty*) bunky.

```
def compute_bounds {α : Type}
  [decidable_eq α]
  (a : cautomaton α) : bounding_box :=
  let bounded := gip a.g in
  let mapped := ϕa.g in
  let zipped := zip bounded mapped in
  let filtered :=
    filter (λx, snd x ≠ a.empty) zipped
  in
  if h : empty_list filtered
  then ⟨gbl a.g, gtr a.g, ...⟩ else
  let unzipped := fst o unzip $ filtered
  in
  let xs := map point.x unzipped in
  let ys := map point.y unzipped in
  let min_x := min_element xs ... in
  let max_x := max_element xs ... in
  let min_y := min_element ys ... in
  let max_y := max_element ys ... in
  ⟨⟨min_x, min_y⟩, ⟨max_x + 1, max_y + 1⟩,
  ...⟩
```

Môžeme si všimnúť, že v tejto definícii sa nachádza veľa "...". Len zopakujeme, že všetky chýbajúce dôkazy je možné nájsť v priloženom repozitári. Teraz povýšenie tejto funkcie na celulárne automaty.

```
def make_canonical {α : Type}
  [decidable_eq α] (a : cautomaton α) :=
  {with g := ↑(subgrid a.g
    (compute_bounds a) ...)}
  }
```

kde *subgrid* reprezentuje mriežku, ktorá vznikla vykrojením z pôvodnej mriežky. Kanonická forma je následne definovaná triviálne.

```
def is_canonical {α : Type}
  [decidable_eq α] (a : cautomaton α) :=
```

```
make_canonical a = a
```

Teraz sa potrebujeme prepracovať k definícii, ktorá bude slúžiť ako simulátor celulárnych automatov – inými slovami, potrebujeme vypočítať arbitrárnu budúcu generáciu z iniciálnej konfigurácie a z definície celulárneho automatu. Postup bude nasledovný.

- 1) Vypočítať nové hranice prostredníctvom funkcie rozšírenia.
- 2) Vypočítať všetky susedstvá rozšíreného automatu. V tomto kroku treba zahrnúť aj okrajové podmienky.
- 3) Vypočítať nový stav každej bunky z jej stavu a zo stavu jej susedstva.

Najprv potrebujeme pomocnú definíciu, ktorá nám rozširovanie mriežok zmení na rozširovanie konfigurácií v automatoch.

```
def ext_aut (a : cautomaton α) :
  cautomaton α :=
  match a.bound with
  | (sum.inr _) := a
  | (sum.inl ext) :=
  let new_bb := ext (grid_bounds a.g)
  in let new_grid :=
    fgrid0.mk
      (rows_of_box new_bb)
      (cols_of_box new_bb)
      (mul_pos rows_of_box_pos
        cols_of_box_pos)
      new_bb.p1 (λx y,
  if h : ⟨⟨y, x⟩ : point⟩ ∈ a.g
  then abs_data a.g $
    grid_point_of_prod'
      ((make_bounded h.1),
      (make_bounded h.2))
  else a.empty) in
  ⟨new_grid, a.empty, a.neigh, a.bound,
  a.f⟩
  end
```

Teraz môžeme definovať funkciu, ktorá vypočíta nasledovnú generáciu celulárneho automatu.

```
def next_gen {α : Type} [decidable_eq α]
  (a : cautomaton α) : cautomaton α :=
  let new_grid := (ext_aut a).g in
  let cells := ϕnew_grid in
  let neighs :=
    map a.neigh (gip new_grid) in
  let defaulted :=
    match a.bound with
    | (sum.inr boundf) :=
      boundf a.empty new_grid
    | _ := @bound_const (vec_grid0 α) _
      a.empty new_grid
  end in
  let neigh_cells :=
    map (map defaulted) neighs in
  let new_cells :=
    zip_with a.f cells neigh_cells in
  let grid :=
    @vec_grid0.mk _
      ⟨grid_rows new_grid,
      grid_cols new_grid,
      mul_pos ... ..,

```

```

⟨new_cells, ...⟩ new_grid.o in
let next_config := (⟨grid, a.empty,
  a.neigh, a.bound, a.f⟩ : cautomaton α
) in
  make_canonical ⟨
    grid, a.empty, a.neigh, a.f, a.ext
  ⟩ in
match a.bound with
| (sum.inl _) :=
  make_canonical next_config
| _ := next_config
end

```

kde *bound\_const* je konštantná hraničná funkcia, ktorá nadobúda hodnotu *empty*. Z nej iterovaním samozrejme triviálne vyplýva funkcia, ktorá vie vypočítať ľubovoľne vzdialenú generáciu. Budeme ju nazývať *step\_n*.

Teraz sa podme pozrieť na prípadovú štúdiu konkrétneho automatu – Game of Life[10]. Najprv potrebujeme definovať množinu možných stavov bunky, napríklad ako inductive  $\text{cellT} \mid A \mid D$  – tie v tomto prípade reprezentujú živé a mŕtve bunky. Tie sa počas generácií menia na základe počtu živých buniek v susedstvách. Teraz potrebujeme definovať správanie sa automatu – treba mať na pamäti, že signatúra musí byť zhodná s tým, čo predpisuje štruktúra *cautomaton*. Teda najprv pomocná funkcia.

```

def step (cell : cellT) (alive_neighbours : ℕ)
  : cellT :=
  if cell then
    if alive_neighbours < 2 then D else
      if bor (alive_neighbours = 2)
        (alive_neighbours = 3) then A
      else D
    else
      if alive_neighbours = 3 then A
      else D

```

Následne funkcia s konformným predpisom.

```

def gol_step (cell : cellT)
  (neigh : list cellT) :=
  step cell (count_at_single neigh A)

```

kde *count\_at\_single l x* jednoducho vráti množstvo  $x$  v  $l$ . Teraz máme všetko nutné pre definíciu Life celulárneho automatu, takže môžeme vytvoriť konštruktor, ktorý z iniciálnej konfigurácie zostaví inštanciu Life.

```

def mk_gol (g : vec_grid0 cellT) : gol :=
  ⟨g, D, moore, inl ext_one, gol_step⟩

```

kde *moore* je susedstvo, ktoré uvažuje všetkých osem priamych susedov (teda aj diagonálnych, v typickej, dvojzmernej mriežke) a *ext\_one* je funkcia rozšírenia, ktorá s každou generáciou pridá v každom smere jeden riadok/stĺpec – definície týchto funkcií vyplývajú z povahy Game of Life. Typ *gol* je jednoducho *cautomaton cellT*.

Teraz uvažujme dve konfigurácie. Tri živé bunky v riadku (označme *row\_gol*) a tri živé bunky v stĺpci (označme *col\_gol*).

```

def row_gol : gol :=
  mk_gol $ fgrid0.mk 1 3 dec_trivial ⟨0, 0⟩
  (λx y, A)

```

```

def col_gol : gol :=

```

```

mk_gol $ vec_grid0.mk ⟨
  3, 1, dec_trivial,
  ⟨[A, A, A], rfl⟩
⟩ ⟨1, -1⟩

```

Z definície Life vyplýva, že tieto dve konfigurácie tvoria oscilujúcu dvojicu – inými slovami, sú si navzájom priami nasledovníci. Pred tým, než túto vlastnosť vyjadríme formálne, pozrime sa aj na schopnosti simulácie prostredníctvom Leanu – ako sme spomenuli, serializáciu máme vyriešenú, takže stačí len vyhodnotiť *step\_n* s požadovanými argumentami. Uvažujúc, že 'x' reprezentuje živú bunku, napríklad `#eval step_n row_gol 1` nám vypíše

```

X
X
X

```

čo je zhodné s *col\_gol* a `#eval step_n row_gol 2` nás vráti späť k pôvodnej konfigurácii *row\_gol*

```

X X X

```

Prirodzene, po troch krokoch sa vrátíme znovu k prvej konfigurácii. Samozrejme je viac spôsobov, ako túto závislosť formálne vyjadriť, vyberieme si arbitrárne jeden z nich.

**Veta 2.** Pre ľubovoľné  $n \in \mathbb{N}$ ,  $\text{step}_n \text{col\_gol } n = \text{row\_gol}$ .

*Dôkaz.* Platí (dôkaz v dizertačnej práci), že  $f^m x = f^{m \bmod n} x$ , za predpokladu, že  $f^n x = x$  a  $n \neq 0$ . Teda máme  $\text{step}_n \text{col\_gol } (n \bmod 2) = \text{row\_gol}$ . Pretože  $n$  je nepárne, počet krokov je 1, čím redukuje *step\_n* na *next\_gen* a dostávame sa k ekvivalentnej forme  $\text{next\_gen col\_gol} = \text{row\_gol}$ . Dôkaz je hotový! Ako to? Spomenuli sme, že pre rovnosť celulárnych automatov použijeme rovnosť ich aktuálnych konfigurácií. Inými slovami, stačí ukázať  $(\text{next\_gen col\_gol}).g = (\text{row\_gol}).g$ . Teraz si všimnime, že zatiaľčo táto rovnosť je výroková, môžeme ju zmeniť na výpočtovú a to prostredníctvom vety 1. Následne Lean "spustí" *generate* a *next\_gen* na výpočet ekvivalencie. Teda sme využili výpočtové schopnosti mechanizovaného prostredia pre uľahčenie dôkazu. Nezabudnime, že ešte máme dva predpoklady, vyplývajúce z pomocnej vety, ktorú sme použili v úvode dôkazu. Je zjavné, že  $2 \neq 0$ . Druhý predpoklad je  $\text{step}_n \text{col\_gol } 2 = \text{col\_gol}$ . Ten platí výpočtovo, keďže tento automat v tejto konfigurácii má periódu dva.  $\square$

Ak by sme sa tento dôkaz pokúsili napísať "ručne", náš prvý inštinkt by bol pozrieť sa na definíciu *step\_n* resp. *next\_gen*. Tu sme to urobiť nemuseli a to aj napriek tomu, že táto veta je na nich silne závislá. Ďalšia veľmi dôležitá vec, na ktorú by sme radi upozornili je to, že v tomto dôkaze dochádza k sklbeniu výrokového a výpočtového uvažovania a teda interaktívneho a automatizovaného dokazovania – veta je formulovaná pre každé nepárne  $n$ , to znamená, že jej dôkaz nie je možné iba vypočítať. Najprv sme museli použiť všeobecnú vetu, aby sme tento problém zredukovali do vypočítateľnej formy a potom sme využili Lean pre dokončenie dôkazu. Toto demonštruje silu a význam formalizácie teórie celulárnych automatov.

V Leane tento dôkaz vyzerá nasledovne – všimnime si, že príkaz "vypočítaj dôkaz" je jednoducho *refl*, čo znamená, že ľavá a pravá strana rovnosti sú skutočne ekvivalentné modulo  $\beta$  redukcia.

```
private lemma col_row {n} (h : n % 2 = 1) {a}
{g} (h3 : a = col_gol) :
  step_n a n = row_gol :=
begin
  unfold step_n,
  rw @periode_cycle _ _ _ 2,
  {
    rw [
      h, iterate_one, iterate_zero, h3
    ]; try { by simp [
      col_gol, row_gol, mk_gol]
    },
    refl
  },
  {rw h3, refl}
end
```

Samozrejme je možné formulovať aj iné vety tohto charakteru, napríklad správanie sa pri párných generáciach, kde sa *step\_n* mení na identitu, atď. Poďme sa pozrieť ešte na jeden spôsob špecifického využitia Leanu. Najprv uvažujme periodicitu celulárneho automatu.

```
def periodic {α : Type} [decidable_eq α]
(a : cautomaton α) :=
{n // n ≠ 0 ∧ step_n a n = a}
```

Ako sme spomínali, napríklad *col\_gol* je periodický s periódou dva.

```
lemma p_col_gol : periodic col_gol :=
(2, ⟨dec_trivial, rfl⟩)
```

Všimnime si, že pre dôkaz periodicity môžeme nad'alej využívať benefity vypočítateľnosti prostredníctvom *rfl* – jediný problém je ten, že periódu musíme zadať ručne. V Leane ale máme ešte pohodlnejšiu možnosť. Definujme si funkciu, ktorá sa pokúsi nájsť periódu automatu tak, že vyskúša postupne iterovať konfiguráciu, až kým nenájde zhodu. Ohraničme túto funkciu arbitrárnym maximom.

```
def find_period (max : ℕ) (a : gol)
: option ℕ :=
let incr_iota := reverse $ iota max in
snd <$> find ((=tt) o fst) (
zip (map ((=a.g) o cautomaton.g
o (step_n a)) incr_iota)
incr_iota
)
```

Teraz definujme meta-funkciu, ktorá bude reprezentovať heuristickú procedúru na hľadanie dôkazu periodicity.

```
meta def solve_periodic_gol_n (n : ℕ)
: tactic unit :=
do {
  `(periodic %%a) ← tactic.target,
  aut ← tactic.eval_expr (cautomaton _) a,
  let val := find_period n aut in do
  v ← val,
  tactic.existsi `(v),
  tactic.split,
```

```
tactic.exact_dec_trivial,
tactic.reflexivity
} <|> tactic.fail
"Unable to discover periodicity.
Try to increase the depth of search."
```

```
meta def periodic_aut : tactic unit :=
solve_periodic_gol_n 16
```

Teraz je možné vetu dokázať automaticky bez toho, aby sme museli periódu poznať.

```
lemma p_col_gol : periodic col_gol
:= by periodic_aut
```

### III. ZÁVER A KAM ĎALEJ

Vydali sme sa demonštrovať benefity výpočtových možností Leanu prostredníctvom formalizácie teórie, ktorá je na to extrémne výhodná, keďže svojou povahou predstavuje formálny aparát, pre ktorý je výpočet (simulácia) relevantný – a sice teória celulárnych automatov. Pre jej vznik sme potrebovali mechanizovať aj podmnožinu geometrických mriežok.

Celý vývoj bol formulovaný tak, že bol kladený veľký dôraz na zachovanie vypočítateľnosti. Benefity, ktoré nám toto rozhodnutie poskytlo sme demonštrovali na konkrétnom príklade Game of Life, kde sme Lean použili aj ako simulátor a aj ako interaktívny dokazovač, ktorý nám vie pomôcť so syntézou dôkazov prostredníctvom jeho možnosti robiť výpočet. Napokon sme použili aj meta-prostredie Leanu na automatizáciu dôkazov ohľadne periodicity automatu.

Čo sa d'alsieho výskumu týka, potrebujeme najprv pozmeniť formalizáciu tak, aby bola viac verná abstraktnému modelu celulárnych automatov – samozrejme takým spôsobom, aby si používateľ mohol vybrať, či je ochotný prísť o benefity vypočítateľnosti. Taktiež je nutné rozšíriť rozhranie o funkcionálnu, na ktorú su experti z pol'a celulárnych automatov zvyknutí. Tento krok zahŕňa aj formuláciu a dokázanie bežných vlastností, nie len pridanie definícií. Ako príklad môžeme uviesť reverzibilitu automatov – tento koncept je v našom projekte pre Lean zatiaľ neznámy. Napokon je asi zjavné, že tento projekt je postavený tak, aby bol rozšírený o veľa d'alsích definícií nových automatov, ideálne expertami v tomto poli.

### POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená projektom Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-15-0055. Tento článok bol podporený projektom KEGA no. 079TUKE4/2017. Táto práca bola podporená projektom FEI TUKE Grant no. FEI-2018-57.

### LITERATÚRA

- [1] L. M. de Moura, S. Kong, J. Avigad, F. van Doorn, J. von Raumer, *The lean theorem prover (system description)*, in: A. P. Felty, A. Middeldorp (Eds.), CADE, volume 9195 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2015, pp. 378–388
- [2] G. Gonthier, A. Mahboubi, *An introduction to small scale reflection in Coq*, in: Journal of Formalized Reasoning 3, 2010, pp. 95–152

- [3] G. Gonthier. *The Four Colour Theorem: Engineering of a Formal Proof*, in: Computer Mathematics: 8th Asian Symposium, ASCM 2007, Singapore, December 15–17, 2007. Revised and Invited Papers. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p. 333. isbn: 9783540878261. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-87827-8\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87827-8_28)
- [4] N. Magaud, *Programming with Dependent Types in Coq: a Study of Square Matrices.*, Unpublished. Nov. 2004. <https://hal.inria.fr/hal-00955444>
- [5] M. Maliković and M. Čubrilo. *Formal System for Searching for the Shortest Proof Games using Coq*, in: International Review on Computers and Software, 2010, pp. 746–756.
- [6] J-C. Filliâtre. *Finite Automata Theory in Coq - A constructive proof of Kleene's theorem*, in: (May 1997).
- [7] C. Doczkal, J-O. Kaiser, and G. Smolka. *A Constructive Theory of Regular Languages in Coq*, in: Certified Programs and Proofs. Ed. by Georges Gonthier and Michael Norrish. Cham: Springer International Publishing, 2013, pp. 82–97. isbn: 978-3-319-03545-1.
- [8] F. Silváši, M. Tomášek. *Lean Formalization of Bounded Grids and Computable Cellular Automata Defined Thereover*, To appear in – Science of Computer Programming, 2020.
- [9] M. Kutrib, R. Vollmar, T. Worsch, *Introduction to the special issue on cellular automata*, in: Parallel Computing 23 (1997) 1567 – 1576. Cellular automata.
- [10] M. Gardner, *Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire 995 game "life"*, in: Scientific American 223 (1970) 120–123.

# Metódy vyhodnocovania parametrov streamingu na báze sledovacích algoritmov v multikamerových systémoch

Roman Vápeník

Katedra počítačov a informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Technická univerzita v Košiciach  
Košice, Slovenská republika  
roman.vapenik@tuke.sk

František Jakab

Katedra počítačov a informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Technická univerzita v Košiciach  
Košice, Slovenská republika  
frantisek.jakab@tuke.sk

**Abstrakt**— Tento článok sa zaoberá problematikou výberu najlepšieho záberu na sledovanú situáciu pomocou vytvorenia multikriteriálnej metriky. Analyzuje vstupné video streamy a výsledky detekčných a sledovacích algoritmov, čím získava množinu parametrov vstupujúcich do riadenia multikamerových systémov. Vyhodnocuje detekciu neštandardných situácií a rieši využitie videokonferenčných zariadení ako systémov s viacerými kamerami. Záver práce je venovaný validácii navrhnutých konceptov prostredníctvom simulácie a v reálnych podmienkach rozsiahlej teleprezentačnej infraštruktúry.

**Abstract**— This paper is related to the research on finding the best shot of scene using multicriteria metric. It analysis the input video streams and outputs of detection and tracking algorithms, thus collecting a set of parameters that enter the control of multi-camera systems. It further evaluates the detection of non-standard situations and clarifies the use of videoconferencing devices as multi-camera systems. The conclusion of the thesis is devoted to the validation of proposed concepts through the simulation and their deployment in the real conditions of a large telepresence infrastructure.

**KLúčové slová** — Multikamerové systémy, neštandardné situácie, sledovanie objektov vo videu, streamingové technológie.

## I. ÚVOD

Cieľom tejto publikácie je popísať vytvorenú metriku na výber najlepšieho záberu v multikamerových systémoch na základe vizuálnych a zvukových vlastností vstupov a výsledných charakteristík sledovacích algoritmov. V analýze sa článok venuje problematike streamingových technológií a vlastnostiam, ktoré určujú kvalitu IP streamu. Zavádza definíciu pojmu multikamerové systémy a popisuje ich súčasť. Detekciu a sledovanie objektov vo videu sa venuje ďalšia časť práce.

V syntetickej časti je vytvorený návrh zohľadnenia parametrov IP streamov a sledovacích algoritmov na výpočte metriky pre výber najlepšieho záberu na danú scénu. Návrh sa venuje ohodnoteniu jednotlivých atribútov video a audio stopy, výstupom algoritmov na detekciu objektov vo videu a zároveň doplnkovým externým sensorom, ktorými je možné odovzdávať dodatočné informácie o objekte. Na základe týchto vlastností je

navrhnutá multikriteriálna metrika výberu najlepšieho záberu z multikamerového systému.

Ďalšia časť publikácie sa venuje opisu rôznych topológií multikamerových systémov, zavádza pojem prekryv a rieši postupnosť krokov pri možnosti overenia metriky na výber najlepšieho záberu. Vytvára koncept pre využitie videokonferenčných zariadení v roliach multikamerových systémov pre overenie navrhnutých princípov.

Návrh riadenia multikamerového systému na základe metriky sa zaoberá možnosťou spracovania kamerových vstupov s odlišnými vlastnosťami, pomocou rozsiahlej štruktúry streamingových, sledovacích a analytických nástrojov. Je vytvorený koncept riadenia pohybu kamier v multikamerových systémoch pomocou detekcie objektu externými senzormi a zároveň popísané modifikácie metriky pre semi-automatizáciu systému či ustálenie výstupných záberov.

Posledná časť sa zaoberá experimentálnymi implementáciami overujúcimi navrhnuté riešenia. Pilotné implementácie princípov sledovania základných životných funkcií a učiacich sa detekčných algoritmov sú popísané spolu s výsledkami týchto výskumov. Vyvinutá bola aj webová aplikácia simulácie detekcie objektov a riadenia pohybu kamier na základe doplnkových senzorov.

## II. ANALÝZA VSTUPNÝCH PARAMETROV

Návrhu metriky predchádza rozsiahla analýza technológií, ktoré ju budú ovplyvňovať. V prípade prezentovanej metriky sú to technológie streamingu, multikamerové a videokonferenčné systémy, detekcia a sledovanie objektov vo videu a detekcia neštandardných situácií.

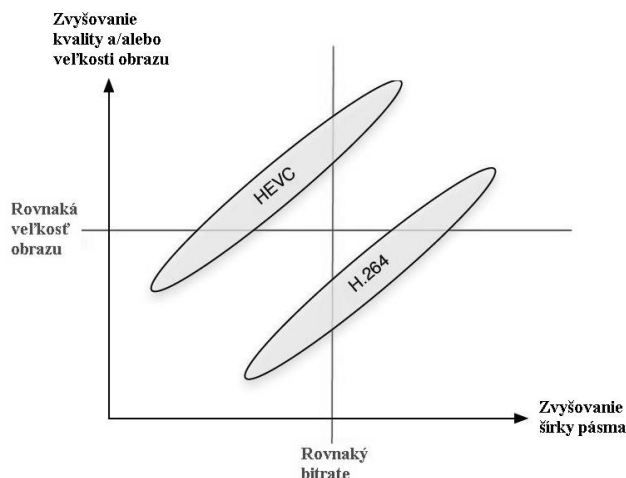
### A. Streamingové technológie

Prvou zložkou navrhovanej metriky sú charakteristiky IP streamov a preto je časť analýzy venovaná streamingovým technológiám. Video je nutné zaznamenať, spracovať, preniesť a znovu zobrazit' na strane prijímateľa. Spracovanie videa je zabezpečené pomocou video kodekov, ktoré sa od seba líšia rôznymi kompresnými pomermi či nárokmi na výpočtové zdroje. Medzi najefektívnejšie video kodeky je možné zaradiť



HEVC/H.265 [1] a VP9, najpoužívanejším je ale stále AVC/H.264, hoci jeho efektívnosť je asi len polovičná oproti jeho nástupcovi, čo je viditeľné aj na Obr. 1. Poslednou generáciou kodekov sú AV1, ktorý sa už uchytil a využívajú ho aj streamovacie služby, a H.266, ktorého finálna verzia má byť vydaná do konca tohto roku.

Spracovaný obraz je nutné preniesť sieťou od vysielateľa ku prijímateľovi. Tento proces majú na starosti streamingové protokoly, ktoré je možné rozdeliť na dva hlavné typy - sú to tzv. „first mile“ a „last mile“. Protokoly, ktoré prenášajú údaje z video enkódera na streamingový server sú „first mile“. Sú to napr. RTMP, RTSP čo SRTP a vyznačujú sa nízkym oneskorením v rádoch niekoľko sekúnd. Prenos údajov zo servera smerom ku klientom a teda do multimediálnych prehrávačov zabezpečujú protokoly typu „last mile“. Tie sú väčšinou založené na HTTP, resp. HTTPS. To znamená, že nejde o typické streamovanie, ale o pokračujúce sťahovanie segmentov videa zo servera. Zástupcami sú HLS, HDS, DASH a tak pod. Latencia týchto protokolov sa pohybuje v rádoch desiatok sekúnd, ak sa nejedná o tzv. „low-latency“ verzie, ktoré sú upravované pre maximálne zníženie oneskorenia. O zobrazenie výsledného videa sa starajú multimediálne prehrávače, ktoré spolupracujú so streamingovými servermi a riadia prenos fragmentov videa podľa vlastností siete.



Obr. 1 Porovnanie kodekov AVC/H.264 a HEVC/H.265 [2]

Medzi základné atribúty prenášaného videa patria: snímková frekvencia, pomer strán, údajový tok videa (bitrate), rozlíšenie snímky a oneskorenie, ktoré vzniká pri prenose videa. Všetky tieto vlastnosti majú vplyv na ohodnotenie kvality daného IP streamu.

### B. Multikamerové systémy

Systémy skladajúce sa z dvoch alebo viacerých kamier, ktoré medzi sebou komunikujú, zdieľajú si nasnímané údaje či zábery, prípadne riadia pohyb zariadení na základe výstupu zo spoločných údajov je možné nazývať multikamerovými systémami.

Multikamerový systém musí okrem snímacích zariadení obsahovať aj riadiacu jednotku a komunikačné kanály. Riadiaca jednotka koordinuje „spoluprácu“ medzi snímacími zariadeniami,

vyhodnocuje aktuálne situácie a príp. vyberá najlepší výstupný záber. Kamery okrem snímania scény môžu byť rozšírené o možnosť natáčania sa za objektom záujmu (resp. cyklicky sa otáčať), približovania či oddiaľovania záberu a zaostrovania scény s ohľadom na polohu sledovaného objektu. Komunikačné kanály slúžia na prenos informácií medzi jednotlivými časťami multikamerového systému.

### C. Sledovanie objektov vo videu

Proces sledovania objektov sa skladá z troch častí [3] - detekcie, klasifikácie a samotného sledovania. Medzi používané detekčné princípy sa radí rozlíšenie snímok, odčítanie pozadia optický tok či techniky založené na histograme farieb. Klasifikačné metódy sú založené na základe tvaru objektu, jeho pohybu, farby objektu a pomocou naučenej textúry.

Sledovacie algoritmy generujú trajektóriu objektu, ktorý je sledovačom zachytávaný vo videu. Algoritmy môžu byť založené na sledovaní pomocou bodu, ako napríklad Kalmanov filter, filter častíc, či Multiple Hypothesis Tracking, pomocou jadra objektu ako techniky hľadania zhodného vzoru (Template matching) či zhodného bloku videa (Block matching), alebo na základe siluety, ktoré využívajú Houghovu transformáciu či Cannyho hranový detektor. Najpoužívanejším riešením sledovania objektov vo videu je rámec Tracking-Learning-Detection, ktorý poskytuje dlhodobé sledovanie objektov a možnosťou učenia sa na základe historických informácií.

### III. NÁVRH METRIKY PRE VÝBER NAJLEPŠIEHO ZÁBERU POMOCOU VSTUPNÝCH PARAMETROV

Navrhovaná metrika sa riadi údajmi získanými z IP streamov, Výsledkom procesu detekcie a sledovania objektu vo videu a koeficientami zavedenými nad týmito údajmi.

#### A. Parametre video a audio zložky streamu

Výsledná metrika z vlastností video streamu je

$$P_V = (V_R, V_A, V_F, V_B, V_L), \text{ kde}$$

- $V_R$  je šírka a výška IP streamu,
- $V_A$  je pomer strán výsledného videa,
- $V_F$  je snímková frekvencia videa,
- $V_B$  je údajový tok potrebný na prenos,
- $V_L$  je relatívne oneskorenie video zložky oproti IP streamu, ktorý má najnižšie oneskorenie.

Zvuková zložka je popísaná vektorom vlastností

$$P_A = (A_V, A_B, A_T, A_L), \text{ kde}$$

- $A_V$  je úroveň hlasitosti daného streamu,
- $A_B$  údajový tok pre prenos zvuku,
- $A_T$  je počet zvukových stôp v streame,
- $A_L$  je oneskorenie zvuku.

#### B. Parametre sledovacích algoritmov

Napriek tomu, že detekčných či sledovacích algoritmov je veľa a používajú rozdielne techniky na proces hľadania objektov, konečnom dôsledku poskytujú podobné výstupné

údaje. Vektor parametrov sledovacích a detekčných algoritmov je teda nasledovný

$$P_T = (O_X, O_Y, O_W, O_H, O_P), \text{ kde}$$

- $O_X$  je X-ová súradnica ľavého horného rohu detekčného obdĺžnika,
- $O_Y$  je Y-ová súradnica ľavého horného rohu detekčného obdĺžnika,
- $O_W$  je šírka detekčného obdĺžnika,
- $O_H$  je výška detekčného obdĺžnika,
- $O_P$  je pravdepodobnosť, že nájdený objekt je hľadaným objektom,

pričom, detekčný obdĺžnik je priestor ohraničený sledovacím algoritmom, v ktorom bol pravdepodobne nájdený hľadaný objekt.

### C. Parametre doplnkových senzorov

Medzi doplnkové či externé senzory sú uvažované zariadenia, ktoré môžu poskytovať bližšie informácie o hľadanom objekte. Jedná sa hlavne o polohovú zložku, ktorá môže byť popísaná v mikro aj makromeradle. Pre určenie polohy v miestnosti je možné využitie radarov či lidarov, resp. iných podobných zariadení. Vo veľkom meradle sa dajú použiť GPS súradnice, pokrytie mobilných či bezdrôtových sietí. Gyroskop a akcelerometer sú zariadenia, ktoré poskytujú informáciu o natočení objektu a o jeho pohybe, resp. zrýchlení.

### D. Návrh metriky na výber najlepšieho záberu z multikamerového systému

Vektory parametrov sú upravené pomocou funkcií do podoby čiastkových metrick pre video stream a sledovací algoritmus. Čiastková metrika pre video

$$f(P_V) = R_W * R_H * 10^{-6} * V_F * 10^{-2} * V_B * 10^{-6} / V_L$$

je podielom súčinu všetkých zložiek video stopy a jeho oneskorenia. Metrika pre audio stopu

$$f(P_A) = A_V * A_B * 10^{-3} * A_T / A_L$$

je podobne podielom súčinu zložiek tejto stopy a oneskorenia na zvukovej stope. Váhy týchto metrick v konečnom hodnotení streamu sú ovplyvňované koeficientami pre jednotlivé zložky IP streamu

$$M(S_N) = k_V * f(P_V) + k_A * f(P_A)$$

čím je dosiahnutá lepšia adaptácia metriky na rôzne typy použitia. Pri N video a audio tokoch teda vznikne N metrick  $M(S_N)$  opisujúcich čiastkové hodnotenie týchto streamov.

Vektor výstupných parametrov sledovacích algoritmov je tiež pozmenený do formy dvoch samostatných funkcií. Prvá popisuje polohu objektu vo videu

$$f(O_X, O_Y) = \left\{ \begin{array}{l} R_W / \left( 1 + \left| \frac{R_W}{2} - O_X + \frac{O_W}{2} \right| \right) \\ * \left\{ \begin{array}{l} R_H / \left( 1 + \left| \frac{R_H}{2} - O_Y + \frac{O_H}{2} \right| \right) \end{array} \right\} \end{array} \right\}$$

a je ovplyvnená vzdialenosťou stredy nájdeného objektu od stredy samotnej snímky. Druhá funkcia slúži na výpočet veľkosti nájdeného objektu

$$f(O_W, O_H) = O_W * O_H / R_W * R_H$$

a vyjadruje podiel plochy detekčného štvorca opísaného okolo nájdeného objektu a celkovej plochy snímky. Obe tieto funkcie sú prenášobené koeficientami

$$M(D_N) = [k_P * f(O_X, O_Y) + k_S * f(O_W, O_H)] * O_P$$

čím je zabezpečená funkčnosť metriky pre prípade využitia pre detekciu neštandardného správania. Pri N sledovacích algoritmoch teda vznikne N metrick  $M(D_N)$ , ktoré popisujú čiastkové ohodnotenie týchto algoritmov.

Výsledná metrika teda vychádza z matice kombinácií N video a audio streamov a M sledovacích algoritmov

$$A_M = \begin{bmatrix} M(S_1) * xM(D_1) & M(S_1) * xM(D_2) & \dots \\ M(S_2) * xM(D_1) & M(S_2) * xM(D_2) & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \\ M(S_i) * xM(D_1) & M(S_i) * xM(D_2) & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \\ M(S_N) * xM(D_1) & M(S_N) * xM(D_2) & \dots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dots & M(S_1) * xM(D_j) & \dots & M(S_1) * xM(D_M) \\ \dots & M(S_2) * xM(D_j) & \dots & M(S_2) * xM(D_M) \\ & \vdots & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & M(S_{N-1}) * xM(D_M) \\ \dots & M(S_N) * xM(D_{M-1}) & \dots & M(S_N) * xM(D_M) \end{bmatrix}$$

a jej účelom je hľadanie najlepšieho prvku tejto matice. Na to slúžia funkcie

$$f(S_1) = M(S_1) * [Coef(D_1) * M(D_1) + \dots + Coef(D_M) * M(D_M)],$$

$$f(S_2) = M(S_2) * [Coef(D_1) * M(D_1) + \dots + Coef(D_M) * M(D_M)],$$

až po poslednú

$$f(S_N) = M(S_N) * [Coef(D_1) * M(D_1) + \dots + Coef(D_M) * M(D_M)],$$

ktoré popisujú relevantnosť IP streamov a kde  $Coef(D_M)$  je koeficient úspešnosti daného detektora v predchádzajúcej iterácii

$$Coef(D_N^t) = f(S_N^{t-1})$$

čím je zabezpečené učenie sa metriky o najlepších detektoroch z historického pohľadu a teda lepší výber

v budúcich iteráciách. Výsledný najlepší záber na sledovaný objekt je potom popísaný funkciou

$$ST = \max[f(S_N^t)]$$

výberu maximálnej hodnoty z funkcií vyjadrujúcich relevantnosť IP streamov.

Metrika pre detekciu neštandardných situácií je priemerom hodnôt získaných z relevantností IP streamov

$$NST = \text{Coef}(S_1) * f(S_1) + \dots + \text{Coef}(S_N) * f(S_N) / N$$

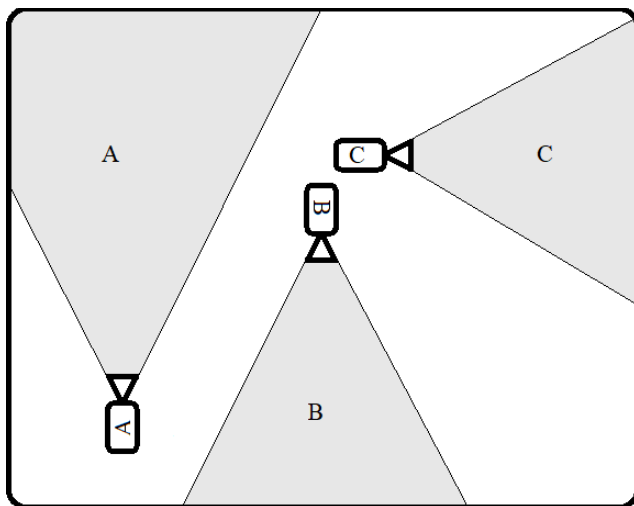
závislá tiež od koeficientu, ovplyvneného minulými iteráciami detekcie. Výstupom bude percento možnosti výskytu neštandardnej situácie v scéne na základe výsledkov jednotlivých detektorov na konkrétnych streamoch.

#### IV. NÁVRH OVERENIA SLEDOVANIA OBJEKTOV A DETEKIE NEŠTANDARDNÉHO SPRÁVANIA

##### A. Návrh sledovania objektov v multikamerovom systéme

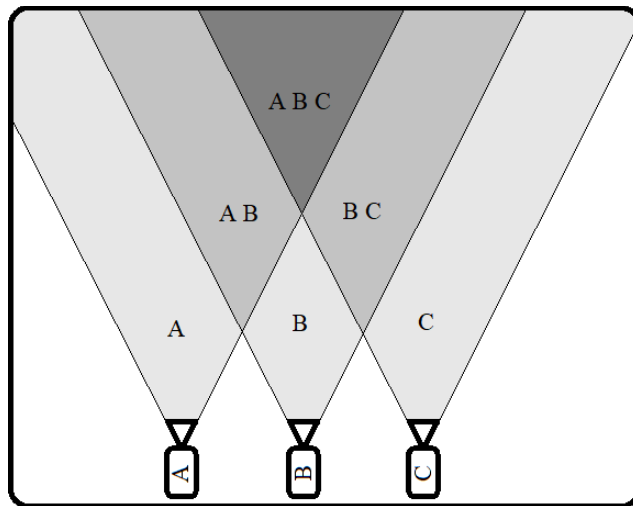
Multikamerové systémy môžu vytvárať rôzne topologické skladby svojich kamier a preto je potrebné tieto kombinácie analyzovať. V princípe ide o systémy s prekrývajúcimi sa alebo neprekrývajúcimi zábermi kamier.

Multikamerové systémy bez prekryvu majú podobné vlastnosti ako jednokamerové systémy. Objekt je možné v každom čase vidieť maximálne v jednej kamere alebo sa nachádza v mŕtvom uhle. Takéto systémy ale môžu využívať možnosť prenosu informácií medzi kamerami a tým zlepšiť detekčné úspešnosti. Na Obr. 2 je ukážka multikamerového systému bez prekryvu.



Obr. 2 Multikamerový systém bez prekryvu

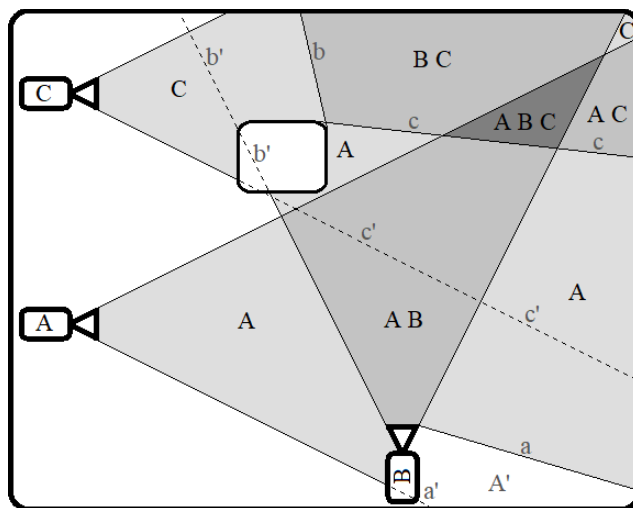
Ďalšou možnosťou je systém, v ktorom sa všetky kamery nachádzajú na jednej rovine sledujú scénu v rovnakom uhle a zábery sa im prekrývajú. Ukážka takého systému je na Obr. 3.



Obr. 3 Multikamerový systém s prekryvom a kamerami v jednej rovine

V takomto prostredí sa teda nachádzajú miesta, ktoré pokrýva len jedna z kamier (ozn. A, B alebo C), dvojica kamier (AB, BC) alebo do daného priestoru „vidia“ všetky tri kamery (ABC). Priestory pokryté dvoma alebo troma kamerami sú vhodné pre metriku výberu najlepšieho záberu.

Poslednou možnosťou je kamerový systém, v ktorom sa kamery nenachádzajú v jednej rovine a ich zábery sa prekrývajú. Takéto prostredie je zobrazené na Obr. 4.



Obr. 4 Multikamerový systém s prekryvom

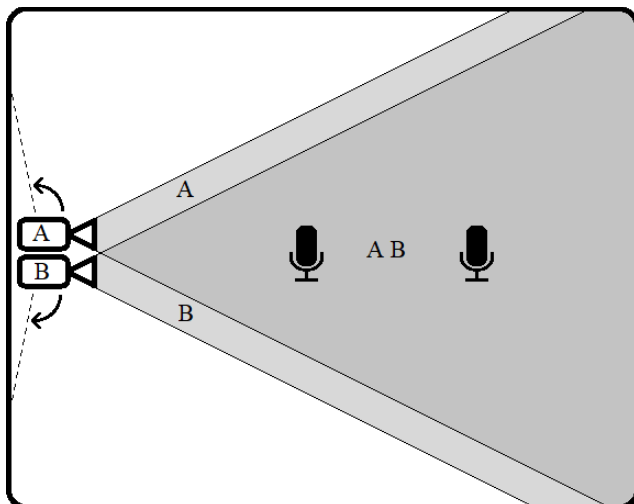
Na danej scéne sa nachádzajú aj miesta, ktoré sú zakryté prekážkou a je ňou ovplyvnený zorný uhol kamier. Napr. topologickým umiestnením kamery B je vytvorený priestor mŕtveho uhlu označeného A', ktorý by inak kamera A zoberala.

##### B. Návrh sledovania objektov pomocou videokonferenčných systémov

Videokonferenčné zariadenia so svojimi vlastnosťami podobnými multikamerovým systémom, vytvárajú vhodné prostredie pre overenie sledovacích a detekčných algoritmov.

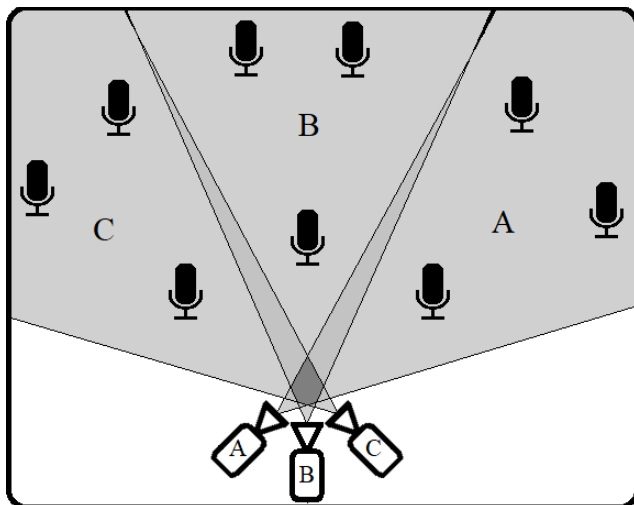
Niektoré zariadenia dokonca vytvárajú takmer „dokonalé“ scény pre snímanie viacerými kamerami.

Príkladom je zariadenie, ktoré disponuje dvomi pohyblivými kamerami uloženými tesne vedľa seba (viď Obr. 5). Toto zariadenie vytvára multikamerové prostredie s prekryvom a snímacími zariadeniami v jednej rovine. V základnej polohe totiž obe kamery zaznamenávajú prakticky ten istý obraz.



Obr. 5 Videokonferenčné zariadenie s prekryvom

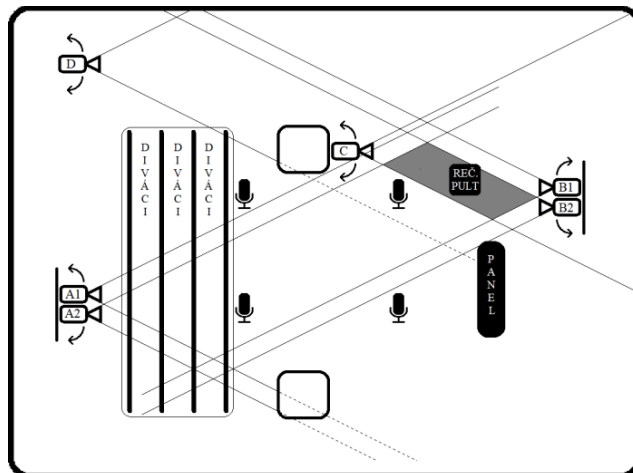
Ďalšie zariadenie s tromi snímacími kamerami (Obr. 6), ktorých zorné uhly sa takmer nepretínajú, vytvára dokonalé multikamerové prostredie bez prekryvov. Keď objekt prechádza týmto prostredím, pri opúšťaní zorného uhla jednej kamery priamo vchádza do zorného uhla ďalšej kamery.



Obr. 6 Videokonferenčné zariadenie bez prekryvu

Poslednou možnosťou sú videokonferenčné sety, ktoré obsahujú viac kamier či mikrofónov a pokrývajú celé miestnosti. Na (Obr. 7) je ilustrovaný príklad takého setu. Najpodstatnejšie časti miestnosti - rečnícky pult, panelová sekcia a divácky priestor - sú pokryté piatimi zo šiestich kamier.

Všetky tieto videokonferenčné systémy môžu poslužiť ako prostredie pre overenie sledovacích či detekčných algoritmov.



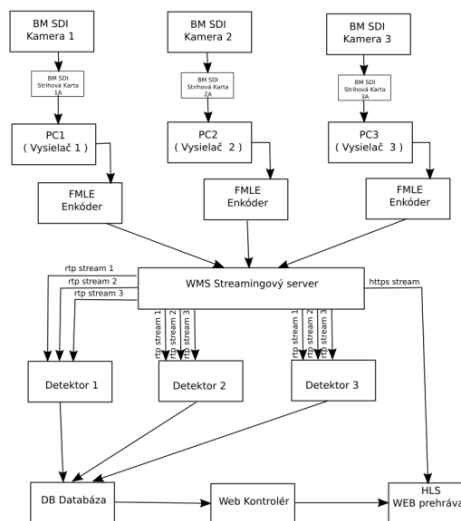
Obr. 7 Videokonferenčný set v prednáškovej miestnosti

### V. NÁVRH RIADENIA MULTIKAMEROVÉHO SYSTÉMU

Pre overenie metriky je nutné navrhnuť experimenty, pomocou ktorých je možné otestovať jej správne fungovanie.

#### A. Riadenie vstupov z rôznych typov kamier

Metriku na výber najlepšieho záberu je vhodné overiť na heterogénnych implementáciách a s rôznymi typmi vstupných snímacích zariadení. Ako jedna z možností (viď Obr. 8) sa javí využitie vstupov zo štandardných kamier s rozlíšením 4K, ktoré sú pomocou strihových kariet spracované a odoslané FMLE enkóder na streamingový server. Ten trojicu streamov rozistribuuje do detektorov a tie po výpočte podľa navrhnutej metriky odosielajú výsledky do databázy. Na základe týchto výpočtov je vo finále vybraný najlepší stream, ktorý sa zobrazí vo webovom prehrávači.

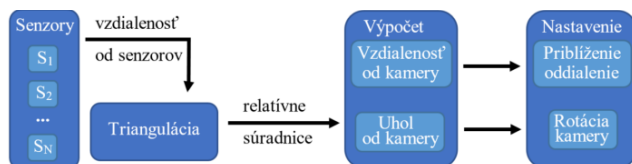


Obr. 8 Riadenie vstupov štandardných kamier

Ďalším riešením je využitie IP kamier a spracovanie ich vstupov pomocou prevodu do NDI signálu alebo využitie kamier videokonferenčných zariadení a prevodu video signálov pomocou SDI vstupných kariet. Distribúciu údajov medzi detektormi a zvyškom systému môže zabezpečovať MQTT broker.

**B. Návrh riadenia pohybu kamier**

Ďalší spôsob riadenia multikamerových systémov zahŕňa kontrolu pohybu kamier a zbieranie údajov z externých senzorov. Princíp je zobrazený na Obr. 9.



Obr. 9 Návrh riadenia pohybu kamier na základe údajov zo senzorov

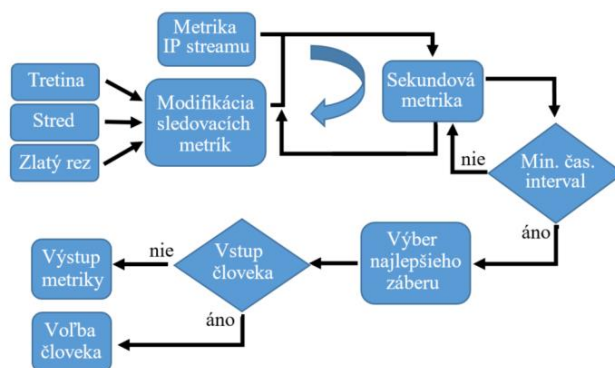
Senzory zosnímajú vzdialenosť od objektu a pomocou triangulácie je vypočítaná vzdialenosť od kamery. Na základe tohto údaje môže byť záber kamery priblížený či oddialený. Okrem toho je vypočítaný uhol, pod ktorým sa má kamera natočiť, aby daný objekt videla a táto informácia je odoslaná do pohyblivej hlavy kamery. Sensory objekt snímajú, aj keď je kamera otočená iným smerom a je teda zabezpečené sledovanie, aj keď objekt vyjde „mimo záber“ kamery.

**C. Návrh riadenia s ohľadom na rôzne situácie**

Navrhnutá metrika bola vytvorená pre automatizované riadenie prepínania najlepšieho záberu. V niektorých prípadoch je ale prítomný aj ľudský faktor, ktorý môže ovplyvniť výber najlepšieho záberu. V takom prípade sa systém stáva semi-automatickým a jeho výsledok je len odporúčaním pre človeka, ktorý riadi finálny výber.

Druhým aspektom, ktorý nebol zohľadnený v prezentovanej metrike je možnosť využitie inej ako stredovej kompozície. V technickej praxi je postačujúca, ale pri sledovaní divákom sú prijateľnejšie tretinové kompozície a zlatý rez. Modifikáciou metriky je možné dosiahnuť zmenu ideálneho umiestnenia hľadaného objektu.

V prípade, že najlepšia hodnota bude oscilovať medzi dvoma či troma výstupmi, výstup bude menení príliš rýchlo. Riešením je zavedenie minimálneho časového intervalu, počas ktorého nie je možné záber prepnúť, hoci už nebude vykazovať najlepšie hodnotenie. V takom prípade je nutné zvýšiť váhu metriky tým, že sa nebude počítať každou iteráciou, ale napr. len raz za sekundu. Vytvorí sa teda priemer z počtu iterácií rovných snímkovej frekvencii videa. Návrh kombinácie daných modifikácií je na Obr. 10.



Obr. 10 Návrh modifikácií metriky

**VI. EXPERIMENTÁLNE OVERENIE NAVRHOVANEJ METRIKY**

Relevantnosť navrhutej metriky a detekcie neštandardných situácií bola overená pilotnými implementáciami, ktoré vychádzajú z návrhov

**A. Učiace sa detekčné algoritmy**

Implementácia [5] pre overenie detekčných algoritmov pozostávala z naučenia modelu ruky a jej sledovania. Algoritmus vypočítal centroid objektu (Obr. 11) a pomocou skrytých Markovových modelov bolo posunom ruky vopred naučenými smermi rozpoznané gesto. Nové gesto bolo možné systém naučiť pomocou Welch-Baumovho modifikovaného algoritmu. Úspešnosť detekcie piatich naučených hesiel bola v priemere 85%.



Obr. 11 Detekcia ruky a nájdenie centroidu pomocou kombinácie binárnych masiek [5]

**B. Sledovanie základných životných funkcií**

V rámci tejto implementácie [5] bolo navrhnutých viacero prístupov pre sledovanie základných životných funkcií, medzi ktoré sa radia dýchanie, srdcová činnosť a vedomie človeka. Sledovanie činnosti pľúc, resp. celého dýchacieho ústrojenstva vychádzalo zo zmeny výšky ramien pri nádychu a výdychu pri pohľade spredu. Iný prístup bol koncipovaný, ako sledovanie zmeny objemu hrudného koša, čo je viditeľné pri pohľade z boku. Oba princípy by mali zaznamenávať polohu hornej hrany daných partií a tým určiť pravidelnú sinusoidu vykresľujúcu štandardné dýchanie. Pri narušení tejto krivky by bola vyhlásená neštandardná situácia.

Sledovanie vedomia bolo popísané pomocou dvoch variantov. Prvým bolo sledovanie kamerou a zisťovanie pohybu sledovanej osoby, druhou možnosťou bolo sledovanie stavu zreničiek vzhľadom na okolitú svetelnosť. Pri neštandardnej veľkosti oproti očakávanému stavu by bola vyhlásená neštandardná situácia.

Posledná životná funkcia - srdcová činnosť - bola implementovaná vo forme sledovania konkrétnych bodov na tvári (Obr. 12). Tieto body prietokom krvi menili svoje zafarbenie, ktoré bolo umelo znásobené a tým bolo možné odčítať počet úderov za minútu.

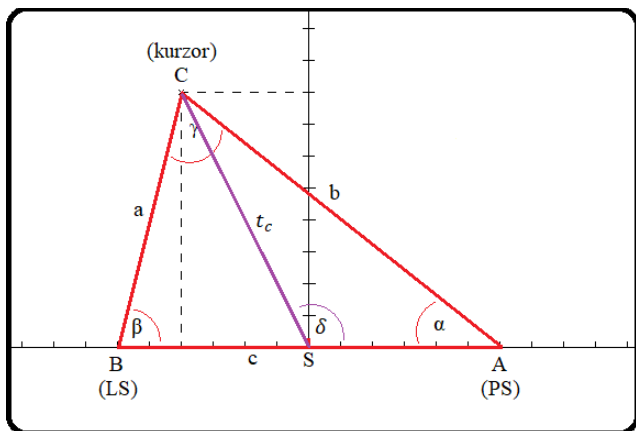


Obr. 12 Sledované body pre určenie srdcovej činnosti [5]

C. Simulácia sledovania objektov pomocou doplnkových senzorov

Implementácia riadenia pohybu kamier na základe údajov získaných z externých senzorov bola reprezentovaná vytvorením webovej aplikácie predstavujúcej simulačné prostredie. Prechádzaním kurzora cez plátno boli získavané údaje, ktoré predstavovali pohyb objektu v priestore. Tieto údaje boli prepočítavané do relatívnych súradníc s počiatkom v objektíve kamery.

Následne boli vypočítané vzdialenosti kurzora od senzorov umiestnených v jednej rovine spolu s kamerou. Tým bola nasimulovaná situácia odčítania údajov zo senzorov a zároveň bol vytvorený trojuholník (Obr. 13), pomocou ktorého boli vypočítané všetky potrebné informácie.



Obr. 13 Odčítanie hodnôt zo senzorov a vytvorenie pomocného trojuholníka

Bod A reprezentuje pravý senzor a bod B ľavý. Bod C trojuholníka je umiestnenie kurzora v priestore. Na základe vlastností trojuholníka, umiestnenia kamery v strede medzi senzormi je možné vyjadriť vzdialenosť objektu od kamery ako ťažnicu na stranu c pomocou kosínusovej vety pre uhol α

$$\cos \alpha = \frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2 * b * c}$$

a zároveň v trojuholníku ΔCSA aj

$$\cos \alpha = \frac{t_c^2 - b^2 - \frac{c^2}{4}}{-b * c}$$

a úpravou týchto rovníc dostaneme vzdialenosť objektu od kamery

$$t_c = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 - \frac{c^2}{2}}{2}}$$

Výpočet uhlu ktorým sa musí natočiť kamera, aby mala objekt vo svojom zornom uhle je založený na kosínusovej vete uhlu ∠CSA = δ, ktorá je

$$\cos \delta = \frac{b^2 - t_c^2 - \frac{c^2}{4}}{-2t_c * \frac{c}{2}}$$

a po dosadení ťažnice na stranu c získame

$$\cos \delta = \frac{b^2 - \left(\frac{a^2 + b^2 - \frac{c^2}{2}}{2}\right)^2 - \frac{c^2}{4}}{-c * \sqrt{\frac{a^2 + b^2 - \frac{c^2}{2}}{2}}}$$

Zjednodušením tejto rovnice je možné vyjadriť uhol δ len pomocou údajov zo senzorov (a, b, c) ako

$$\delta = \cos^{-1} \frac{b^2 - a^2}{-2 * c * \sqrt{\frac{a^2 + b^2 - \frac{c^2}{2}}{2}}}$$

Ďalšími vlastnosťami, ktoré je nutné dopočítať sú nové súradnice bodu C, teda kurzora. Súradnicu Y je možné odvodiť ako výšku na stranu c (Obr. 14).

Z toho vyplýva, že ju je možné vyjadriť pomocou základnej definície funkcie sínus ako

$$v_c = \sin \alpha * b$$

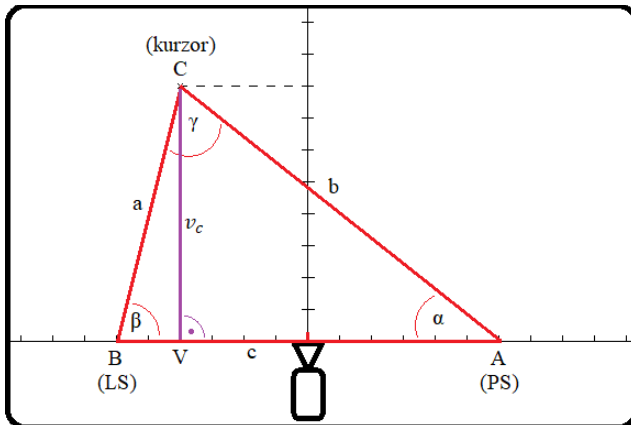
využitím základnej goniometrickej rovnice

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$$

a dosadením vyjadrenia uhlu α pomocou kosínusovej vety dostaneme

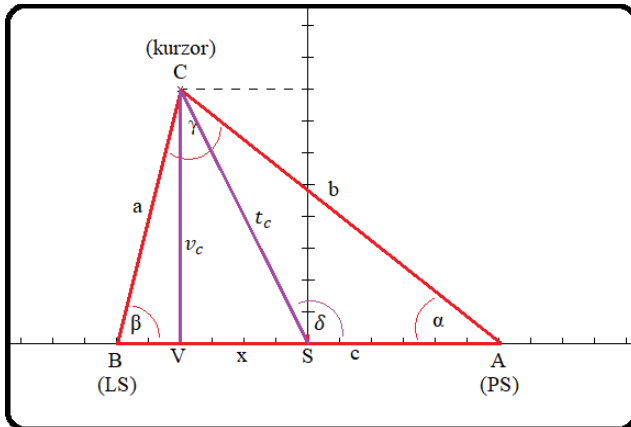
$$y = v_c = b * \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2 * b * c}\right)^2}$$

teda výpočet Y-ovej súradnice pomocou základných údajov zo senzorov.



Obr. 14 Výpočet Y-ovej súradnice bodu

Poslednú X-ovú súradnicu je možné vyjadriť z trojuholníku ΔSVC (Obr. 15).



Obr. 15 Výpočet X-ovej súradnice bodu

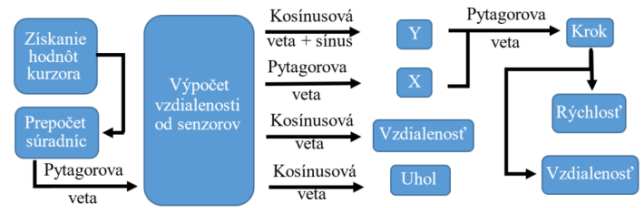
Hodnotu x teda získame pomocou Pythagorovej vety a dosadením ťažnice a výšky do rovnice

$$x = \sqrt{t_c^2 - v_c^2}$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2}\right)^2 - \left(b * \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2 * b * c}\right)^2}\right)^2}$$

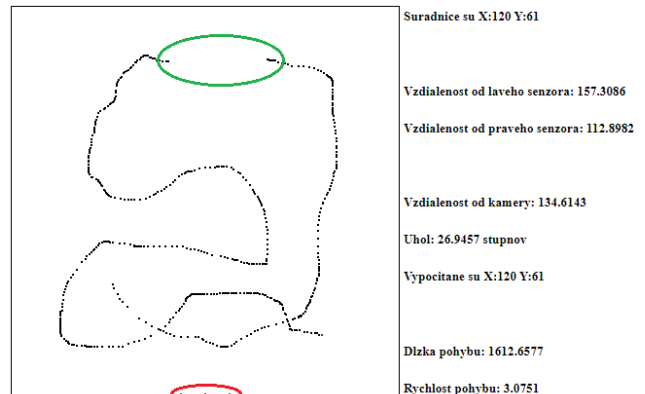
$$x = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2} - b^2 * \left(1 - \left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2 * b * c}\right)^2\right)}$$

Celý princíp výpočtu, rozšírený o výpočet dĺžky jedného kroku objektu a jeho rýchlosti a celkovej prejdenej vzdialenosti je na .



Obr. 16 Princíp výpočtu informácií pomocou údajov získaných zo senzorov

Vizualizácia výsledného výpočtu údajov vo webovej aplikácii je na Obr. 17.



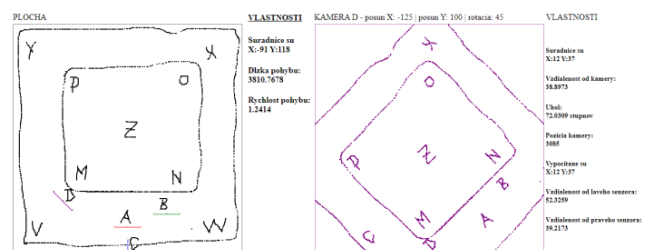
Obr. 17 Vizualizácia webového simulačného nástroja

Pre možnosť simulácie viacerých kamier je nutné vyriešiť relatívne posuny týchto kamier oproti počiatku súradnicovej osi. To je možné pomocou Euklidovských rovníc

$$X_N = (X_O + X_P) * \cos \varphi + (Y_O + Y_P) * \sin \varphi,$$

$$Y_N = (X_O + X_P) * \sin \varphi + (Y_O + Y_P) * \cos \varphi,$$

kde  $X_N$  a  $Y_N$  sú posunuté a pootočené súradnice,  $X_O$  a  $Y_O$  sú pôvodné,  $X_P$  a  $Y_P$  sú definované posuny a  $\varphi$  je uhol rotácie v smere hodinových ručičiek. Aplikáciou týchto pravidiel je možné s novými súradnicami dopočítať aj všetky ostatné údaje, ktoré sú potrebné (vzdialenosť od kamery a uhol natočenia). Ukážka posunu a rotácie je na .



Obr. 18 Ukážka posunu a rotácie kamery D

Výsledné simulačné prostredie podporuje riadenie štyroch kamier umiestnených a pootočených v priestore. Pre každú z kamier vypočítava relatívne súradnice z ohľadom na počiatok súradnicovej osi v objektíve kamery, vzdialenosť objektu a uhol od kamery.

## POĎAKOVANIE

Tvorba konceptov, vývoj a pilotná implementácia navrhovaných riešení prebiehala v úzkej spolupráci s Pracoviskom centrálného manažmentu CVTI SR v Košiciach, v rámci projektu „Národná teleprezentačná infraštruktúra pre podporu výskumu, vývoja a transferu technológií“ a pracoviskami Technickej univerzity v Košiciach - Laboratóriom počítačových sietí Katedry počítačov a informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky a Univerzitným vedeckým parkom TECHNICOM.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] JAKAB A., VÁPENÍK R.: High efficient live streaming using the latest available streaming technologies. In: Poster 2014. – Praha : ČVUT, 2014 s. 1-4. – ISBN 978-80-01-05499-4
- [2] JAKAB A., VÁPENÍK R.: Using modern streaming technologies for high quality and performance-oriented live streaming. In: SCYR 2014. – Košice : TU, 2014 s. 279-282. – ISBN 978-80-553-1714-4
- [3] VÁPENÍK R.: Non-Standard Situations in Multi-Camera Environment. In: SCYR 2017. - Košice : TU, 2017 s. 174-175. - ISBN 978-80-553-3162-1
- [4] VÁPENÍK R.: Method for training and recognition of standard and non-standard situations. In: SCYR 2018. - Košice : TU, 2018 s. 155-156. - ISBN 978-80-553-2972-7
- [5] VÁPENÍK R., ČISÁROVÁ S., JAKAB F.: Video-Based Monitoring Of Vital Signs. In: EEI 8. – Košice : TU, 2017 s. 449-454. - ISBN 978-80-553-3192-8



# 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