

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

QuoVadis Research @ FEI



ročník 4, číslo 2
September 2021

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:

prof. 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

Zvyšovanie prenosovej schopnosti vonkajších elektrických vedení výpočtom dynamickej ampacity	
<i>Anastázia Margitová, Michal Kolcun, Martin Kanálik</i>	4-17
Výskum využitia obnoviteľných zdrojov v spolupráci s batériovými systémami	
<i>Jakub Urbanský, Ľubomír Beňa</i>	17-36
Modely a metódy analýzy dát na tvorbu znalostných modelov z dátových zdrojov	
<i>Ľudmila Puzstová, František Babič, Ján Paralič</i>	36-46
Rozšírenie systémov kolaboratívnej virtuálnej reality o podporu technológií X-Reality	
<i>Marián Hudák, Branislav Sobota</i>	46-53
Výskum využitia EEG signálov na detekciu rečovej aktivity	
<i>Marianna Kocúrová, Jozef Juhár</i>	53-60
Tracing Relations Between Tests and Production Source Code	
<i>Matej Madeja, Jaroslav Porubán</i>	60-69
Klasifikácia 3D obrazov pomocou generatívnych modelov	
<i>Michal Varga, Ján Jadlovský</i>	69-79
Polovodičové technológie, návrh a finalizácia UWB ASIC obvodov	
<i>Miroslav Sokol, Pavol Galajda</i>	79-86
Efektívne algoritmy pre viacpohl'adové videokódovanie	
<i>Peter Šul'aj, Stanislav Marchevský</i>	86-97
Hybridné FSO/RF systémy	
<i>Renát Haluška, Ľuboš Ovseník</i>	97-104
Aspekty miniaturizácie elektronického obvodu pre NFC komunikáciu na báze vnorených súčiastok	
<i>Tomáš Lenger, Alena Prietriková</i>	104-112
Výpočet prevádzkovej teploty vodiča prenosového vedenia v reálnych prevádzkových podmienkach	
<i>Vladimír Gáll, Alexander Mészáros</i>	112-126

Zvyšovanie prenosovej schopnosti vonkajších elektrických vedení výpočtom dynamickej ampacity

Anastázia Margitová

Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
anastazia.margitova@tuke.sk

Michal Kolcun

Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
michal.kolcun@tuke.sk

Martin Kanálik

Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
martin.kanalik@tuke.sk

Abstrakt—Tento článok sa zaoberá zvyšovaním prenosovej schopnosti vonkajších elektrických vedení výpočtom dynamickej ampacity (dynamickeho tepelného hodnotenia), respektíve iných ukazovateľov spadajúcich do tejto problematiky, ako napríklad výpočtom teploty vodiča či výpočtom doby oteplenia vodiča na stanovenú teplotu. Princíp výpočtu dynamickej ampacity spočíva v zohľadnení tepelných rezerv vodičov pri uvažovaní aktuálnych klimatických podmienok. Teoretická časť článku prezentuje tepelný model vodiča v ustálenom aj prechodnom stave na základe technickej príručky CIGRE 601 z roku 2014. Prvú polovicu praktickej časti článku tvorí výpočet časového priebehu teploty vodiča po skokových zmenách prúdu a rýchlosti vetra, ktorá taktiež obsahuje verifikáciu vypočítanej teploty vodiča na základe údajov získaných z laboratórnych meraní. Porovnáva sa analytické a numerické riešenie, ktoré pristupujú k výpočtu teploty vodiča odlišným spôsobom. Druhá polovica praktickej časti článku sa venuje možnosti zvyšovania prenosovej schopnosti vedení na základe krátkodobého prúdového preťaženia vodičov. Táto analýza sa zaoberá vzťahom medzi dobou oteplenia vodiča na maximálnu dovolenú teplotu a prúdom tečúcim vodičom.

Kľúčové slová—zvyšovanie prenosovej schopnosti vedení; dynamická ampacita; dynamické tepelné hodnotenie; klimatické podmienky, technická príručka CIGRE 601; výpočet teploty vodiča; prevádzkové parametre; krátkodobé prúdové preťaženie; maximálna dovolená teplota vodiča

Abstract—This article deals with increasing the transmission capacity of overhead power lines by calculating the dynamic ampacity (dynamic thermal rating), or other indicators falling into this issue, such as calculating the conductor temperature of calculating the conductor heating time to a defined temperature. The principle of calculating the dynamic ampacity is to take into account the thermal reserves of the conductors when considering the actual climatic conditions. The theoretical part of this article presents the conductor thermal model in a steady state and transient state based on CIGRE Technical Brochure 601 (2014). The first half of the practical part consists of calculating the conductor temperature time course after step changes in current and wind speed, which also includes verification of the calculated conductor temperature based on data obtained from laboratory measurements. The analytical and numerical solutions, which perform the calculation of the conductor temperature in a different way, are compared. The second half of the practical part is devoted to the possibility of increasing the transmission capacity of power lines based on a short-term current overload of conductors. This analysis deals with the correlation between the heating time of the conductor to the maximum allowable temperature and the current flowing through the conductor.

Keywords—increasing the transmission capacity of overhead power lines; dynamic ampacity; dynamic thermal rating; climatic conditions, CIGRE Technical Brochure 601; conductor temperature calculation; operational parameters; short-term current overload; maximum allowable temperature

I. ÚVOD

S neustálym ekonomickým rozvojom a zvyšujúcim sa dopytom po elektrickej energii sa prenosové vedenia využívajú častokrát neefektívne. Obmedzená kapacita prenosových vedení môže spôsobiť celý rad negatívnych dôsledkov pre elektrizačnú sústavu (ES), ako aj pre konečných spotrebiteľov. K takýmto dôsledkom patrí napríklad oneskorená integrácia obnoviteľných zdrojov energie a prevádzka sústavy menej ekonomickým, alebo bezpečným spôsobom [1]. Analýza zaťažiteľnosti a využívanie potenciálu existujúcej prenosovej sústavy predstavuje v súčasnosti veľmi aktuálnu tému [2], [3]. Technická príručka CIGRE 425 [4] sa zaoberá zvyšovaním prenosovej schopnosti existujúcich prenosových vedení. Princípiálny diagram zahŕňajúci proces zvyšovania prenosovej schopnosti vonkajších elektrických vedení je znázornený na Obr. 1. Prenosová schopnosť vedenia je definovaná dodávaným zdanlivým výkonom. Zvýšenie prenosovej schopnosti vedení je teda možné dosiahnuť tromi spôsobmi [5]:

- zvýšením dodávaného napätia,
- zvýšením maximálnej dovolenej hodnoty prúdu pretekajúceho vedením,
- súčasným zvýšením napätia a maximálnej dovolenej hodnoty prúdu.

Tento článok je rozdelený na tri hlavné kapitoly:

- definovanie pojmu dynamická ampacita vonkajších elektrických vedení, teoretický rozbor a matematický opis tepelného modelu vodiča v ustálenom aj prechodnom stave (kapitola III a IV),
- praktická implementácia odvodeného tepelného modelu vodiča podložená reálnymi meraniami (kapitola V a VI),
- záver (kapitola VII).



Obr. 1. Principiálny diagram zahŕňajúci proces zvyšovania prenosovej schopnosti vonkajších elektrických vedení [1].

II. TEORETICKÝ ROZBOR AMPACITY VONKAJŠÍCH ELEKTRICKÝCH VEDENÍ

Vodiče vonkajších elektrických vedení patria k základným prvkom ES. Parametre vodičov (vedení), ako aj iných elektrických zariadení, musia spĺňať stanovené limity pre zabezpečenie spoľahlivej, bezpečnej a hospodárnej prevádzky. Jedným z hlavných faktorov, ktoré ovplyvňujú prevádzku vonkajších elektrických vedení, je teplota vodičov [1]. Teplotu vodičov ovplyvňuje viacero faktorov, ktoré je možné rozdeliť do dvoch skupín [2], [6]:

- charakteristiky vonkajšieho elektrického vedenia (prúdové zaťaženie, typ, geografické umiestnenie, priehyb, mechanické napätie vodičov, dovolené vzdialenosti vodičov od zeme),
- atmosférické podmienky, v ktorých sa vodiče nachádzajú (rýchlosť a smer vetra, teplota okolia, intenzita slnečného žiarenia, zrážky atď.).

Vodiče vonkajších elektrických vedení sú neustále tepelne namáhané, t. j. dochádza k ich tepelnému starnutiu. Ak teplota vodiča prekročí určitý limit, môže dôjsť k jeho nenávratnému poškodeniu [7]-[9]. Aby nedošlo k tepelnému poškodeniu vodiča, je nevyhnutné definovať maximálny prúd, ktorý môže pretekať daným vodičom [3]. Ampacita (ampérová kapacita) je rozhodujúcim parametrom pri návrhu a prevádzke vonkajších elektrických vedení. Ampacita vyjadruje maximálny prúd, ktorý môže tiecť vodičom (vonkajším elektrickým vedením) bez narušenia jeho mechanických a elektrických vlastností [10]. Iná definícia označuje ampacitu ako prúd, ktorý spĺňa konštrukčné a bezpečnostné kritériá konkrétneho vedenia, na ktorom je vodič nainštalovaný [11]. Ampacita vodiča závisí od elektrických, mechanických a tepelných vlastností vodiča, taktiež od klimatických podmienok [12]. V súvislosti so stanovením ampacity vodičov je možné hovoriť o takzvanom tepelnom hodnotení vonkajších elektrických vedení.

Tepelné hodnotenie vonkajších elektrických vedení prostredníctvom stanovenia ampacity (maximálneho dovoleného prúdu) je možné klasifikovať do dvoch základných kategórií [2], [6]:

- *statická ampacita (statické tepelné hodnotenie, STH),*
- *dynamická ampacita (dynamické tepelné hodnotenie, DTH).*

Mnoho elektrických sietí, resp. ES je prevádzkovaných na základe *statického tepelného hodnotenia* vonkajších elektrických vedení. V [13]-[18] sú uvedené niektoré štúdie zaoberajúce sa aplikáciou, výpočtom a posúdením STH. Metódy STH sa používajú hlavne z dôvodu ich jednoduchosti, zabezpečujú vysokú bezpečnosť prevádzky prenosových vedení, ale vedú k tepelnému obmedzeniu vodičov. STH je možné rozdeliť na dve kategórie [15]:

- pravdepodobnostné,
- deterministické (delí sa na nominálne a konzervatívne).

Pravdepodobnostné STH je založené na štatistickej analýze historických poveternostných podmienok pozdĺž prenosového vedenia. Pravdepodobnostné metódy možno použiť na výpočet sezónnych STH, ktorých klasifikáciu uvádza TABUĽKA I [15].

TABUĽKA I. KLASIFIKÁCIA SEZÓNNYCH STH [15]

Typ STH	Počet sezón	Komentár
Základné	1	Konštantná hodnota počas celého roka
Polročné	2	Rok je rozdelený na: <ul style="list-style-type: none"> • Letnú sezónu (máj – október) • Zimnú sezónu (november – apríl)
Štvrťročné	4	Rok je rozdelený na: <ul style="list-style-type: none"> • Letnú sezónu (jún – august) • Jesennú sezónu (september – november) • Zimnú sezónu (december – február) • Jarnú sezónu (marec – máj)
Mesačné	12	Rok je rozdelený na mesiace
Štvrťročné deň/noc	8	Rok je rozdelený ako v prípade štvrťročného STH, navyše každý deň je rozdelený na: <ul style="list-style-type: none"> • Denný čas (6:00 – 18:00) • Nočný čas (18:00 – 6:00)
Mesačné deň/noc	24	Rok je rozdelený ako v prípade mesačného STH, navyše každý deň je rozdelený na: <ul style="list-style-type: none"> • Denný čas (6:00 – 18:00) • Nočný čas (18:00 – 6:00)

Deterministické STH konkrétneho vonkajšieho elektrického vedenia sa vo všeobecnosti určuje na základe konzervatívnych meteorologických predpokladov pre danú oblasť. Nominálne STH závisí iba od typu vodiča a je definované výrobcom. V prípade konzervatívneho STH sa zvyčajne uvažuje s najhoršími klimatickými podmienkami, počasie má minimálny chladiaci účinok, ktorému zodpovedá [2], [15]:

- nízka rýchlosť vetra,
- vysoká intenzita slnečného žiarenia,
- vysoká teplota okolia.

Dynamické tepelné hodnotenie vonkajších elektrických vedení poskytuje skutočnú ampacitu vodičov založenú na prevádzkových parametroch (klimatické podmienky a prúd pretekajúci vodičom) v reálnom čase. Hlavným cieľom DTH vodičov je zvýšiť prenosovú schopnosť existujúcich prenosových vedení, znížiť preťaženie prenosových vedení, uľahčiť integráciu obnoviteľných zdrojov energie do ES, zvýšiť ekonomické prínosy, zvýšiť spoľahlivosť prevádzky ES, vyhnúť sa výpadkom v ES (vrátane typu blackout [19]) a podobne [6].

V súvislosti s dynamickou ampacitou vodičov vonkajších elektrických vedení je potrebné definovať dva pojmy:

- *ustálená dynamická ampacita (ustálené DTH)*,
- *prechodná dynamická ampacita (prechodné DTH)*.

Ustálená dynamická ampacita predstavuje veľkosť prúdu, pri ktorom sa teplota vodiča ustáli na určitej hodnote. Pri tomto type výpočtu sa uvažuje, že všetky prevádzkové parametre sú konštantné, t. j. vodič je v tepelnej rovnováhe. Tento výpočet teda súvisí s ustálenou teplotou vodiča pred začiatkom, resp. po ukončení prechodného deja vyvolaného zmenou jedného prevádzkového parametra, respektíve zmenou viacerých prevádzkových parametrov súčasne. Častokrát sa riešenie ustáleného stavu zameriava na opačnú úlohu, t. j. na určenie ustálenej teploty vodiča pri známom prúde pretekajúcom vodičom a taktiež konštantných klimatických podmienkach.

Ak vodič vykazuje určitú tepelnú kapacitu, je možné ju využiť ku krátkodobému prúdovému preťaženiu vodiča tak, aby nebola presiahnutá jeho maximálna dovolená teplota. Toto krátkodobé prúdové preťaženie sa nazýva *prechodná dynamická ampacita* a je vzťahovaná na obmedzenú dobu preťaženia. Táto metóda výpočtu sa zameriava na zmenu teploty vodiča v závislosti od času, berie do úvahy zmeny jednotlivých prevádzkových parametrov v čase (klimatických podmienok aj prúdu pretekajúceho vodičom).

V anglickej literatúre sa pojem ampacita spája iba s hodnotou maximálneho dovoleného prúdu v ustálenom stave. V tomto článku však ampacita označuje prúd tečúci vodičom počas ustáleného stavu, ale aj počas prechodného stavu, pričom sa zohľadňujú aktuálne klimatické podmienky a ich zmena. V anglickej literatúre sa namiesto pojmov statická ampacita, dynamická ampacita používajú pojmy STH a DTH.

Niekoľko noriem, respektíve technických príručiek sa zaoberá výpočtom ampacity vodičov vonkajších elektrických vedení. Štandardné metódy výpočtu ampacity vonkajších elektrických vedení sú opísané:

- v technickej správe IEC [20] (Vodiče vonkajších elektrických vedení – metódy výpočtu pre krútené holé vodiče z roku 1995),
- v norme IEEE [21] (Norma na výpočet prúdovo-tepelného vzťahu holých vodičov vonkajších elektrických vedení z roku 2012),
- v technickej príručke CIGRE 207 [22] (Tepelné správanie sa vodičov vonkajších elektrických vedení z roku 2002)
- a v jej rozšírenej verzii CIGRE 601 [23] (Príručka na výpočet tepelného hodnotenia vonkajších elektrických vedení z roku 2014).

Ako je uvedené v [24], metódy prezentované v norme IEEE a technických príručkách CIGRE poskytujú veľmi podobné výsledky, a je možné ich považovať za ekvivalentné (porovnáva sa verzia normy IEEE z roku 1993 s verziou technickej príručky CIGRE z roku 1992). Podľa [25] sa výsledky určené na základe dokumentov IEEE a CIGRE zvyčajne navzájom líšia o 5 až 15 %. Ďalšie štúdie, ktoré pojednávajú o porovnaní noriem, resp. technických príručiek na výpočet ampacity vonkajších elektrických vedení IEEE a CIGRE sú uvedené v [2], [11], [25], [26]-[28]. Obidva dokumenty (IEEE aj CIGRE) vychádzajú z tepelnej rovnováhy medzi oteplením a ochladením vodiča v závislosti od prúdového zaťaženia a okolitých podmienok. Základné podobnosti a rozdiely medzi metodikami (IEEE a CIGRE) prezentovanými v daných dokumentoch sú [27] (detailnejšie teoretické porovnanie je uvedené v [2], [26]):

- Obidve metodiky berú do úvahy klimatické podmienky, t. j. rýchlosť a smer vetra, intenzitu slnečného žiarenia, teplotu okolia, ale na výpočet tepelnej rovnováhy vodiča používajú odlišné prístupy.
- Oteplenie vodiča vplyvom slnečného žiarenia je vypočítané na základe pozície slnka v závislosti od konkrétnej hodiny a dňa v roku. Technická príručka CIGRE ponúka možnosť výpočtu podľa zložitejšieho algoritmu zahrňajúceho priame, difúzne a odrazené žiarenie.
- Ochladenie vodiča konvekciou (prúdením) je v prípade brožúry CIGRE určované pomocou Morganových korelácií založených na Nusseltovom čísle, zatiaľ čo norma IEEE používa McAdamsove korelácie vychádzajúce z Reynoldssovoho čísla.

Technická príručka CIGRE 601 [23] je aktualizovanou a rozšírenou verziou technickej brožúry CIGRE 207 [22]. Cieľom technickej príručky CIGRE 601 je vypočítať tepelné hodnotenie vonkajších elektrických vedení v ustálenom aj prechodnom stave, vrátane vedení prevádzkovaných pri vysokých prúdových hustotách a teplotách. CIGRE 601 prezentuje modelovanie zmien vo všetkých základných klimatických podmienkach, t. j. v intenzite slnečného žiarenia, rýchlosti a smere vetra, teplote okolia. CIGRE 601 opisuje analytický a numerický výpočet časového priebehu teploty vodiča.

Algoritmy na výpočet rôznych veličín, ako napríklad teploty vodiča alebo prúdu tečúceho vodičom, ktoré sú prezentované v CIGRE 601, musia spĺňať jednu dôležitú podmienku. Pri každom výpočte sa musí uvažovať, že teplota vodiča je minimálne rovná teplote okolia, ale nie menšia ako teplota okolia.

III. MATEMATICKÝ MODEL NA VÝPOČET TEPLoty
VODIČA/PRÚDU PRETEKAJÚCEHO VODIČOM V USTÁLENOM
STAVE PODĽA TECHNICKEJ PRÍRUČKY CIGRE 601

Podľa technickej príručky CIGRE 601 je tepelnú rovnováhu vodiča v ustálenom stave s uvažovaním reálnych prevádzkových parametrov možné vyjadriť výkonovou bilančnou rovnicou (1). V tomto prípade nie je vo vodiči akumulované žiadne teplo. V prípade ustáleného stavu vodiča sa uvažuje, že všetky prevádzkové parametre sú konštantné a teplota vodiča je ustálená, t. j. nemení sa závislosti od času. Ľavá časť bilančnej rovnice obsahuje tepelné výkony spôsobujúce oteplenie vodiča (tepelný prírastok) a jej pravá časť charakterizuje tepelné výkony reprezentujúce ochladenie vodiča (tepelné straty), ako je možné vidieť aj na Obr. 2 [23], [2]:

$$P_J + P_s = P_c + P_r, \tag{1}$$

$$P_J = I_{AC}^2 \cdot k_s \cdot R_{DC20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_s - 20)], \tag{2}$$

$$P_s = \alpha_s \cdot S \cdot D, \tag{3}$$

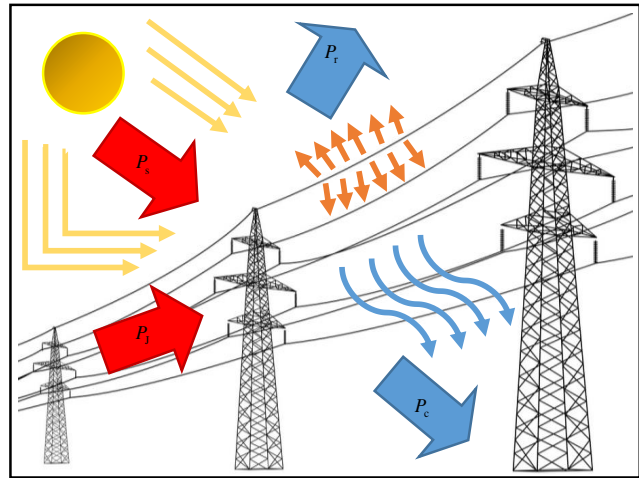
$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu, \tag{4}$$

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma_B \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4]. \tag{5}$$

kde

- P_J je oteplenie vodiča vplyvom toku prúdu, t. j. vplyvom Jouleových strát (Jouleovo oteplenie, W/m),
- P_s je oteplenie vodiča vplyvom slnečného žiarenia (solárne oteplenie, W/m),
- P_c je ochladenie vodiča vplyvom prúdenia (ochladenie konvekciou, W/m),
- P_r je ochladenie vodiča vplyvom vyžarovania (ochladenie radiáciou, W/m),
- I_{AC} je efektívna hodnota striedavého prúdu tečúceho vodičom (A),
- k_s je koeficient skinefektu (-),
- R_{DC20} je jednosmerný odpor vodiča na jednotku dĺžky pri teplote 20 °C (Ω/m),
- α je teplotný súčiniteľ odporu vodiča (1/K),
- T_s je teplota vodiča (°C),
- α_s je koeficient absorptivity povrchu vodiča (-),
- S je globálna intenzita slnečného žiarenia (W/m²),
- D je vonkajší priemer vodiča (m),
- λ_f je tepelná vodivosť vzduchu (W/(m·K)),
- T_a je teplota okolia (°C),
- Nu je Nusseltovo číslo (-),
- ε_s je koeficient emisivity povrchu vodiča (-),
- σ_B je Stefan-Boltzmannova konštanta (W/(m²·K⁴)).

Na stanovenie Nusseltovho čísla je potrebné poznať niekoľko konštánt a vypočítať niekoľko veličín, ktoré sú uvedené v [12]. Nusseltovo číslo je možné vypočítať z rovníc (18) a (19) pre nútenú konvekciu, alebo z rovnice (20) pre prirodzenú konvekciu, ktoré sú tiež uvedené v [12].



Obr. 2. Princiálne vyjadrenie vplyvu prevádzkových parametrov na tepelnú bilanciu vodičov vonkajších elektrických vedení.

Ako bolo spomenuté vyššie, ustálený tepelný stav vodiča je charakterizovaný konštantnými (časovo nezávislými) klimatickými podmienkami, prúdovým zaťažením a teplotou vodiča. V prípade tepelnej rovnováhy vodiča vyjadrenej rovnicou (1) a rovnicou (2) pre oteplenie vodiča Jouleovými stratami je možné riešiť dva typy úloh [29]:

- výpočet neznámeho prúdu pretekajúceho vodičom (prípadne ampacity, resp. maximálneho dovoleného prúdu) pri známej hodnote ustálenej teploty vodiča,
- výpočet neznámej ustálenej teploty vodiča pri známej hodnote prúdu pretekajúceho vodičom.

Neznámy prúd pretekajúci vodičom pri známej hodnote teploty vodiča a známych klimatických podmienkach je možné vyjadriť z rovnice (6) [12], [23], [29]:

$$I_{AC} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{AC}}}, \tag{6}$$

pričom v prípade výpočtu maximálneho prúdu tečúceho vodičom I_{ACmax} sa dosadzuje hodnota maximálnej dovolenej teploty vodiča T_{smax} .

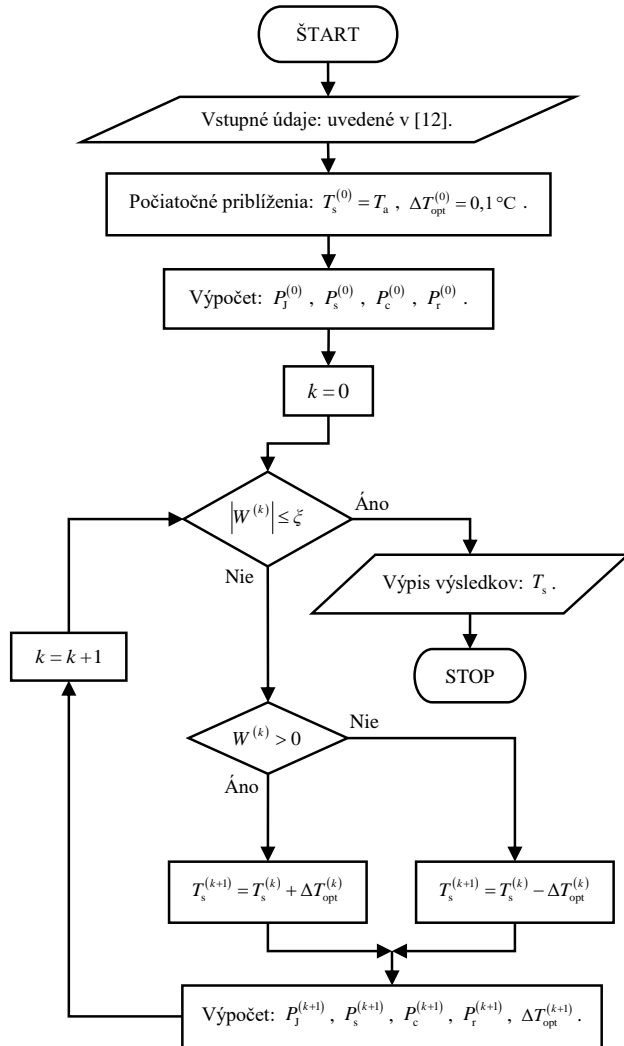
Výpočet ustálenej teploty vodiča pri známej hodnote prúdu je potrebné riešiť numerickým (iteračným) spôsobom. Vývojový diagram znázorňujúci algoritmus výpočtu teploty vodiča pri známom prúde pretekajúcom vodičom je znázornený na Obr. 3. Na začiatku výpočtu je potrebné zvoliť počiatočné priblíženie teploty vodiča, od ktorého výrazne závisí správnosť výpočtu. Za počiatočnú teplotu vodiča je nutné zvoliť hodnotu rovnú alebo vyššiu ako je teplota okolia. Voľba počiatočného priblíženia teploty vodiča sa odvíja od konkrétnych uvažovaných prevádzkových parametrov. V každej iterácii sa preveruje, či je splnená tepelná bilancia tepelných výkonov (7), keďže ide o ustálený stav:

$$|W^{(k)}| = |P_J^{(k)} + P_s^{(k)} - P_c^{(k)} - P_r^{(k)}| \leq \xi, \tag{7}$$

kde

ζ je zadaná presnosť výpočtu (W/m),

k je počet iterácií (-).



Obr. 3. Vývojový diagram znázorňujúci algoritmus výpočtu ustálenej teploty vodiča pri známom prúde pretekajúcom vodičom.

Ak nie je splnená tepelná výkonová bilancia (7), je potrebné upraviť teplotu vodiča a opakovať výpočet v ďalšej iterácii:

- Ak $W^{(k)} > 0$, je potrebné zvýšiť teplotu vodiča o optimálny krok ΔT_{opt} (°C)

$$T_s^{(k+1)} = T_s^{(k)} + \Delta T_{opt}^{(k)} \quad (8)$$

- Ak $W^{(k)} < 0$, je potrebné znížiť teplotu vodiča o optimálny krok ΔT_{opt} (°C)

$$T_s^{(k+1)} = T_s^{(k)} - \Delta T_{opt}^{(k)} \quad (9)$$

Výpočet optimálneho kroku umožňuje zrýchliť chod numerickej metódy a tým zvýšiť presnosť výpočtu. Počiatočné priblíženie (nultá iterácia) optimálneho kroku sa volí ľubovoľne, napríklad $0,1^\circ\text{C}$ (Obr. 3). V ďalších iteráciách ($k > 0$) je možné určiť optimálny krok podľa rovnice (10):

$$\Delta T_{opt}^{(k+1)} = \frac{W^{(k+1)}}{W^{(k)} - W^{(k+1)}} \cdot \Delta T_{opt}^{(k)} \quad (10)$$

IV. MATEMATICKÝ MODEL NA VÝPOČET TEPLoty VODIČA V PRECHODNOM STAVE PODĽA TECHNICKEJ PRÍRUČKY CIGRE 601

Vo všeobecnosti platí, že klimatické podmienky a prúdové zaťaženie vodičov vonkajších elektrických vedení sa menia v závislosti od času. V tomto prípade vodič nie je vždy v tepelnej rovnováhe, t. j. vo vodiči je nahromadené určité množstvo tepla. Teplota vodiča nie je ustálená, nakoľko prebieha prechodný dej. Všeobecnú rovnicu tepla v prípade prechodného tepelného stavu vodiča je možné vyjadriť rovnicou (11) [23]:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_s}{dt} = P_j + P_s - P_c - P_r, \quad (11)$$

kde

m je hmotnosť vodiča na jednotku dĺžky (kg/m),

c je merná tepelná kapacita vodiča pri teplote T_s (J/(kg·K)),

dT_s/dt je zmena teploty vodiča v závislosti od času (°C/s).

Merná tepelná kapacita vodiča je závislá od teploty, ale menej výrazne, ako striedavý odpor. Merná tepelná kapacita a hmotnosť vodiča taktiež závisí od materiálov, ktoré sú použité na zhotovenie jadra a obalu vodiča. V prípade lán zložených z oceľového jadra a hliníkového obalu (AlFe láná) sa súčin hmotnosti na jednotku dĺžky a mernej tepelnej kapacity určí aplikáciou rovnice (12) [23], [29]

$$m \cdot c = m_{Al} \cdot c_{Al} + m_{Fe} \cdot c_{Fe},$$

$$c_{Al} = c_{Al20} \cdot [1 + \beta_{Al} \cdot (T_s - 20)],$$

$$c_{Fe} = c_{Fe20} \cdot [1 + \beta_{Fe} \cdot (T_s - 20)], \quad (12)$$

kde

m_{Al} je hmotnosť hliníka vodiča na jednotku dĺžky (kg/m),

m_{Fe} je hmotnosť ocele vodiča na jednotku dĺžky (kg/m),

c_{Al} je merná tepelná kapacita hliníka vodiča pri teplote T_s (J/(kg·K)),

c_{Fe} je merná tepelná kapacita ocele vodiča pri teplote T_s (J/(kg·K)),

c_{Al20} je merná tepelná kapacita hliníka vodiča pri teplote 20°C (J/(kg·K)),

c_{Fe20} je merná tepelná kapacita ocele vodiča pri teplote 20°C (J/(kg·K)),

β_{Al} je teplotný súčiniteľ mernej tepelnej kapacity hliníka vodiča (1/K),

β_{Fe} je teplotný súčiniteľ mernej tepelnej kapacity ocele vodiča (1/K).

A. Výpočet časového priebehu teploty vodiča analytickým riešením

V prípade analytického riešenia závisí zmena teploty vodiča v čase od zmeny tepelných výkonov uvedených v rovnici (11), t. j. oteplenia vodiča vplyvom pretekajúceho prúdu a slnečného žiarenia, ochladenia vodiča vplyvom konvekcie a radiácie. Tieto tepelné výkony sú závislé na okolitých klimatických podmienkach (slnečné žiarenie, teplota okolia, rýchlosť a vetra smer vetra), ako aj na prúde pretekajúcom cez vodič.

Zmena ochladenia alebo oteplenia vodiča sa určí ako rozdiel dvoch tepelných výkonov, a to tepelného výkonu po skokovej zmene a pred skokovou zmenou daného prevádzkového parametra. Do jedného výpočtu vstupujú prevádzkové parametre po skokovej zmene a v druhom výpočte sa berú do úvahy prevádzkové parametre pred skokovou zmenou. Vo výpočtoch oboch tepelných výkonov sa uvažuje s rovnakou hodnotou teploty, t. j. teplotou vodiča v čase skokovej zmeny prevádzkových parametrov. Všeobecnú zmenu tepelného výkonu po skokovej zmene jedného z prevádzkových parametrov matematicky vyjadruje rovnica (13) [23], [29]:

$$\Delta P = P_{po} - P_{pred}, \quad (13)$$

kde

ΔP je zmena oteplenia/ochladenia vodiča (tepelného výkonu) po skokovej zmene jedného prevádzkového parametra (W/m),

P_{po} je oteplenie/ochladenie vodiča (tepelný výkon) po skokovej zmene jedného prevádzkového parametra (W/m),

P_{pred} je oteplenie/ochladenie vodiča (tepelný výkon) pred skokovou zmenou jedného prevádzkového parametra (W/m).

Najjednoduchší spôsob, ako modelovať zmeny všetkých prevádzkových parametrov, je skoková zmena. Skokovú zmenu prúdu tečúceho vodičom je možné realizovať aj prakticky. Zmeny klimatických podmienok je možné zjednodušené modelovať ako lineárne alebo skokové zmeny, aj napriek ich náhlemu, často nepredvídateľnému a neovplyvniteľnému charakteru. V tomto článku sú prezentované vzťahy a výpočty iba pre skokovú zmenu prevádzkových parametrov.

Zmena teploty vodiča po skokovej zmene prevádzkových parametrov (jednotlivo alebo súčasne) neprebíha skokovo, ale trvá určitý čas. Analytické riešenie matematicky reprezentuje túto zmenu rastúcou (v prípade oteplenia vodiča) alebo klesajúcou (v prípade ochladenia vodiča) exponenciálnou funkciou [23].

Rovnice pre analytický výpočet časového priebehu teploty vodiča sú odvodené na základe predpokladu, že vodič je v čase zmeny prevádzkových parametrov v tepelnej rovnováhe. Do výpočtu teploty vodiča teda vstupuje počiatočná ustálená teplota vodiča v čase zmeny prevádzkových parametrov a taktiež tzv. asymptotická teplota vodiča po skokovej zmene prevádzkových parametrov. Tieto teploty je možné určiť z riešenia ustáleného tepelného stavu vodiča podľa kapitoly III. Asymptotická teplota predstavuje maximálnu možnú teplotu, ku ktorej sa môže teplota vodiča po ustálení priblížiť, resp. dosiahne túto teplotu v nekonečnom čase. Podľa analytického

modelu sa vodič nikdy neohreje, resp. neochladí na túto teplotu, pretože ide o asymptotu exponenciálnej funkcie. Všeobecný priebeh teploty vodiča v závislosti od času po skokovej zmene jedného prevádzkového parametra alebo viacerých prevádzkových parametrov súčasne je možné vyjadriť rovnicou (14) [23], [29]:

$$T_s \cong T_{sm} - (T_{sm} - T_{s1}) \cdot e^{-t/\tau}, \quad (14)$$

kde

T_{s1} je ustálená teplota vodiča v čase $t = 0$ (°C),

T_s je teplota vodiča v čase t (°C),

T_{sm} je asymptotická teplota vodiča v čase $t = \infty$ (°C),

τ je globálna časová konštanta (s),

t je čas (s).

O čase ustálenia teploty vodiča pojednáva tzv. globálna časová konštanta. Globálna časová konštanta vyjadruje časový interval, počas ktorého sa zmení teplota vodiča z počiatočnej (ustálenej) teploty na cca 63,2 % z asymptotickej teploty. V globálnej časovej konštante sú zahrnuté vplyvy zmien všetkých prevádzkových parametrov, t. j. klimatických podmienok, ale aj prúdu tečúceho vodičom a je ju možné určiť z rovnice (15):

$$\tau \cong \frac{m \cdot c \cdot (T_{sm} - T_{s1})}{\Delta P_j + \Delta P_s - \Delta P_c - \Delta P_r}, \quad (15)$$

kde

ΔP_j je zmena oteplenia vodiča vplyvom pretekajúceho prúdu po skokovej zmene prúdu (W/m),

ΔP_s je zmena oteplenia vodiča vplyvom slnečného žiarenia po skokovej zmene intenzity slnečného žiarenia (W/m),

ΔP_c je zmena ochladenia vodiča vplyvom prúdenia po skokovej zmene rýchlosti a smeru vetra, alebo teploty okolia (W/m),

ΔP_r je zmena ochladenia vodiča vplyvom vyžarovania po skokovej zmene teploty okolia (W/m).

Rovnicu (14) je možné upraviť na rovnicu (16), ktorá definuje dobu, počas ktorej sa vodič oteplí, resp. ochladí na požadovanú teplotu [29]:

$$t \cong -\tau \cdot \ln \left(\frac{T_{sm} - T_s}{T_{sm} - T_{s1}} \right). \quad (16)$$

Rovnica (16) sa väčšinou používa v súvislosti s výpočtom doby krátkodobého prúdového preťaženia vodiča t_{max} tak, aby nebola presiahnutá jeho maximálna dovolená teplota. Inými slovami, počíta sa časové rozpätie, počas ktorého sa vodič pri danej hodnote prúdu oteplí na maximálnu dovolenú teplotu T_{smax} .

B. Výpočet časového priebehu teploty vodiča numerickým riešením

Numerický výpočet teploty vodiča (v anglickej literatúre označovaný ako temperature tracking, t. j. sledovanie alebo trasovanie teploty) v závislosti od času pristupuje k riešeniu odlišným spôsobom ako analytická metóda, ktorá je opísaná v podkapitole A. Skúmané časové obdobie sa delí na niekoľko menších časových úsekov (intervalov, krokov), pričom na každom úseku sa počíta teplota vodiča. Uvažuje sa, že na každom časovom intervale je teplota vodiča aj všetky prevádzkové parametre konštantné. Aby sa dosiahla dostatočná presnosť numerickej metódy, je potrebné mať k dispozícii dostatočne malé časové intervaly. Časové úseky (intervaly, kroky) by sa mali voliť podstatne menšie ako je hodnota globálnej časovej konštanty určená pri analytickom riešení. Podľa [23] na získanie dostatočne presných výsledkov je možné brať do úvahy krok 60 sekúnd. Počet iterácií numerickeho riešenia teploty vodiča určuje rovnica (17) [29]:

$$k = t/\Delta t, \tag{17}$$

kde

k je počet iterácií (-),

t je skúmané časové obdobie (s),

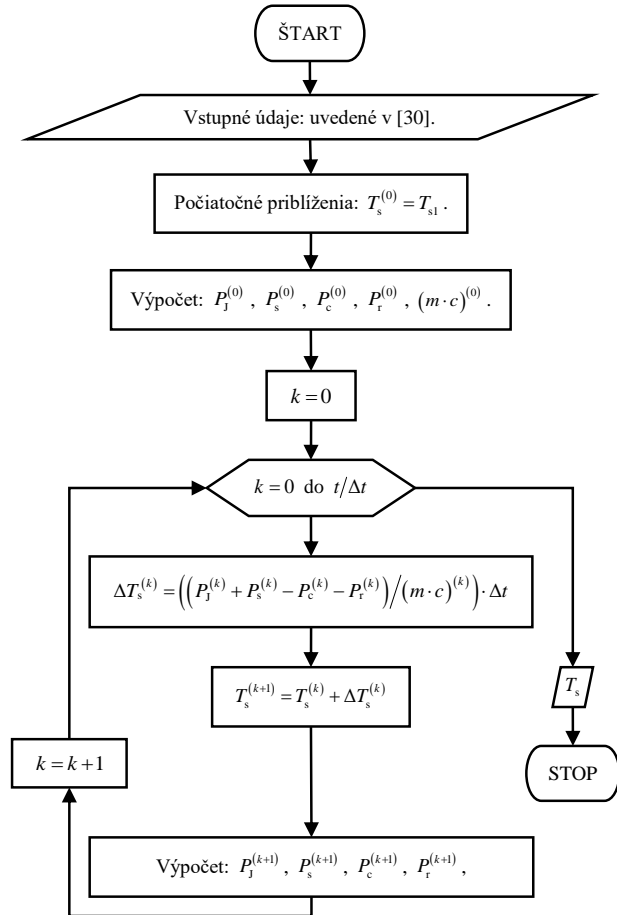
Δt je časový krok numerickej metódy (s).

Na Obr. 4 je znázornený vývojový diagram numerickeho výpočtu teploty vodiča v závislosti od času. Do výpočtu vstupujú parametre vodiča aj okolité podmienky, taktiež je potrebné definovať počiatočné priblíženie teploty vodiča. Za toto počiatočné priblíženie sa dosadzuje hodnota teploty vodiča v čase vzniku zmeny prevádzkových parametrov. Ak sa vodič nachádza v tepelnej rovnováhe, táto teplota sa určí z riešenia ustáleného stavu (teplota T_{s1} uvedená pri analytickom riešení). V porovnaní s analytickým riešením, ktoré vychádza z ustálenej teploty vodiča, numerický výpočet dokáže určiť priebeh teploty vodiča aj v prípade náhlych a častých zmien prevádzkových parametrov, medzi ktorými sa teplota vodiča ešte nestihne ustáliť. Oproti analytickému riešeniu do výpočtu nevstupuje asymptotická teplota vodiča T_{sm} po ustálení prechodného deja. Čo sa týka prevádzkových parametrov (klimatické podmienky a prúd tečúci vodičom), dosadzujú sa hodnoty po danej skokovej zmene.

Teplota vodiča sa počíta pre každý časový krok, t. j. v každej iterácii podľa rovnice (18), ktorá vychádza zo základnej rovnice tepelnej rovnováhy vodiča pre prechodný stav (11) a numericky vyjadruje deriváciu teploty vodiča podľa času. Konečná teplota vodiča na jednom intervale predstavuje počiatočnú hodnotu teploty na nasledujúcom intervale. Výsledný časový priebeh teploty vodiča je rovný vektoru tvorenému teplotami vodiča vypočítanými v jednotlivých iteráciách (na jednotlivých intervaloch). Súčin hmotnosti vodiča na jednotku dĺžky a mernej tepelnej kapacity vodiča sa prepočítava v každej iterácii na rozdiel od analytickej metódy, pri ktorej je tento súčin považovaný za konštantný:

$$T_s^{(k+1)} = T_s^{(k)} + \Delta T_s^{(k)},$$

$$T_s^{(k+1)} = T_s^{(k)} + \frac{P_J^{(k)} + P_s^{(k)} - P_c^{(k)} - P_r^{(k)}}{(m \cdot c)^{(k)}} \cdot \Delta t. \tag{18}$$



Obr. 4. Vývojový diagram znázorňujúci algoritmus výpočtu prechodnej teploty vodiča numerickým riešením.

Ako bolo spomenuté vyššie, dôležitým parametrom súvisiacim s dynamickou ampacitou je doba oteplenia vodiča na maximálnu dovolenú teplotu, ktorú je možné určiť analyticky podľa rovnice (16). Výpočet doby oteplenia vodiča je obdobný ako výpočet teploty vodiča numerickým riešením (Obr. 4). Pri výpočte doby oteplenia je však nutné použiť cyklus s podmienkou na začiatku a nie konečný cyklus (s definovaným počtom vykonaní tela cyklu), keďže skúmané časové obdobie nie je vopred známe. Pri tomto výpočte sa musí po každej iterácii preverovať podmienka, či je vypočítaná teplota vodiča rovná alebo väčšia ako maximálna dovolená teplota. Ak je splnená podmienka, čas prislúchajúci danej iterácii predstavuje konečný výsledok, t. j. dobu oteplenia vodiča na stanovenú maximálnu dovolenú teplotu.

V. POROVNANIE VÝPOČTU ČASOVÉHO PRIEBEHU TEPLOTY VODIČA S REÁLNYMI MERANAMI

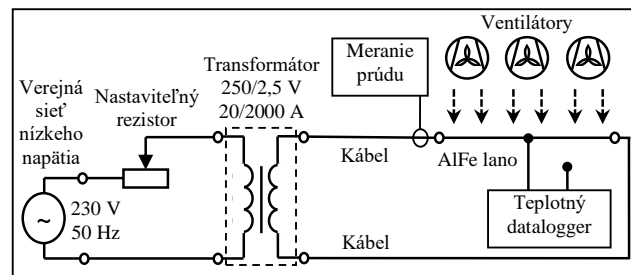
Táto časť sa zaoberá výpočtom časového priebehu teploty vodiča na základe reálnych meraní v laboratórnych podmienkach. Ako je prezentované M. Kanálikom, A. Margitovou a E. Beňom v [12], na Katedre elektroenergetiky, FEI TU v Košiciach bolo vykonaných niekoľko meraní priebehu teploty vodiča pre dva typy vodičov (6 meraní pre vodič 450 AlFe 8 a 7 meraní pre vodič 350 AlFe 6). Počas týchto meraní sa uskutočňovali skokové zmeny prúdu pretekajúceho vodičom, ako aj skoková zmena rýchlosti vetra, ktoré viedli k zmene teploty vodiča. V [12] sa autori zaoberajú výpočtom teploty vodiča na základe modelu DTH v ustálenom stave, t. j. bola počítaná iba ustálená teplota vodiča pred zmenou alebo po zmene daného prevádzkového parametra. Následne sa vytvorili závislosti ustálenej teploty vodiča na prúde pretekajúcom analyzovaným vodičom. Táto kapitola vychádza z výskumnej štúdie opísanej M. Kanálikom a A. Margitovou v [30], ktorá predstavuje rozšírenie problematiky uvedenej v [12] o výpočet teploty vodiča v prechodnom stave. Zmena teploty vodiča v čase bola vypočítaná tromi metódami, ktorých spôsob použitia je vysvetlený nižšie:

- analytickým riešením (AR),
- zjednodušeným numerickým riešením (ZNR),
- detailným numerickým riešením (DNR).

Výskumné práce uvedené v [2], [31]-[33] prezentujú výsledky výpočtu ustálenej teploty vodiča, ale aj časového priebehu teploty vodiča po skokových zmenách prúdu a rýchlosti vetra. Výsledky výpočtov sú v týchto prácach porovnané so skutočnými nameranými údajmi získanými v laboratórnych podmienkach, pričom sa simulácia vetra uskutočňovala umiestnením vodiča do špeciálneho aerodynamického tunela. Použitie veterného tunela zaistilo rovnomerné laminárne prúdenie vzduchu s homogénne rozloženou rýchlosťou a smerom vetra (90°) pozdĺž skúmanej vzorky vodiča. Simulácia zmeny rýchlosti vetra, ktorá je uvedená v tejto kapitole, bola namiesto použitia aerodynamického tunela realizovaná použitím troch bežných ventilátorov.

Na Obr. 5 je zobrazená zjednodušená schéma zapojenia na meranie priebehu teploty skúmaných vodičov a ďalších kľúčových veličín v laboratórnych podmienkach. Ako zdroj napätia bola použitá verejná sieť nízkeho napätia. Napätie preto nebolo stabilizované. Pomocou nastaviteľného rezistora bolo riadené primárne napätie, ako aj primárny prúd transformátora (250/2,5 V, 20/2000 A), a to s cieľom nastaviť prúd na sekundárnej strane na požadovanú hodnotu. Na sekundárnu stranu transformátora boli postupne pripojené dva skúmané vodiče s dĺžkou 2 m. Na meranie efektívnych hodnôt prúdu sa použil analyzátor kvality elektriny ENA 330 so zápisom dát každú 1 sekundu. Vzorkovacia frekvencia daného analyzátoru kvality elektrickej energie bola nastavená na 9 600 Hz a priemerná hodnota prúdu sa zaznamenávala každú jednu sekundu. Na meranie teploty (vodiča aj okolia) bol použitý 3-kanálový teplotný datalogger Extech SD200 s termočlánkami typu K. Interval zápisu teploty bol nastavený na 1 sekundu a boli použité dva z troch kanálov. Prvý kanál bol použitý na meranie po-

vrchovej teploty vodiča, pričom termočlánok bol nainštalovaný uprostred vodiča. Na meranie teploty okolia bol súčasne použitý druhý kanál teplotného dataloggera. Na simuláciu vetra boli použité tri ventilátory. Každý ventilátor bol umiestnený 1,5 m od vodiča a vzdialenosť medzi ventilátormi bola 40 cm. Smer vetra bol nastavený na 90° (kolmo na vodič) [30].



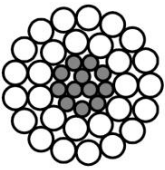
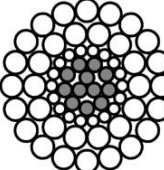
Obr. 5. Principiálna schéma zapojenia na merania v laboratórnych podmienkach.

Technické parametre analyzovaných vodičov AlFe uvádza TABUĽKA II. Kvôli zjednodušeniu výpočtov sa uvažovalo, že vplyv skinefektu a magnetických efektov nebol v prípade daných prevádzkových podmienok výrazný, a teda sa tieto dva vplyvy vedúce k otepleniu vodiča zanedbali. Laboratórium sa nachádzalo vo výške 208 m nad hladinou mora. Koeficient absorptivity a emisivity povrchu oboch skúmaných vodičov bol nastavený na hodnotu 0,35 [30].

Nameranú a vypočítanú ustálenú teplotu vodiča pre dve vybrané merania (č. 1 pre vodič 450 AlFe 8 a č. 2 pre vodič 350 AlFe 6) uvádza TABUĽKA III. Ustálená teplota vodiča bola vypočítaná na základe priamo nameraných hodnôt teploty okolia a prúdu, odhadnutých hodnôt rýchlosti a smeru vetra. Merania boli vykonávané v laboratórnych podmienkach s minimálnou úrovňou globálnej intenzity slnečného žiarenia, preto bola jej hodnota pevne nastavená na 0 W/m². Vypočítané ustálené teploty vodiča predstavujú nevyhnutné vstupné údaje do výpočtu časových priebehov teploty vodiča v prechodnom stave (po skokových zmenách parametrov), ktoré sú uvedené nižšie.

TABUĽKA III tiež uvádza prevádzkové parametre počas každého merania v definovaných časoch. Merania boli rozdelené na dva časové intervaly (označené I. a II.). Na začiatku I. intervalu sa uvažovalo so skokovou zmenou prúdu pri rýchlosti vetra 0 m/s. Na začiatku II. intervalu došlo k skokovej zmene rýchlosti vetra z 0 m/s na 2 m/s a uvažovalo sa taktiež s malou skokovou zmenou teploty okolia a prúdu. Počas jednotlivých meraní teplota okolia mierne stúpala a prúd taktiež kolísal, preto z dôvodu zvýšenia presnosti výpočtu teploty vodiča bola realizovaná aj ich skoková zmena na II. intervale. Pre každý interval bola z nameraných údajov vypočítaná priemerná hodnota teploty okolia a prúdu. Uvažovalo sa, že teplota okolia na začiatku merania (v čase 0) a priemerná teplota okolia pre celý I. interval sa rovnajú.

TABUĽKA II. KONŠTRUKČNÉ PARAMETRE SKÚMANÝCH ALFe LÁN [30]

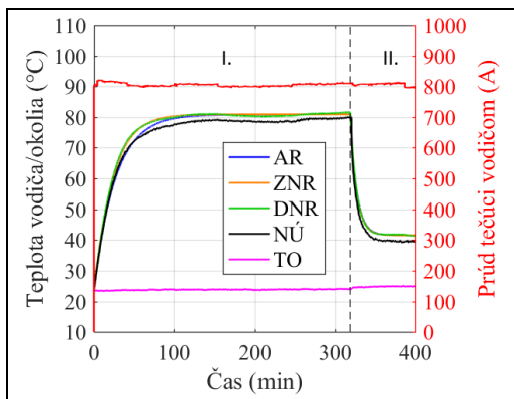
Typ AlFe lana	352-AL1/59-ST1A	350 AlFe 6	AlFe 350/59	429-AL1/52-ST1A	450 AlFe 8
	Priečný rez				
Materiál obalu	Tvrdo ťahaný hliník (1350-H19)			Tvrdo ťahaný hliník (1350-H19)	
Materiál jadra	Galv. oceľ			Galv. oceľ	
Počet drôtov obalu vo vrstvách (-)	11+17			18+14+20	
Počet drôtov jadra vo vrstvách (-)	3+9			3+9	
Priemer drôtov obalu (mm)	4			1,9/3,75	
Priemer drôtov jadra (mm)	2,5			2,36	
Vonkajší priemer (mm)	26,39			28,6	
Priemer jadra (mm)	10,39			9,8	
Priemer drôtu vo vonkajšej vrstve (mm)	4			3,75	
Jednosmerný odpor na jednotku dĺžky pri teplote 20 °C (Ω/m)	0,0816·10 ⁻³			0,0674·10 ⁻³	
Teplotný súčiniteľ odporu (1/K)	4·10 ⁻³			4·10 ⁻³	
Hmotnosť obalu na jednotku dĺžky (kg/m)	0,952			1,164	
Hmotnosť jadra na jednotku dĺžky (kg/m)	0,468			0,408	
Merná tepelná kapacita obalu pri teplote 20 °C (J/(kg·K))	897			897	
Merná tepelná kapacita jadra pri teplote 20 °C (J/(kg·K))	481			481	
Teplotný súčiniteľ mernej tepelnej kapacity obalu (1/K)	3,8·10 ⁻⁴			3,8·10 ⁻⁴	
Teplotný súčiniteľ mernej tepelnej kapacity jadra (1/K)	1·10 ⁻⁴			1·10 ⁻⁴	
Tepelná vodivosť obalu (W/(m·K))	240			240	
Koeficient absorptivity povrchu (-)	0,35			0,35	
Koeficient emisivity povrchu (-)	0,35			0,35	

V prípade výpočtu teploty vodiča analytickým riešením a zjednodušeným numerickým riešením boli zohľadnené iba skokové zmeny prevádzkových parametrov, ktoré definuje TABUĽKA III a v ktorej je uvedená aj prislúchajúca globálna časová konštanta pre analytické riešenie. Uvažovanie priemer-ných hodnôt nameranej teploty okolia a prúdu pre analyzova-né časové intervaly spôsobilo určitú nepresnosť vo výpočtoch pre tieto dve metódy. Pre zjednodušené a detailné numerické riešenie sa uvažoval časový krok 1 sekunda. Avšak v prípade detailného numerického riešenia boli vstupné hodnoty nameranej teploty okolia a prúdu aktualizované každú sekundu, nakoľko počas jednotlivých meraní neboli konštantné. Name-rané údaje (NÚ) teploty vodiča, vypočítané hodnoty teploty vodiča tromi vyššie uvedenými metódami (AR, ZNR, DNR), nameraná teplota okolia (TO) a nameraný prúd tečúci vodičom počas dvoch vybraných meraní sú znázornené na Obr. 6 a Obr. 7.

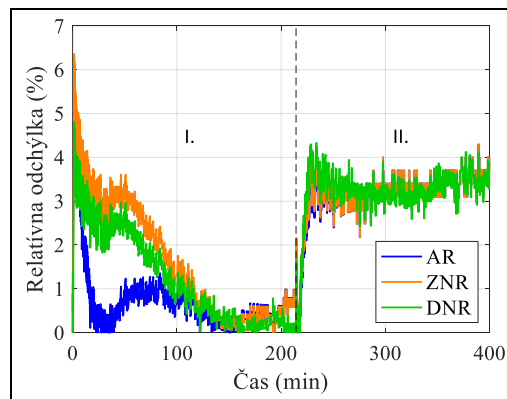
Na Obr. 8 a Obr. 9 je znázornený časový priebeh relatívnej odchýlky vypočítanej teploty vodiča (AR, ZNR, DNR) od nameraných údajov pre dve vybrané merania (č. 1 a č. 2). TABUĽKA IV uvádza maximálnu, priemernú a strednú od-chýlku vypočítanej od nameranej teploty vodiča pre dve vy-brané merania. Obr. 8, Obr. 9 a TABUĽKA IV ukazujú dobrú koreláciu medzi vypočítanými a nameranými krivkami, čo naznačuje, že výsledky výpočtu teploty vodiča realizované všetkými tromi metódami sú blízke skutočným nameraným údajom.

TABUĽKA III. NAMERANÁ A VYPOČÍTANÁ USTÁLENÁ TEPLOTA VODIČA PRE DVE VYBRANÉ MERANIA [30]

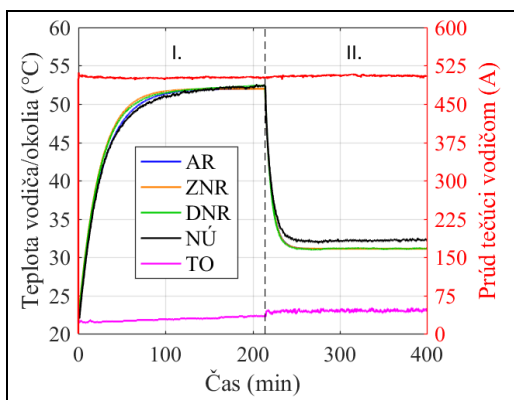
Typ vodiča	Číslo merania	Čas (min)	Rýchlosť vetra (m/s)	Smer vetra (°)	Intenzita snečného žiarenia (W/m ²)	Nameraná priemerná teplota okolia (°C)	Nameraný priemerný prúd (A)	Nameraná ustálená teplota vodiča (°C)	Vypočítaná ustálená teplota vodiča (°C)	Globálna časová konštanta (min)
450 AlFe 8	1	t = 0	0	90	0	23,8	0	23,4	23,8	-
		I. 0 < t ≤ 318,6	0			23,8	805,2	79,9	80,9	26,6
		II. t > 318,6	2			24,8	806,5	39,4	41,5	8,1
350 AlFe 6	2	t = 0	0	90	0	21,9	0	21,9	21,9	-
		I. 0 < t ≤ 214,3	0			21,9	501,7	52,4	52	26,2
		II. t > 214,3	2			23	505,4	32,4	31,1	7,1



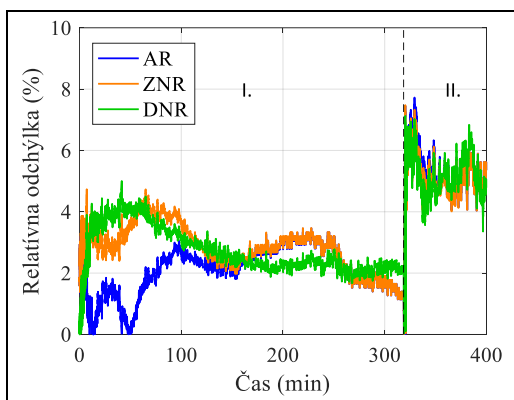
Obr. 6. Časový priebeh nameranej a vypočítanej teploty vodiča počas merania č. 1.



Obr. 9. Relatívna odchýlka vypočítanej od nameranej teploty vodiča počas merania č. 2.



Obr. 7. Časový priebeh nameranej a vypočítanej teploty vodiča počas merania č. 2.



Obr. 8. Relatívna odchýlka vypočítanej od nameranej teploty vodiča počas merania č. 1.

TABUĽKA IV. MAXIMÁLNA, PRIEMERNÁ A STREDNÁ ODCHÝLKA VYPOČÍTANEJ OD NAMERANEJ TEPLoty VODIČA PRE DVE VYBRANÉ MERANIA [30]

Typ vodiča	Číslo merania	Interval	AR			ZNR			DNR			
			Maximálna odchýlka (%)	Priemerná odchýlka (%)	Stredná odchýlka (%)	Maximálna odchýlka (%)	Priemerná odchýlka (%)	Stredná odchýlka (%)	Maximálna odchýlka (%)	Priemerná odchýlka (%)	Stredná odchýlka (%)	
			450 AlFe 8	1	I.	3,6	2,1	2,2	4,7	2,8	2,9	5
			II.	7,7	5,2	5,2	7,5	5,1	5,1	7,1	5,1	5,2
350 AlFe 6	2	I.	6,3	0,7	0,5	6,4	1,6	1,2	4,8	1,2	0,9	
			II.	4,3	3,1	3,2	4,3	3,2	3,3	4,3	3,2	3,3

VI. VÝPOČET OTEPLOVACÍCH KRIVKIEK VODIČA PRE RÔZNE HODNOTY PREVÁDZKOVÝCH PARAMETROV

Pod otepľovacou krivkou sa rozumie závislosť doby oteplenia vodiča na požadovanú teplotu (väčšinou maximálnu dovolenú teplotu) od efektívnej hodnoty prúdu po skokovej zmene, resp. od skokovej zmeny prúdu tečúceho vodičom. Inými slovami, otepľovacia charakteristika vyjadruje čas, za ktorý sa vodič oteplí na stanovenú teplotu, ak dôjde k určitej skokovej zmene prúdu pri známych prevádzkových parametroch pred zmenou. Určenie otepľovacej krivky vychádza z analytickej metódy výpočtu teploty vodiča a je matematicky charakterizované logaritmickou funkciou podľa rovnice (16), nakoľko čím väčší prúd tečie vodičom, tým kratšie ním môže byť vodič zaťažovaný tak, aby nebola prekročená jeho dovolená teplota. Asymptota tejto logaritmickej funkcie predstavuje hodnotu hraničného prúdu, ktorý môže tiecť vodičom teoretic-

ky nekonečne dlhý čas, pričom jeho teplota bude po ustálení rovná zadanej maximálnej teplote. Hraničný prúd je možné určiť z riešenia ustáleného tepelného stavu vodiča podľa rovnice (6), a to po dosadení príslušných klimatických podmienok pred vznikom skokových zmien prúdu. Význam otepľovacích charakteristík spočíva v možnosti krátkodobého prúdového preťaženia vodiča pri neprekročení jeho maximálnej dovolenej teploty (prechodná dynamická ampacita). V tejto kapitole je uvedené porovnanie otepľovacích kriviek pre rôzne hodnoty prúdu tečúceho vodiča pred skokovou zmenou a rôzne kombinácie klimatických podmienok.

Otepľovacie krivky uvedené v tejto kapitole boli určené pre vodič 350 AlFe 6 (TABUĽKA II). Uvažovalo sa s hodnotou koeficientu absorptivity/emisivity povrchu vodiča 0,35 a nadmorskou výškou 208 m. Otepľovacie charakteristiky boli vypočítané pre maximálnu dovolenú teplotu vodiča 80 °C. Skúmaná doba oteplenia vodiča na maximálnu dovolenú teplotu bola od 10 minút po 60 minút, nakoľko dynamická ampacita platí len obmedzenú dobu kvôli náhlym a nie vždy predvídateľným zmenám klimatických podmienok. Z dôvodu jednoduchosti odčitavania údajov bola pre os y (doba oteplenia) zvolená lineárna mierka.

Na nasledujúcich štyroch obrázkoch sú znázornené otepľovacie krivky vodiča 350 AlFe 6 pre rôzne hodnoty prúdu pred skokovou zmenou a:

- dve rôzne hodnoty intenzity slnečného žiarenia (Obr. 10),
- štyri rôzne hodnoty rýchlosti vetra (Obr. 11),
- tri rôzne hodnoty teploty okolia (Obr. 12),
- tri rôzne kombinácie klimatických podmienok (Obr. 13),

I_{ACI} je efektívna hodnota striedavého prúdu tečúceho vodiča pred skokovou zmenou (A),
 I_{ACm} je efektívna hodnota striedavého prúdu tečúceho vodiča po skokovej zmene (A),
 V je rýchlosť vetra (m/s),
 δ je smer vetra (°).

Na Obr. 10 až Obr. 13 sú uvedené série otepľovacích kriviek pre rôzne klimatické podmienky a súčasne pre päť hodnôt prúdu pred skokovou zmenou, a to pre 0 A, 300 A, 600 A, 700 A a 800 A. Z porovnania kriviek jednej série pre rôzne hodnoty prúdu pred zmenou a rovnaké klimatické podmienky vyplýva, že hodnota prúdu, ktorý tečie vodičom pred skokovou zmenou prúdu, má vplyv na výsledný tepelný stav vodiča po tejto zmene. Čím vyšší je prúd tečúci vodičom pred zmenou, tým nižšiu má vodič tepelnú rezervu umožňujúcu jeho krátkodobé preťaženie vyššou hodnotou prúdu. Vzďialenosti medzi krivkami pre jednotlivé hodnoty prúdu pred zmenou poukazujú na fakt, že oteplenie vodiča Jouleovými stratami je priamo úmerné druhej mocnине prúdu tečúceho vodičom (rovnica (2)).

Na Obr. 10 sú vykreslené otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu pred skokovou zmenou a dve hraničné hodnoty intenzity slnečného žiarenia (0 W/m² a 1000 W/m²). Z Obr. 10 vyplýva, že oteplenie vodiča vplyvom slnečného žiarenia je oveľa menej výrazné ako ohrev vodiča Jouleovými stratami. Rozdiel v hraničnom prúde medzi dvoma extrémami, t. j. naj-

nižšou (0 W/m²) a najvyššou (1000 W/m²) uvažovanou intenzitou slnečného žiarenia je len cca 55 A. Dôvodom je aj skutočnosť, že solárny ohrev vodiča narastá lineárne so zvyšovaním intenzity slnečného žiarenia (rovnica (3)). Krivky pre strednú hodnotu intenzity slnečného žiarenia (500 W/m²) by sa teda nachádzali uprostred kriviek pre intenzitu slnečného žiarenia 0 W/m² a 1000 W/m².

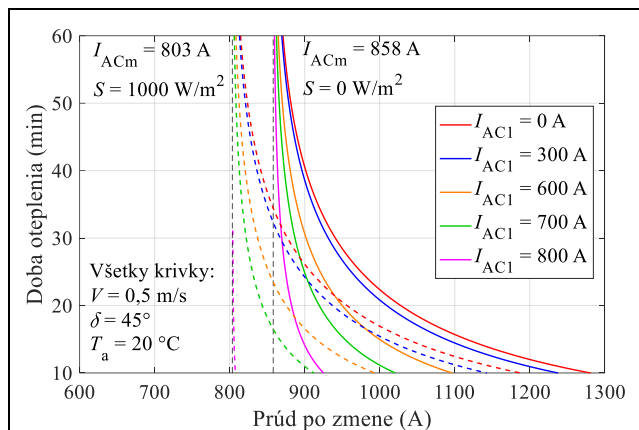
Na Obr. 11 sa nachádzajú štyri série otepľovacích kriviek pre rýchlosť vetra od 0 m/s do 4 m/s. Tento obrázok poukazuje na výrazný vplyv rýchlosti vetra na chladenie vodiča. V prípade bezvetria a bežne vyskytujúcich sa klimatických podmienok (intenzita slnečného žiarenia 500 W/m² a teplota okolia 20 °C) je možné vodič zaťažovať neobmedzene dlhú dobu prúdom cca 674 A, zatiaľ čo pri uvažovaní rýchlosti vetra na úrovni 4 m/s je táto hodnota prúdu až 1472 A. Pri náraste rýchlosti vetra sa krivky pre jednotlivé hodnoty prúdu pred zmenou približujú k sebe, nakoľko začína byť vplyv chladenia vodiča vetrom dominantný oproti otepleniu vodiča Jouleovými stratami.

Vplyv teploty okolia -10 °C, 20 °C a 40 °C na dovolené prúdové zaťaženie vodiča je vidieť na Obr. 12. Pri teplote 40 °C, ako maximálnej teplote okolia vyskytujúcej sa v letných mesiacoch, je možné vodič zaťažovať neobmedzene do 673 A. Pri teplote -10 °C, ktorá je typická pre zimné obdobie, je to možné až do 1017 A. Na krivkách príslušajúcich teplote okolia -10 °C, ktorá prispieva k chladeniu vodiča, je stále viditeľný pomerne výrazný vplyv počiatocnej hodnoty prúdu tečúceho vodičom pred zmenou.

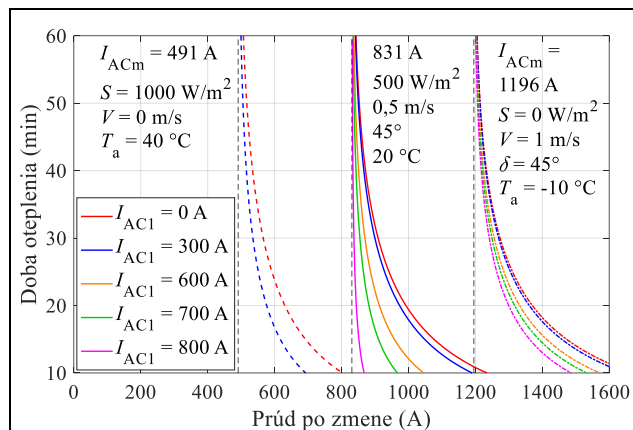
Na Obr. 13 sú zobrazené otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu pred zmenou a klimatické podmienky pre horúce leto, bežný deň (stredné hodnoty poveternostných podmienok) a pre zimný deň. Pre teplý letný deň (vysoká intenzita slnečného žiarenia a teplota okolia, bezvetrie) môže tiecť vodičom pri dodržaní maximálnej dovolenej teploty teoreticky nekonečne dlhý čas prúd iba 491 A. Krátkodobu (na 10 minút) je možné vodič zaťažiť hodnotou prúdu 803 A, ak by bol prúd pred zmenou 0 A, resp. hodnotou 693 A, ak by bol prúd pred zmenou 300 A. V prípade preťaženia vodiča až na 30 minút by šlo o prúdy 566 A (prúd pred zmenou 0 A) a 535 A (prúd pred zmenou 300 A).

Pri zvyčajne vyskytujúcich sa klimatických podmienkach (intenzita slnečného žiarenia 500 W/m², teplota okolia 20 °C a rýchlosť vetra 0,5 m/s) je možné neobmedzene zaťažovať predmetný vodič prúdom do 831 A. Krátkodobé prúdové preťaženie vodiča do 10 minút je možné realizovať v rozsahu prúdov 868 A až 1234 A (prúd pred zmenou 800 A až 0 A), do 30 minút v rozmedzí prúdov 837 A až 909 A (prúd pred zmenou 800 A až 0 A).

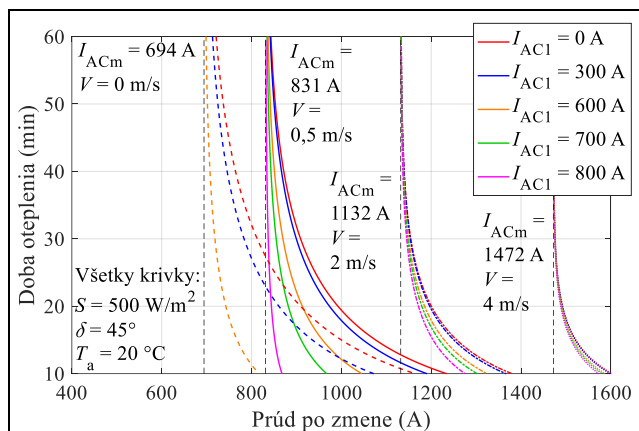
Čo sa týka zimného dňa (nízka teplota okolia a intenzita slnečného žiarenia, plus chladenie vetrom o rýchlosti 1 m/s), tepelná rezerva vodiča je veľká a je ho možné neobmedzene dlhú dobu zaťažovať prúdom až do 1196 A. Z tejto série kriviek vyplýva, že v prípade priaznivých poveternostných podmienok (napríklad počas zimného obdobia) môžu tiecť vodičom vysoké prúdy prakticky bez výrazných obmedzení. V takom prípade nemá praktický význam zaoberať sa krátkodobým prúdovým preťažením vodiča.



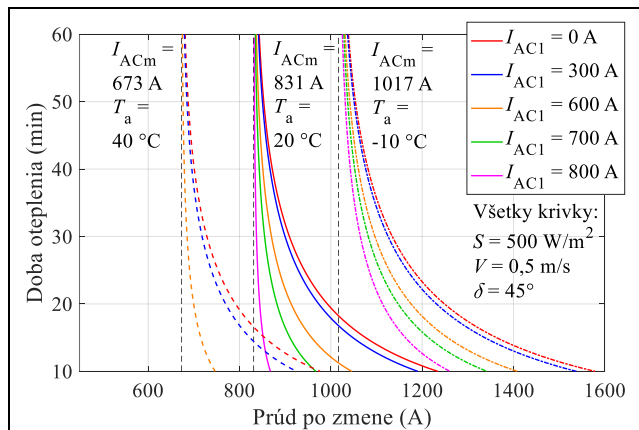
Obr. 10. Otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu pred zmenou a dve rôzne hodnoty intenzity slnečného žiarenia.



Obr. 13. Otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu pred zmenou a tri rôzne kombinácie klimatických podmienok.



Obr. 11. Otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu pred zmenou a štyri rôzne hodnoty rýchlosti vetra.



Obr. 12. Otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu pred zmenou a tri rôzne hodnoty teploty okolia.

VII. ZÁVER

Zvyšovanie prenosovej schopnosti vedení výpočtom dynamickej ampacity predstavuje v súčasnosti veľmi aktuálnu a perspektívnu oblasť výskumu. Okrem toho môže aplikácia dynamického tepelného hodnotenia prispieť k zníženiu preťaženia prenosových vedení, k zjednodušeniu integrácie obnoviteľných zdrojov energie do elektrizačnej sústavy, k zníženiu nákladov na výmenu vodičov alebo výstavbu nových vedení, k zvýšeniu spoľahlivosti prevádzky elektrizačnej sústavy a pod.

Prvá polovica praktickej časti článku sa zaoberá verifikáciou vypočítaného časového priebehu teploty vodiča na základe uvažovania reálnych meraní v laboratórnych podmienkach. V tomto článku boli prezentované dve vybrané merania (na dvoch vodičoch AlFe), počas ktorých bola realizovaná skoková zmena prúdu a skoková zmena rýchlosti vetra, ktorá sa uskutočnila kolmým ofukovaním vodiča zapnutím ventilátorov. Keďže sa skokové zmeny týchto parametrov realizovali v čase, kedy bola teplota vodiča ustálená, bolo možné porovnať výpočet teploty vodiča analytickým aj numerickým riešením. Vyhodnotenie relatívnych odchýlok vypočítaných od nameraných hodnôt teploty vodiča poukázalo na veľmi dobrú koreláciu vypočítaných priebehov (analytickou aj numerickou metódou) s nameranými krivkami teploty vodiča.

Druhú časť praktickej časti článku tvorí skúmanie možnosti krátkodobého prúdového preťaženia vodičov s cieľom navýšiť prenosovú kapacitu vedení. V tomto článku sú uvedené otepľovacie charakteristiky vodiča, ktoré vyjadrujú závislosť doby oteplenia vodiča na maximálnu dovolenú teplotu od efektívnej hodnoty prúdu po skokovej zmene. Porovnávajú sa otepľovacie krivky pre rôzne hodnoty prúdu tečúceho vodičom pred skokovou zmenou a rôzne kombinácie klimatických podmienok. Z realizovanej analýzy vyplýva, že pri uvažovaní priaznivých klimatických podmienok by bolo možné vodič krátkodobo zaťažovať vysokými hodnotami prúdov, v niektorých prípadoch až do 1600 A, pričom by sa neprekročila jeho maximálna dovolená teplota. Je dôležité poznamenať, že táto hodnota prúdu by nenarušila mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti skúmaného vodiča, no na druhej strane by boli spl-

nené iba konštrukčné a bezpečnostné kritériá konkrétneho vedenia, na ktorom je daný vodič nainštalovaný. Elektrizáčna sústava je však tvorená ďalšími prvkami, ako sú generátory, transformátory, motory, tlmivky, prístrojové transformátory prúdu, odpojovače, výkonové vypínače, prípojnice a pod., pre ktorých bezpečnú a spoľahlivú prevádzku musí byť taktiež stanovená hodnota ampacity (maximálneho dovoleného prúdu).

POĎAKOVANIE

Tento článok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0576.

LITERATÚRA

- [1] S. Beryozkina, A. Sauhats, and E. Vanzovichs, "Climate conditions impact on the permissible load current of the transmission line," 2011 IEEE Trondheim PowerTech, pp. 1-6, 2011.
- [2] S. Abbott et al., "Experimental validation and comparison of IEEE and CIGRE dynamic line models," 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, pp. 1-5, 2010.
- [3] Z. Yan, Y. Wang, Y., and L. Liang, "Analysis on ampacity of overhead transmission lines being operated," Journal of Information Processing Systems, vol. 13, no. 5, pp. 1358-1371, 2017.
- [4] CIGRE, Working Group B2/C1.19, Increasing capacity of overhead power lines – Needs and solutions, Technical Brochure 425, 2010.
- [5] I. Albizu, A. Mazon, and I. Zamora, "Methods for increasing the rating of overhead lines," 2005 IEEE Russia Power Tech, pp. 1-6, 2005.
- [6] S. Karimi, P. Musilek, and A. Knight, "Dynamic thermal rating of transmission lines: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 91, pp. 600-612, 2018.
- [7] M. Bhuiyan et al., "Evaluating thermal aging characteristics of electric power transmission lines," CCECE 2010, pp. 1-4, 2010.
- [8] J. Heckenbergerova et al., "Identification of critical aging segments and hotspots of power transmission lines," 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 1-4, 2010.
- [9] P. MUSILEK, J. HECKENBERGEROVA, and M. BHUIYAN, "Spatial analysis of thermal aging of overhead transmission conductors," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1196-1204, 2012.
- [10] J. Šnajdr, J. Sedláček, and Z. Vostracký, "Application of a line ampacity model and its use in transmission lines operations," Journal of Electrical Engineering, vol. 65, no. 4, pp. 221-227, 2014.
- [11] A. Michiorri et al., "Forecasting for dynamic line rating," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 1713-1730, 2015.
- [12] M. Kanálik, A. Margitová, and Ľ. BEŇA, "Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE Technical Brochure 601 in Slovakia," Electrical Engineering, vol. 101, no. 3, pp. 921-933, 2019.
- [13] C. Wallnerstrom, Y. Huang, and L. Soder, "Impact from dynamic line rating on wind power integration," IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 343-350, 2015.
- [14] M. Miura et al., "Application of dynamic rating to evaluation of ATC with thermal constraints considering weather conditions," 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, 2006.
- [15] J. Heckenbergerova, P. Musilek, and K. Filimonenkov, "Assessment of seasonal static thermal ratings of overhead transmission conductors," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 2011.
- [16] J. Heckenbergerová, P. Musilek, and K. Filimonenkov, "Quantification of gains and risks of static thermal rating based on typical meteorological year," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, no. 1, pp. 227-235, 2013.
- [17] P. Zhang et al., "Determination of static thermal conductor rating using statistical analysis method," 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 1237-1243, 2008.
- [18] F. McElvain and S. Mulnix, "Statistically determined static thermal ratings of overhead high voltage transmission lines in the Rocky Mountain region," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 899-902, 2000.
- [19] L. Staszewski and W. Rebizant, "Avoiding blackouts with dynamic thermal line rating," 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), pp. 1-5, 2015.
- [20] Overhead electrical conductors - Calculation methods for stranded bare conductors, IEC TR 61597, 1995.
- [21] IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors, IEEE Std 738, 2012.
- [22] Working Group 22.12, Thermal behaviour of overhead conductors, Technical Brochure 207, 2002.
- [23] Working Group B2.43, Guide for thermal rating calculations of overhead lines, Technical Brochure 601, 2014.
- [24] N. Schmidt, "Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1555-1559, 1999.
- [25] A. Babs, "Weather-based and conductor state measurement methods applied for dynamic line rating forecasting," 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, s. 762-765, 2011.
- [26] M. Simms and L. Meegahapola, "Comparative analysis of dynamic line rating models and feasibility to minimise energy losses in wind rich power networks," Energy Conversion and Management, vol. 75, pp. 11-20, 2013.
- [27] A. Arroyo et al., "Comparison between IEEE and CIGRE thermal behaviour standards and measured temperature on a 132-kV overhead power line," Energies, vol. 8, no. 12, pp. 13660-13671, 2015.
- [28] P. van Staden and J. de Kock, "The practical comparison of conductor operating temperatures against IEEE and CIGRE ampacity calculations," IEEE Power and Energy Society Conference and Exposition in Africa: Intelligent Grid Integration of Renewable Energy Resources (PowerAfrica), pp. 1-7, 2012.
- [29] N. Štieberová, Výpočet dynamickej ampacity vonkajších vedení, diplomová práca, Košice: TU FEI, 2020.
- [30] M. Kanálik and A. Margitová, "Transient-state temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE Technical Brochure 601," Arabian Journal for Science and Engineering, submitted for publication, 2021.
- [31] J. Fu, D. Morrow, and S. Abdelkader, "Integration of wind power into existing transmission network by dynamic overhead line rating," 11th Intl Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, pp. 1-5, 2012.
- [32] J. Fu et al., "Wind cooling effect on dynamic overhead line ratings," 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC 2010, pp. 1-6, 2010.
- [33] S. Girshin, A. Bigun, and E. Petrova, "Analysis of dynamic thermal rating of overhead power lines in the conditions of forced convection considering non-linearity of heat transfer processes," 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 1-6, 2016.

Výskum využitia obnoviteľných zdrojov v spolupráci s batériovými systémami

Jakub Urbanský

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE
Košice, Slovensko
Jakub.Urbansky@tuke.sk

Ľubomír Beňa

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE
Košice, Slovensko
Lubomir.Bena@tuke.sk

Abstrakt—Tento článok je zameraný na problematiku využívania obnoviteľných zdrojov spolupráci s batériovými systémami. V úvode podrobne vymedzuje súčasné poznatky v oblasti teórie obnoviteľných zdrojov elektrickej energie a akumulácie. V ďalšej časti je analyzovaná pripojiteľnosť obnoviteľných zdrojov a batériových systémov do prenosovej sústavy Slovenskej republiky. Jadro článku je zamerané na výskum využitia batériových systémov a obnoviteľných zdrojov v oblasti elektroenergetiky. Je vytvorený model primárnej regulácie činného výkonu poskytovaného pomocou batériového systému a jeho následné ekonomické zhodnotenie. Tak isto je vytvorený aj model off-grid a on-grid systému spolupráce obnoviteľných zdrojov energie a batériového systému a jeho ekonomické zhodnotenie. V záverečnej časti článku je vyhodnotený prínos využitia obnoviteľných zdrojov v spolupráci s batériovými systémami na základe výsledkov získaných z vytvorených počítačových modelov.

Kľúčové slová— *obnoviteľné zdroje energie; batériové systémy; OZE; BESS; on-grid; off-grid; podporné služby*

Abstract—This article is focused on the use of the renewable energy sources in cooperation with battery energy storage systems. The introductory part defines the current knowledge in the field of the renewable energy sources and accumulation. The next part analyzes the connectivity of renewable sources and battery systems to the transmission system of the Slovak Republic. The main part of the article is focused on research of battery systems and renewable sources in the field of electric power engineering. It is created a model of frequency regulation provided by a battery energy storage system and it is subsequently economically evaluated. It is created a model of the off-grid system with inclusion of battery energy storage system which is subsequently economically evaluated. It is also created a model of on-grid system with usage of battery energy storage system which is also economically evaluated. The final part of article evaluates benefits of using renewable energy sources with battery energy storage cooperation based on the results obtained from created computer models.

Keywords— *renewable energy sources; battery energy storage systems; RES; BESS; on-grid; off-grid, ancillary services*

I. ÚVOD

V súčasnosti vo svete prevláda trend v zvyšovaní podielu elektrickej energie vyrobenej z obnoviteľných zdrojov energie. Medzi hlavné dôvody je možné zaradiť zníženie závislosti na fosílnych palivách a obmedzenie dopadov na životné

Tento článok vznikol na základe podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0576.

prostredie, ktoré vznikajú pri ich aktívnom využívaní. V roku 2016 bol v Paríži 177timi členskými štátmi organizácie spojených národov (OSN) podpísaný rámcový dohovor (k marcu 2019 – 195 podpísalo, 186 ratifikovalo). V ktorom sa účastné štáty zaviazali, v článku 2, udržať nárast globálnej priemernej teploty pod hranicou 2 °C, v porovnaní s hodnotami pred priemyselnou revolúciou tak, aby nárast teploty neprekročil hranicu 1,5 °C oproti hodnotám pred priemyselnou revolúciou [1].

Podľa návrhu smernice o podpore využívania obnoviteľných zdrojov energie z roku 2016, Európska únia (EÚ) stanovuje nový cieľ pre rok 2030 na úroveň aspoň 27% [2]. V Decembri 2019 predstavitelia EÚ schválili ambiciózne cieľ aby bola EÚ do roku 2050 v súlade s cieľmi Parížskej dohody klimaticky neutrálna [3].

Na základe vyššie spomínaného je možné konštatovať, že jedným z hlavných dôvodov popularity obnoviteľných zdrojov je spomalenie, zastavenie a zvrátenie klimatických zmien.

Z dôvodu nepredikovateľnosti výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov je nutné vyriešiť stav kedy, je jej nedostatok, ale aj stav kedy, je jej prebytok s ohľadom na princíp fungovania elektrizačnej sústavy (zachovanie stavu equilibria: množstvo elektrickej energie, ktoré je spotrebované musí byť aj vyrobené v každom časovom okamihu [4]). Jedným z možných riešení tohto problému je práve akumulácia energie.

Článok je zameraný na možnosti využitia kolaborácie obnoviteľných zdrojov energie a batériových systémov. V článku sú prezentované výsledky z počítačových simulácií využitia batériových systémov pri primárnej regulácii činného výkonu. Ekonomické zhodnotenie projektu. Taktiež sú v článku prezentované výsledky z počítačovej simulácie off-grid a on-grid systému s využitím OZE a batériových systémov a ich ekonomické zhodnotenie.

II. OBNOVITEĽNÉ ZDROJE ELEKTRICKEJ ENERGIE

Rozdelenie energetických zdrojov

Energetické zdroje je možné z hľadiska vyčerpatelnosti rozdeliť na:

- obnoviteľné (nie je ich možné vyčerpať v časovom horizonte existencie ľudstva),
- neobnoviteľné (je ich možné vyčerpať v časovom horizonte existencie ľudstva - regeneratívne v extrémne dlhom časovom horizonte). [5][6]

V energetike sa často zamieňajú dva základné pojmy:

- obnoviteľné zdroje energie (OZE),
- alternatívne zdroje energie (AZE). [6]

Pojmom alternatívne zdroje energie, nevyjadrujeme mieru ich obnoviteľnosti, či vyčerpatelnosti z akejkoľvek perspektívy. Za alternatívne zdroje energií môžeme považovať energetické zdroje, ktoré sa snažia byť alternatívou k tradičnej energetickej produkcii (spaľovanie fosílnych palív) a ich následkom na životné prostredie. [6]

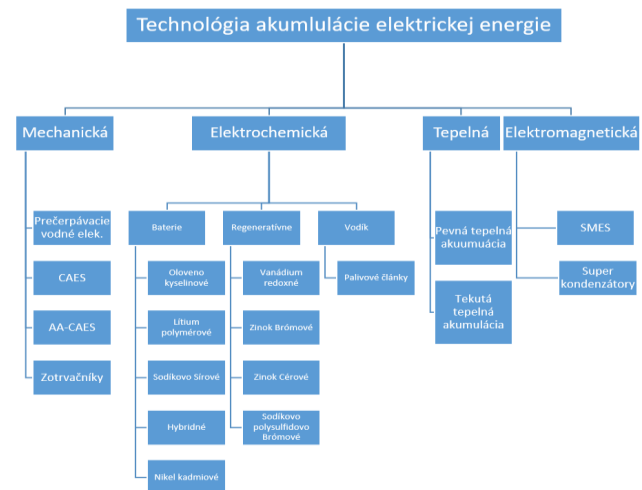
OZE sú poddruhom AZE. Medzi OZE je možné zaradiť:

- slnečnú energiu,
- energiu vetru,
- energiu vody,
- geotermálnu energiu,
- energiu biomasy. [6]

III. MOŽNOSTI AKUMULÁCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE

Pojem akumulácia elektrickej energie je možné klasifikovať ako hromadenie alebo uchovávanie elektrickej energie vo vhodnej kvalite a kvantite na jej neskoršie využitie. [7] Elektrina je na rozdiel od iných druhov energetických komodít (ropa, plyn, uhlie ...) podriadená z hľadiska stability elektrizačnej sústavy (frekvencia, napätia, ...) podmienke:

- v každom čase musí byť výroba elektriny prispôbená jej spotrebe. [4] [7]



Obr. 1. Rozdelenie akumulácie elektrickej energie z technologického hľadiska [8]

Elektrickú energiu je možné uchovávať pomocou rôznych technológií (Obr. 1):

- elektrochemická akumulácia,
- mechanická akumulácia,

- tepelná akumulácia,
- elektromagnetická akumulácia. [9]

Vo všeobecnosti, zariadenia na uchovávanie elektrickej energie pozostávajú z:

- akumulačného média,
- zariadenia na konverziu energie,
- zariadenia na udržiavanie rovnováhy systému. [10]

A. Elektrochemická akumulácia

Elektrochemickú akumuláciu je možné v súčasnosti zaradiť nie len v elektroenergetike za najbežnejší typ akumulácie. Elektrochemický akumulátor (batéria) je zariadenie, ktoré premieňa chemickú energiu uloženú v aktívnych materiáloch priamo na elektrickú pomocou elektrochemickej oxidačno-redukčnej (redoxnej) reakcie. [11]

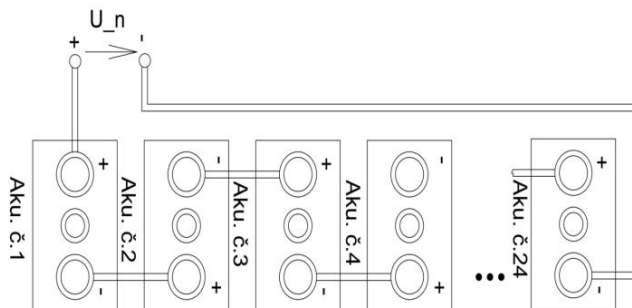
Často sa používa termín batéria, základnou jednotkou batérie je článok. Batéria pozostáva z viacerých článkov. Pri dimenzovaní batérie na špecifickú záťaž sa požadované parametre ako napätie a kapacita dosiahne vhodným elektrickým zapojením (napr. požiadavka na 48 V systém pre akumuláciu z FV, pozostáva z 24 do série zapojených akumulátorov vid' Obr. 31). [11]

Článok pozostáva z troch hlavných komponentov:

- zo zápornej elektródy (anódy – redukčnej alebo palivovej elektródy), ktorá dodáva elektróny externému obvodu a je oxidovaná počas elektrochemickej reakcie,
- z kladnej elektródy (katódy – oxidačnej elektródy), ktorá priama elektróny z externého obvodu a je redukovaná počas elektrochemickej reakcie,
- z elektrolytu (iónového vodiča), médium na prenos náboja (iónov), vo vnútri článku medzi anódou a katódou. [11]

V súčasnosti existuje veľké množstvo elektrochemických akumulátorov vhodných na akumuláciu elektrickej energie z OZE. Musia spĺňať niekoľko dôležitých parametrov ako:

- Vysoká nabíjacia/vybíjacia účinnosť,
- Nízke samovybíjanie,
- Vysoká životnosť (vysoký počet nabíjajúcich/vybíjajúcich cyklov). [9]



Obr. 2. Sériové zapojenie 24 kusov batérií [10]

B. Porovnanie batériových systémov

TABUĽKA I. POROVNÁVACIA TABUĽKA V SÚČASNOSTI POUŽÍVANÝCH ELEKTROCHEMICKÝCH AKUMULAČNÝCH SYSTÉMOV [12]

Technológia	Životnosť pri 80% hĺbke vybitia (cykly)	Účinnosť (%)	Aplikácia
Oloveno kyselinové	300 - 3000	70 až 90	Elektromobily, Malé zásobníky pre domácnosti.
NiCd	3000	80	Elektromobily, vesmírne aplikácie, domácnosti.
NiMH	2000	50 až 80	Elektromobily, vesmírne aplikácie, domácnosti.
Li-ion	3000	75 až 90	Elektromobily, spotrebná elektronika, domácnosti.
Prietokové NaS	2000 až 20000 4500	65 až 80 89	Energetický zásobník Energetický zásobník

V tabuľke I. je možné vidieť v súčasnosti najpoužívanejšie technológie elektrochemickej akumulácie v elektroenergetike. Najväčšiu životnosť vykazujú prietokové batérie, sú však náročné na priestor a chladenie. Za v súčasnosti najpoužívanejšiu technológiu môžeme považovať batérie na báze lítia. Lítium-iónové batérie sú založené na princípe prenosu iónov lítia z kladnej k zápornej elektróde počas nabíjania a opačným prenosom počas vybitia. Kladná elektróda pozostáva z oxidov kovov lítia, ktoré uchovávajú ióny lítia a zápornej elektródy zložené z uhlíka. Elektrolyt je lítiová soľ v organických rozpúšťadlách. Životnosť lítiových batérií sa pohybuje pri 80% hĺbke vybitia na úrovni 3000 cyklov vybitia a opätovného nabitia. [12] Výhody a nevýhody jednotlivých systémov batérií sú zhrnuté v tabuľke II.

TABUĽKA II. VÝHODY A NEVÝHODY NAJČASTEJŠIE POUŽÍVANÝCH ELEKTROCHEMICKÝCH AKUMULAČNÝCH SYSTÉMOV [12]

Technológia	Výhody	Nevýhody
Oloveno kyselinové	Cenovo dostupné, Rozvinutá technológia, Bez údržbové. Životnosť,	Limitovaný počet cyklov, Nízka energetická hustota.
NiCd	Tolerantnejšie voči nepriaznivým podmienkam.	Pamäťový efekt, Vysoké samovybíjanie, Environmentálne riziko.
NiMH	Vysoká energetická hnosota, dobrý výkon pri nízkych teplotách.	Vysoká cena, Možné poškodenie
Li-ion	Vysoká energetická hnosota, nízke samovybíjanie, bez pamäťového efektu	Stále vysoká cena.
Prietokové NaS	Nezávislé od hĺbky vybitia, vysoká životnosť. Vysoká účinnosť a životnosť	Náklady na údržbu, Komplexné monitorovanie a kontrolné mechanizmy Vysoká prevádzková teplota

IV. SÚČASNÝ STAV V OBLASTI OZE NA SLOVENSKU

A. Potenciál výroby elektrickej energie z OZE na Slovensku

Celkový potenciál výroby z OZE na Slovensku za obdobie jedného roku je 26,88 TWh. Pri vzatí veľkých vodných elektrární do úvahy táto hodnota vzrastie na 32,45 TWh (tabuľka III.). [13]

V súčasnosti je na Slovensku inštalovaný výkon v OZE, ak nepočítame vodné elektrárne, pre výrobu elektrickej energie na úrovni 11% (0,88 GW celkovo). Najväčšie zastúpenie inštalovaného výkonu majú vodné elektrárne s výkonom 33% (2,54 GW), nasledované energiou získavanou z jadra 25% (1,94 GW) a zdrojmi pre výrobu elektriny z fosílnych palív 25% (1,92 GW). [14]

TABUĽKA III. TECHNICKY VYUŽITELNÝ POTENCIÁL OBNOVITEĽNÝCH ZDROJOV NA SLOVENSKU

Druh	Technicky využitelný potenciál (TWh.rok ⁻¹)
Geotermálna energia	6,30
Veterná energia	0,61
Slnčná energia	5,20
Malé vodné elektrárne	1,03
Veľké vodné elektrárne > 10 MWE	5,58
Biopalivá	2,50
Biomasa	11,24
Spolu (bez veľkých vodných elektrární)	26,88
Spolu	32,45

B. Geotermálna energia

S 6,3 TWh.rok⁻¹ geotermálna energia patrí medzi druhý najväčší energetický zdroj na Slovensku. Slovensko má priaznivé podmienky pre rozvoj a využitie geotermálnych vôd. Na základe výskumu a prieskumu je na území Slovenska vyčlenených 25 perspektívnych oblastí s akumuláciou geotermálnych vôd s teplotami od 25°C do 150°C. Prevažná časť oblastí má teplotu vôd vhodnú pre vykurovanie bytov a priemyselných priestorov. [13]

C. Veterná energia

Zo všetkých OZE má výroba energie z vetra na Slovensku najnižší potenciál z dôvodu nevyhovujúcich veterných pomerov. Na nížinách západného Slovenska sa priemerná ročná rýchlosť vetra vo výške 10 metrov nad aktívnym povrchom pohybuje v intervale od 3 do 4 m.s⁻¹, na východnom Slovensku od 2 do 3 m.s⁻¹. [13]

D. Slnčná energia

Priemerné ročné sumy globálneho žiarenia sú najvyššie v nížinách, 1200 až 1300 kWh.m⁻², v najvyšších polohách východnej časti Tatier je to 1100 až 1200 kWh.m⁻², v stredných horských polohách a na krajnom severozápade Slovenska

1050-1100 kWh.m⁻², čo je ovplyvnené hlavne zväčšenou oblačnosťou. V kotlinách je globálne žiarenie ovplyvňované inverziami a nízkou oblačnosťou, hodnoty sa pohybujú v intervale 1100 až 1200 kWh.m⁻²[13]

Využitelný potenciál slnečnej energie na Slovensku je približne 5,20 TWh/rok, čo je približne 16 % z celkovej hodnoty OZE. [13]

E. Energia vody

Pri uvažovaní všetkých vodných elektrární na Slovensku, je celkový technický potenciál vodnej energie na úrovni 6,61 TWh.rok⁻¹, čo je približne 20,4% z celkového potenciálu OZE. [13]

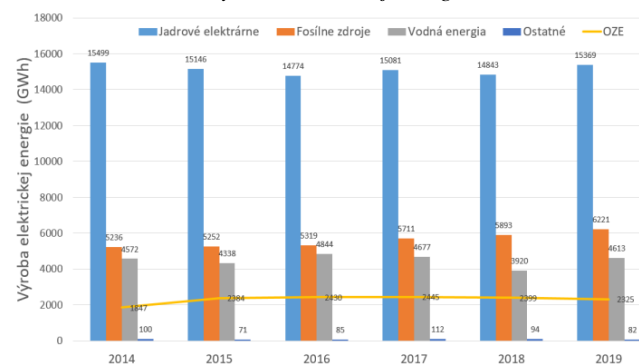
F. Biomasa

Z technicky využiteľného potenciálu OZ na Slovensku za rok pripadá na biomasu až 35% (11,24 TWh.rok⁻¹). [13]

Na energetické účely je pre podmienky Slovenska najvhodnejšie používať:

- lesnú biomasu vrátane energetických porastov,
- poľnohospodársku biomasu,
- odpad z drevospracujúceho priemyslu,
- odpad z potravinárskeho priemyslu,
- odpadovú biomasu z priemyselnej sféry,
- odpadovú biomasu z komunálnej sféry. [13]

G. Podiel OZE na výrobe elektrickej energie na Slovensku



Obr. 3. Prehľad vyrobenej elektrickej energie na území Slovenska za roky 2014 až 2019 [15]-[19]

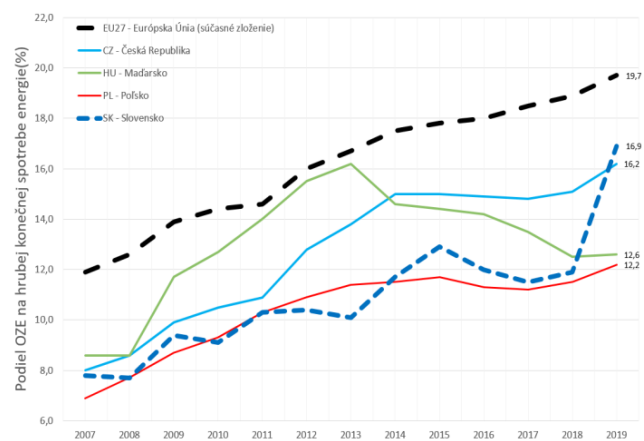
Podiel OZE na výrobe elektrickej energie na Slovensku v posledných rokoch stagnuje na úrovni 25%. [15]-[19] Dôvodom tejto stagnácie je nedostatočná podpora zo strany štátu, čo potvrdzuje aj hodnotenie medzinárodnej energetickej agentúry (IEA – international energy agency). Z dôvodu obavy o stabilitu siete a bezpečnosť dodávok elektriny prestali v roku 2013 distribučné spoločnosti prijímať žiadosti o pripojenie OZE nad 10 kWe (tzv. STOP-stav). [20]

Slovensko plánuje splniť národné ciele v oblasti OZE najmä podporou biomasy, čo môže vytvárať tlak na lesné ekosystémy. Novelou zákona o OZE a kombinovanej výrobe,

upravila definíciu biomasy, čo môže prispieť k ochrane národných lesov. [21]

Jedným z najvýznamnejších projektov na podporu OZE pre domácnosti „Zelená domácnostiam“ (ZD) bude pokračovať aj v roku 2019. Jedná sa o spoločný projekt Ministerstva životného prostredia SR (MŽPSR) a Slovenskej inovačnej a energetickej agentúry (SIEA). V prvom projekte ZD, sa prerozdeleno za roky 2015 až 2018 41 miliónov €, bolo inštalovaných až 18 502 zariadení (Solárne kolektory, FV panely, tepelné čerpadlá, kotle na biomasu ...) s celkovým inštalovaným výkonom 141 MW. [21]

Od 1.1.2020 vyhlásilo Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky (MH SR) aukciu, ktorá je súčasťou novej reformy, na podporu elektrickej energie získavanej z OZE. Reforma má spôsobiť lacnejšiu cenu za energiu z OZE implementáciou trhového princípu. V globále sa očakáva navýšenie až o 30MW kde bude hlavným kritériom cena. Pre pandémie COVID-19 bola aukcia v apríli 2020 zrušená, nové vedenie MH SR sa k nej chce vrátiť vzhľadom na záväzky SR voči EÚ Cieľom je navýšenie objemu z 30MW na 50MW. Nová aukcia predpokladá informovanie smerom k potenciálnym investorom o dostupných kapacitách pripojenia v jednotlivých uzloch. Distribučné spoločnosti dostali za úlohu špecifikovať voľné kapacity v potenciálnych miestach pripojenia. [22][23]



Obr. 4. Porovnanie podielu OZE na hrubej konečnej spotrebe energie priemeru EU27, Slovenska a ostatných krajín V4 [24]

Podiel OZE na hrubej konečnej spotrebe energie od roku 2007 do roku 2016 stúpala len mierne, za rok 2019 bol na úrovni 16,9%. Zaostáva za priemerom Európskej 27, avšak vedie v porovnaní s ostatnými krajinami V4 (Obr. 4). [24]

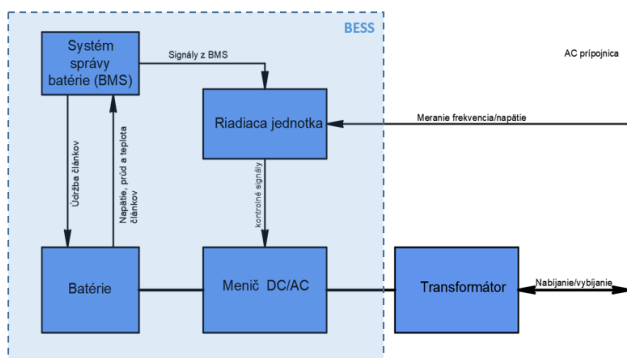
V. SYSTÉMY USKLADNENIA ELEKTRICKEJ ENERGIE NA BÁZE BATÉRIÍ

Zariadenia na uskladnenie elektrickej energie (battery energy storage systems – BESS), je typ úložiska elektrickej energie, ktoré akumuluje elektrickú energiu v čase jej prebytku a dodáva ju do siete v prípade jej nedostatku. BESS zariadenia uchovávajú elektrickú energiu formou elektrochemickej akumulácie.

A. Základná štruktúra BESS

Na Obr.5 je možné vidieť schému základnej štruktúry BESS, ktorá pozostáva z:

- batérie (blok na Obr. 38 vyjadruje viacero článkov zapojených v sériových a paralelných konfiguráciách podľa potreby samotnej BESS na dosiahnutie požadovaného výkonu a kapacít),
- meniču DC/AC,
- transformátoru,
- riadiacej jednotky,
- systému správy batérie (battery management system – BMS). [25][26]



Obr. 5. Diagram základnej štruktúry BESS [25][26]

Výrobcovia uprednostňujú dodávku hotových BESS formou kontajnerov (pozri), v ktorých je inštalovaná celá výzbroj v jednom kompaktnom celku [26][27][28]. Dôvod používania danej formy spočíva v pružnosti systému (expandovanie výkonu a kapacity, pozri Obr. 6) , konštrukčnej ochrany jednotlivých častí subsystému, ako aj jednoduchšiemu transportu a inštalácii na mieste určenia.



Obr. 6. BESS Kontajner obsahujúci batériové články s výzbrojou [26]

Blok batérií je zapojený k meniču DC/AC, ktorý pracuje v dvoch základných režimoch:

- ako striedač, pri vybíjaní BESS,
- ako usmerňovač pri nabíjaní BESS.

Striedač je pripojený k blokovému transformátoru pomocou, ktorého je pripojený do sústavy (distribučnej/prenosovej). Rozsiahlejšie systémy pozostávajú z

väčšieho množstva DC/AC meničov a blokových transformátorov (pozri Obr. 7).



Obr. 7. BESS úložisko zložené z viacerých kontajnerov (25MW/12.5MWh, Tynemouth UK) [28]

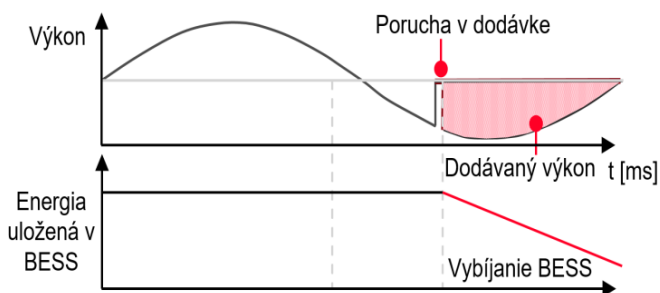
B. Využitie BESS v elektroenergetike

Batérie majú v elektroenergetike široké uplatnenie. Je ich možné využiť na úrovni:

- výroby elektrickej energie (stabilizáciu výroby z OZE),
- prenosu elektrickej energie (podporné služby, oddiaľovanie investícií do stavby nových vedení),
- distribúcie elektrickej energie (regulácia napätia, vyrovňovanie špičiek ...),
- spotrebiteľa elektrickej energie (off-grid dodávka, vyrovňovanie špičiek, ...). [30]

1) Regulácia frekvencie

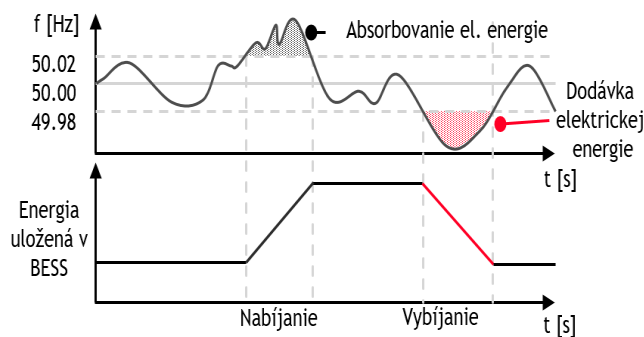
Regulácia frekvencie pozostáva z točivej rezervy (Obr. 8), ktorá sa dokáže aktivovať ihneď v prípade potreby a doplnkovej rezervy, ktorá nie je pripojená do systému stále, ale v prípade potreby sa aktivuje v požadovanom čase.[31]



Obr. 8. Točivá rezerva dodávaná z BESS

Aj keď BESS priamo nevyrába elektrickú energiu premenou mechanickej energie na elektrickú (BESS sama o sebe nie je „točivá“), dokáže dodávať veľké množstvo elektrickej energie (rádovo v jednotkách až stovkách MW) v krátkej dobe (rádovo ms. pozri Obr. 8). Preto ju môžeme považovať schopnú poskytovania točivej rezervy.

BESS sú schopné poskytovať primárnu reguláciu činného výkonu a frekvencie FCR (Frequency containment reserve) v kladnom aj zápornom smere. [32][33]



Obr. 9. Charakteristika činnosti BESS pri pôsobení v primárnej regulácii

V databáze BESS spojených s reguláciou frekvencie, v prevádzke alebo vo výstavbe, s inštalovaným výkonom 1MW a viac uvedených v databáze [34] vyplýva, že najviac inštalovaných projektov celosvetovo sa nachádza na území:

- USA,
- Nemecko,
- Číny
- Talianska.

TABUĽKA IV. TECHNOLOGICKÉ ZASTÚPENIE BESS PROJEKTOV VO SVETE S INŠTALOVANÝM VÝKOMOM VIAC AKO 1MW [34]

Technológia batérie	(%)
Založené na Li-ion	79,2
Sódiovo-sírové	8,8
Oloveno kyselinové	8,1
Prietočné	3,3
Iné	0,6

BESS na základe Li-ion technológie je podľa Tab. IV možné označiť za najpoužívanejší typ batérií. Používané sú aj rôzne typy sódiovo-sírových, oloveno kyselinových a prietočných batérií.

2) Podpora napätia

Cieľom podpory napätia je minimalizovať činné straty a udržiavať napäťovú stabilitu. V prípade poklesu napätia v sústave sa zvýši prúd, ktorý je potrebný na udržanie výkonu. Zvýšenie prúdu spôsobí nárast spotreby jalového výkonu čo ešte viac zníži napätie. Zvýšený prúd preteká vedeniami čo zvyšuje jouleove straty, až do bodu kedy ich odpoja ochrany. Pokles napätia taktiež prinúti ochrany odpojiť generátory aby nedošlo k ich poškodeniu. Situácia môže viesť až ku kaskádovému zlyhaniu tzv. Black-outu. [35]

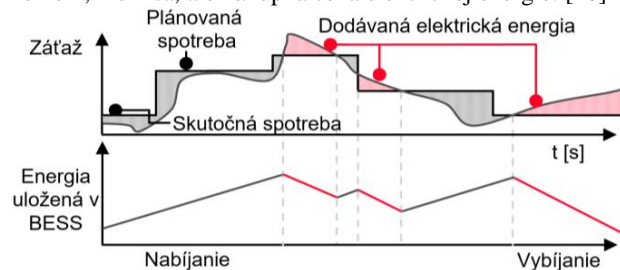
Podpora napätia je v súčasnosti realizovaná statickými synchronnými kompenzátormi, synchronnými generátormi, kondenzátorovými batériami a pod. [4] BESS sú schopné dodávať a odoberať jalový výkon. Jalový výkon sa generuje prostredníctvom spínania solid-state elektronických

komponentov striedačov podobne ako v statických synchronných kompenzátormi. Výhodou je tiež decentralizované umiestnenie BESS a teda absencia potreby prenášať jalový výkon vedeniami na veľké vzdialenosti. [36]-[39]

3) Vyhladzovanie špičiek a vyrovnávanie zaťaženia

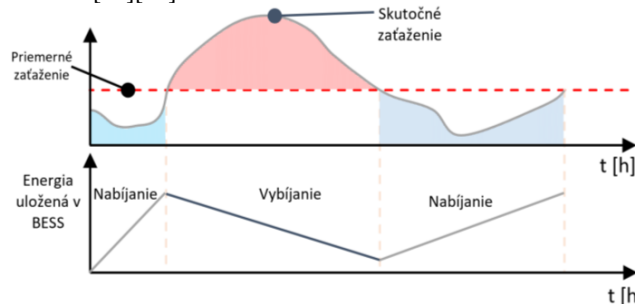
Koncept vyhladzovania špičiek pomocou BESS možno rozdeliť na:

1. Akumuláciu elektrickej energie do BESS počas v čase zníženej spotreby (napr. v nízkej tarife, kedy je elektrická energia lacnejšia) alebo prípade prebytkovej elektrickej energie vygenerovanej z OZE počas dňa.
2. Vybijaniu elektrickej energie z BESS počas denných špičiek za účelom ušetrzenia finančných prostriedkov. Takéto použitie BESS šetrí peniaze bez narušenia normálnej prevádzky subjektu. Spotreba elektrickej energie sa v princípe nemení, mení sa, ale nákupná cena elektrickej energie. [40]



Obr. 10. Vyhladzovanie špičiek pomocou BESS

Princíp vyrovnávania záťaže je porovnateľný s vyhladzovaním špičiek. Vyrovnávanie záťaže je ideálny stav kedy je množstvo dodávanej elektrickej energie z iného zdroja a z BESS dostatočné na vyrovnanie záťaže na priemernú hodnotu[40][41]



Obr. 11. Vyrovnávanie zaťaženia pomocou BESS

Medzi monetárne výhody vyhladzovania špičiek a vyrovnávania záťaže pomocou BESS je teda možné zaradiť:

- Energetickú arbitráž,
- Redukciu poplatkov za využívanie špičkovej energie,
- Odklad nutných investícií.[[40][41]

4) Schopnosť startu z tmy

BESS sú schopné poskytnúť aktívnu rezervu elektrickej energie v rámci elektrickej siete. V prípade katastrofického kaskádového zlyhania siete BESS dokážu byť použité na napájanie prenosových, distribučných sietí a na rozbeh elektrární.[42]



Obr. 12. Inštalácia BESS o výkone 33MW a kapacite 20MWh umiestnená v Kalifornii [43]

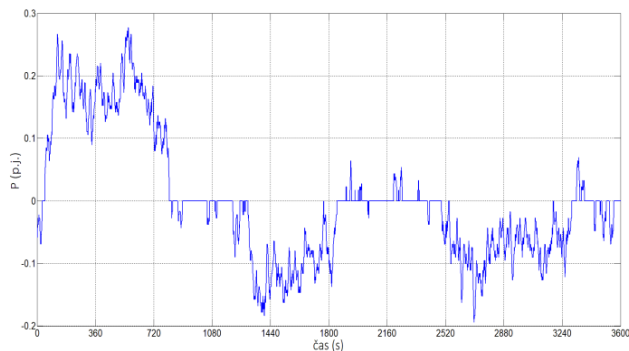
Na Obr. 12 je možné vidieť inštaláciu BESS o výkone 33MW a kapacite 20MWh umiestnenú v Kalifornii (Spojené štáty americké), ktorá poskytla 10.5.2017 podpornú službu štartu z tmy. Úspešne pomohla rozbehnúť 44MW paroplynovú turbínu bez potreby elektrickej energie z externého zdroju. Na stabilizáciu elektrárne sa potom BESS zmenil na spotrebiteľa elektrickej energie. [43]

VI. ANALÝZA NASADITEENOSTI BATÉRIOVÝCH SYSTÉMOV V PODPORNÝCH SLUŽBÁCH NA ÚZEMÍ SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Akumulačné zariadenia, pod ktoré spadajú aj batérové systémy BESS je v súčasnej dobe možné pripojiť do prenosovej sústavy po splnení požadovaných technických požiadaviek prevádzkovateľa prenosovej sústavy PPS (pozri kapitolu).

A. Primárna regulácia činného výkonu a frekvencie

Primárnu reguláciu činného výkonu a frekvencie (PRV) možno definovať ako automatickú funkciu, ktorej princíp spočíva v presnej zmene výkonu v závislosti na odchýlke frekvencie od menovitej hodnoty frekvencie (50Hz). PRV pracuje v rozmedzí ± 200 mHz. Hodnota regulačnej rezervy výkonu PPRV nesmie byť menšia ako ± 1 MW a väčšia ako ± 10 MW. [44]



Obr. 13. Hodinový priemer PRV v pomerných jednotkách vypočítaný na základe rálných dát z merania frekvencie

Priebeh PRV je dynamický, regulácia prebieha na základe aktuálneho stavu v sieti (podľa odchýlky frekvencie od nominálnej hodnoty) a prepína medzi kladnou (nedostatok

výkonu v sieti) a zápornou (prebytkom výkonu v sieti) dodávkou energie do sústavy (pozri Obr. 13). Je možné konštatovať, že PRV nezaťažuje batérový systém hlbokými cyklami (nabíjanie/vybíjanie), čo má pozitívny vplyv na životnosť batérií.

B. Sekundárna regulácia činného výkonu

Sekundárna regulácia činného výkonu a frekvencie (SRV) je využívaná na vyrovnávanie cezhraničných výmen elektrickej energie na plánované hodnoty. Zohľadňuje sa množstvo elektrickej energie s ohľadom na plánované hodnoty s ohľadom na žiadanú hodnotu frekvencie. Udržiava equilibrium medzi produkciou a spotrebou elektrickej energie v rámci každej regulačnej oblasti. Aktivuje sa automaticky z centrálného regulátora dispečingu. [45]

Sekundárna regulácia si vyžaduje nasadenie BESS s veľkými výkonovými tokmi (2MW až 45MW [58]), ich zmena je síce pomalá (trend zmeny $1,5\text{MW}\cdot\text{min}^{-1}$). Dodávka výkonu je požadovaná po relatívne dlhú dobu, celý rozsah regulačnej rezervy musí byť nasadený do 15min od 1.1.2022 do 7,5min v oboch smeroch. [44]

BESS teda prechádza pomerne častými a hlbokými cyklami nabíjania a vybíjania. To má negatívny vplyv na životnosť batérií. Nežiadúci účinok hlbokých cyklov nie je badateľný pri prietokových batériách. Faktorom, ktorý nie je možné prehliadnuť je však ich nižšia účinnosť, kvôli ktorej by dochádzalo k značným stratám, ich vyššia cena ako aj priestorové požiadavky. Celkovo sa však v oblasti vývoju prietokových batérií dosiahlo významných zlepšení. Na rok 2030 bol stanovený cieľ dosiahnuť životnosť 10000 cyklov pri cene $0,05\text{€}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. [46]

Vzhľadom na vyššie spomenuté fakty nie je v súčasnosti nasadenie BESS pre poskytovanie podpornej služby SRV vhodné.

C. Terciárna regulácia činného výkonu.

Za terciárnu reguláciu činného výkonu (TRV) je možné považovať každú manuálnu alebo automatickú zmenu činného výkonu zariadení presunom ich pracovných bodov. Účelom TRV je zabezpečiť dostatočnú zálohu SRV, ktorá zodpovedá aktuálnej potrebe so zreteľom na veľkosť v danom čase. [44]

V priemere býva TRV aktivovaná len niekoľko krát do roka. Je teda možné skonštatovať, že nedochádza k veľkému zaťažovaniu BESS a teda ani k ich častému cyklovaniu (pozitívne pre ich životnosť).

Minimálny čas na počas ktorého musí byť k dispozícii činný výkon pri poskytovaní TRV3MIN+, TRV10MIN+ je 6h v prípade TRV3MIN-, TRV10MIN- 3h a v prípade TRV15MIN±, mFRR± je to nepretržite v čase trvania disponibilít. [44] V prípade poskytovania TRV výhradne pomocou BESS by bolo nutné realizovať systém s veľkou kapacitou batérií, ktorý by bol technicky uskutočniteľný, ale v súčasnej dobe príliš náročný na investovanie finančných prostriedkov, čo by mohlo inklinovať k ekonomickej neutržateľnosti projektu.

Konvenčne používané klasické zdroje nie sú schopné rýchlych regulačných zmien výkonu čo je pri TRV dôležitá vlastnosť. BESS by teda mohol spolupracovať za účelom krátkodobého zastúpenia klasického zdroja v prvom momente od aktivácie podpornej služby zo strany prevádzkovateľa prenosovej sústavy do chvíle kedy by konvenčný zdroj dosiahol požadovaného výkonu. Daný zdroj by v momente dosiahnutia požadovaných parametrov prebral dodávku TRV a BESS by sa odstavil. Ideálne by preto pre poskytovanie TRV s BESS bola kombinácia systému s klasickým zdrojom.

D. Sekundárna regulácia napätia

Sekundárnu reguláciu napätia (SRN) je možné charakterizovať ako reguláciu napätia v pilotnom uzle elektrizačnej sústavy pomocou jalového výkonu, tak aby bola v predpísaných medziach. [44] V prípade poskytovania SRN pomocou BESS nie sú kladené hlavné nároky priamo na batérie, ale na striedače, ktoré sú súčasťou BESS. V súčasnosti sú striedače používané v BESS schopné pracovať s účinníkom v rozsahu 0 - 1.

Na rok 2021 stanovilo ÚRSO ako hodnotu maximálnych povolených nákladov na zabezpečenie SRN 5175000€.[44] Cena za MVarh sa pohybuje rádovo v desiatkach centov. Je teda vhodné, aby BESS poskytoval aj inú podpornú službu zároveň so SRN.

E. Nasadenie v podpornej službe štart z tmy

Veľké množstvo elektrární nie je schopné naštartovať po úplnom rozpade elektrizačnej sústavy. Pre uvedenie do prevádzky potrebujú prítomnosť podporného zdroja. V tomto smere existuje značný potenciál pre nasadenie BESS. Frekvencovanosť aktivácie podpornej služby je nízka, preto na zabezpečenie ekonomickej návratnosti projektu s uvažovaním BESS je vhodné primárne nasadenie pri inom type PpS.

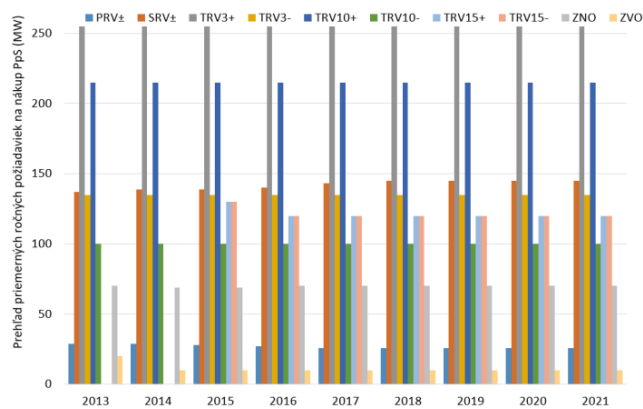
F. Nasadenie BESS na zabezpečenie PpS na území Slovenskej republiky

V súčasnosti podľa platných technických podmienok prístupu a pripojenia (pravidlá prevádzkovateľa prenosovej sústavy – Dokument B) prevádzkovateľa prenosovej sústavy Slovenskej republiky (PPS SR) je možné nasadenie BESS len na zabezpečenie PRV.[44]

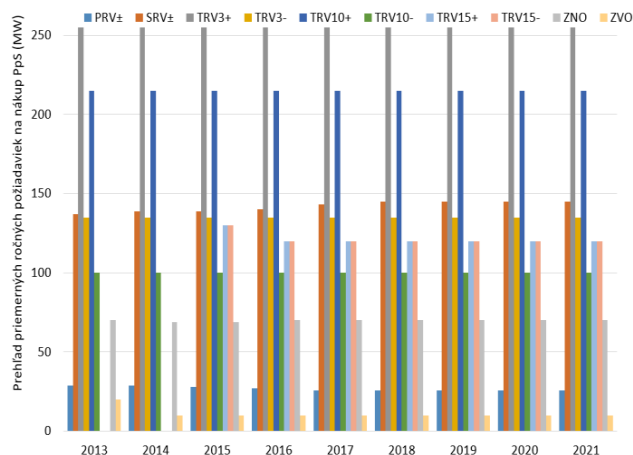
Od roku 2013 je možné pozorovať postupný pokles v požiadavkách na nákup podpornej služby PRV z 29MW na 26MW v roku 2021 (pozri Obr. 14). V prípade SRV je možné pozorovať nárast zo 137MW v roku 2013 na 145MW v roku 2021. Pri TRV $3\pm$ (+255MW, -135MW), $10\pm$ (+215MW, -100MW) sa požiadavky na nákup od roku 2013 do roku 2021 nemenili. TRV $15\pm$ sa zaradila medzi podporné služby až v roku 2015 s prvotnou požiadavkou na nákup ± 130 MW. V roku 2021 je nákup na úrovni ± 120 MW. ZNO sa od roku 2013 po rok 2021 drží na úrovni -70MW. ZVO kleslo z +20MW v roku 2013 na +10MW v roku 2014. V súčasnosti je požiadavka na nákup na úrovni +10.

Na základe Obr. 15 je možné konštatovať pokles maximálnych cien za poskytovanie jednotlivých typov podporných služieb. V prípade jedinej v súčasnosti

realizovateľnej PpS pomocou BESS, PRV poklesla cena z 59€ za MW/hodinu z roku 2013 na cenu 40,61€ za MW/hodinu. Priemerný ročný pokles ceny za rezervovaný výkon PRV bol od roku 2013 do 2021 na úrovni 2,3€.



Obr. 14. Prehľad priemerných ročných požiadaviek na nákup PpS [46]



Obr. 15. Prehľad maximálnych cien za poskytovanie jednotlivých druhov podporných služieb [47]

VII. SÚČASNÝ STAV PRE PRIPOJENIE OZE A AKUMULAČNÝCH ZARIADENÍ DO PRENOSOVEJ SÚSTAVY SR

V technickom dokumente N PPS na území Slovenskej republiky – Slovenská elektrizačná a prenosová sústava (SEPS, a.s.) sú v kapitole 3.1 uvedené elementárne technické požiadavky na pripojenie zariadení na výrobu elektrickej energie do prenosovej sústavy. [48]

Vydaním nariadenia komisie Európskej únie 2016/631 zo dňa 14.4.2016, v ktorom sa stanovujú sieťové nariadenia pre požiadavky na pripojenie výrobcov elektrickej energie do elektrizačnej sústavy, vznikla požiadavka na úpravu technického dokumentu N SEPS. Táto požiadavka bola zapracovaná do technického dokumentu N SEPS v 5. a 6. aktualizácii v roku 2019. V nariadení bol vymedzený dôležitý pojem v súvislosti s OZE a to „jednotka parku zdrojov“ ako jednotka alebo súbor jednotiek produkujúcich elektrickú energiu, ktoré sú do siete pripojené cez jedno miesto pripojenia

do prenosovej alebo distribučnej sústavy (vrátane uzavretej distribučnej siete alebo siete jednosmerného prúdu vysokého napätia - HVDC):

- nesynchronne,
- alebo prostredníctvom silovej elektroniky.[48][49]

Elektroenergetické zariadenie účastníka trhu sa do prenosovej sústavy v zmysle platnej legislatívy môže pripojiť len po splnení:

- technických požiadaviek uvedených v technických podmienkach PPS,
- obchodných podmienok v prevádzkovom poriadku PPS. [48]

Technické požiadavky musia spĺňať:

- nové výrobné zariadenia,
- zariadenia, ktoré prešli modernizáciou alebo výmenou vybavenia v takom rozsahu, kedy je potrebné uzatvoriť novú zmluvu medzi PPS a vlastníkom zariadenia.[48]

VIII. MODEL PRIMÁRNEJ REGULÁCIE ČINNÉHO VÝKONU POSKYTOVANÝ POMOCOU BESS

V súčasnosti je možné pomocou BESS v prenosovej sústave Slovenskej republiky poskytovať z podporných služieb iba PRV. Cieľom bolo vytvoriť model PRV poskytovaného pomocou BESS a na základe vykonanej simulácie zhodnotiť jeho možné prínosy.

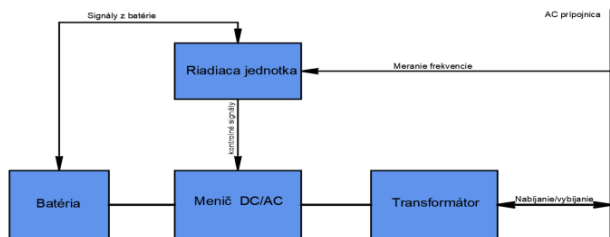
A. Softvérové prostredie – Nadstavba Matlab Simulink

Model je implementovaný prostredníctvom grafického rozšírenia Simulink výpočtového softvéru Matlab. V Simulinku je možné podľa integrovaných blokov, užívateľsky vytvorených blokov alebo vložených funkcií zostaviť zložité výpočtové simulácie.

B. Bloková schéma modelu primárnej regulácie činného výkonu poskytovaného pomocou BESS

Model BESS (pozri Obr. 16) pozostáva z:

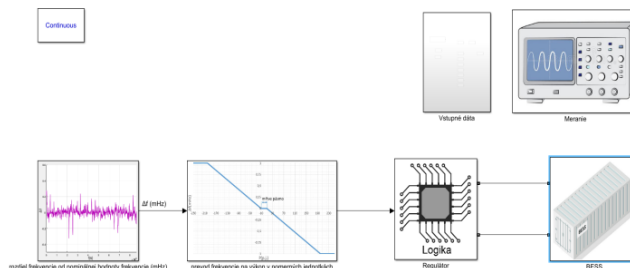
- Lítium iónových batérií (1MW/1MWh),
- riadiacej jednotky,
- obojsmerného meniču DC/AC
- transformátora.



Obr. 16. Bloková schéma modelu

Osobitné časti modelu sú v počítačovom modeli implementované s ohľadom na nasledujúce predpoklady:

- BESS je udržiavaná v okolí 50% úrovne nabitia,
- V prípade kladného rozdielu frekvencie od nominálnej hodnoty frekvencie (50Hz) sa BESS nabíja proporčne podľa charakteristiky PRV,
- V prípade záporného rozdielu frekvencie od nominálnej hodnoty frekvencie (50Hz) sa BESS vybíja proporčne podľa charakteristiky PRV,
- V modeli sa uvažuje s iba tokmi činných výkonov (model nerieši reguláciu napätia).

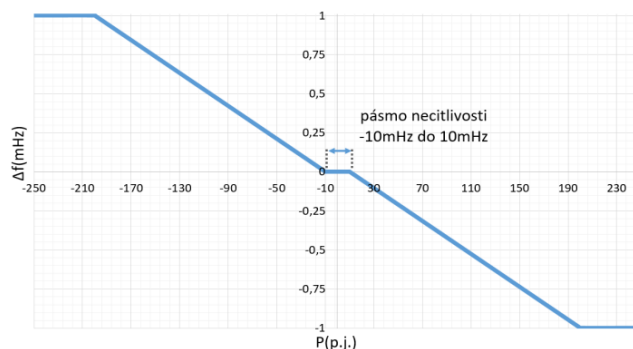


Obr. 17. Bloková schéma v prostredí Matlab Simulink

Na Obr. 17 je možné vidieť blokovú schému modelu v prostredí Matlab Simulink pozostávajúcu z:

- Vstupných dát,
- Rozdielu skutočnej frekvencie od nominálnej hodnoty frekvencie Δf (mHz),
- Prevodníka Δf na činný výkon (p.j.),
- Regulátora,
- Batérie (blok BESS),
- Merania.

Transformátor je v simulácii uvažovaný zníženou účinnosťou systému (percentuálnou stratou).

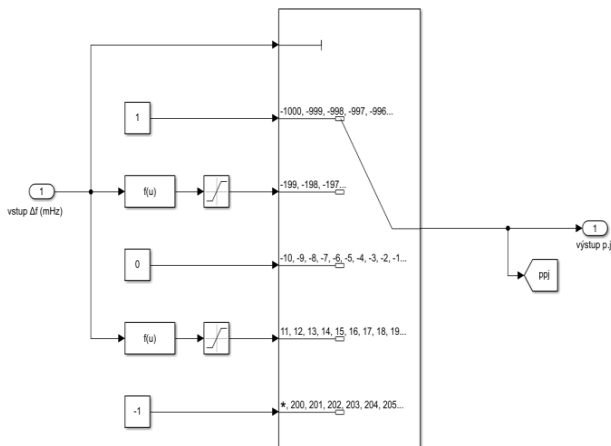


Obr. 18. Charakteristika závislosti regulačného výkonu PRV od odchýlky frekvencie od nominálnej hodnoty

Prevod rozdielu skutočnej frekvencie od nominálnej hodnoty frekvencie (Δf) na regulačný činný výkon spočíva v

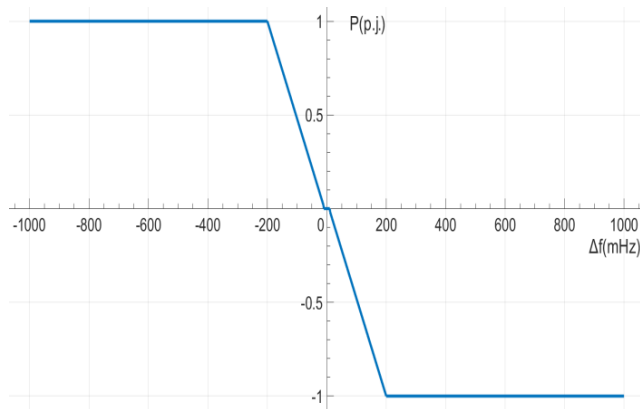
implementovaní charakteristiky závislosti regulačného výkonu PRV od odchýlky frekvencie od nominálnej hodnoty zobrazenom na Obr. 18.

Na Obr. 19 je možné na vstupe do bloku vidieť signál Δf v mHz. Ten vstupuje do funkčného bloku viacportového prepínača softvéru Simulinku. Viacportový prepúšťa vstup na základe Δf na výstup.



Obr. 19. Funkčný blok prevodu Δf na regulačný výkon v pomerných jednotkách

Na charakteristike závislosti regulačného výkonu PRV od odchýlky frekvencie od nominálnej hodnoty je možné vidieť že pri zápornej odchýlke frekvencie ($f_{skut} > 50,01\text{Hz}$ t.j. $\Delta f < -10\text{mHz}$) sa regulačný výkon zvyšuje po lineárnej krivke PRV – BESS odoberá elektrickú energiu (zvyšuje svoju úroveň nabitia). Pri kladnej odchýlke frekvencie ($f_{skut} < 49,99\text{Hz}$ t.j. $\Delta f > +10\text{mHz}$) sa regulačný výkon znižuje po lineárnej krivke PRV – BESS dodáva elektrickú energiu (znižuje svoju úroveň nabitia).



Obr. 20. Výstupná charakteristika závislosti regulačného výkonu PRV od odchýlky frekvencie od nominálnej hodnoty vytvoreného bloku v softvéri Matlab Simulink

Na Obr. 20 je možné vidieť implementovanú charakteristiku závislosti regulačného výkonu PRV od odchýlky frekvencie od nominálnej hodnoty vo vytvorenom

funkčnom bloku v softvéri Matlab Simulink. Na vstup do bloku bol posielaný skúšobný signál v rozsahu -1000mHz až 1000mHz s krokom 1mHz.

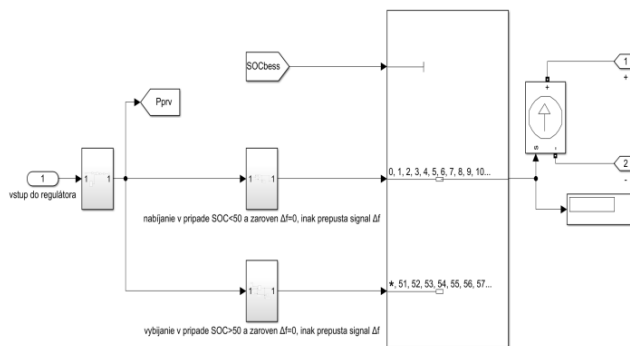
Regulátor slúži v modeli BESS na udržiavanie SOC na nami požadovanej úrovni. V súčasnosti existuje viacero možností udržiavania SOC:

- plánované (zvýšenie SOC v čase keď neposkytujú PRV),
- udržiavanie SOC (nabíjanie/vybíjanie v čase pásma necitlivosti),
- nabíjanie prispôbením pracovného bodu v prípade dosiahnutia určitej hodnoty SOC alebo pohyblivého príemeru,
- návrat SOC na požadovanú hodnotu v čase po plnej aktivácii rezervy PRV. [50][51][52]

V modeli je implementovaná stratégia udržiavania SOC v blízkosti hodnoty 50%. Nami navrhovaný algoritmus na začiatku zisťuje aktuálnu hodnotu SOC_{BESS} a skutočnú frekvenciu.

V nasledujúcom kroku zisťuje či je SOC v rozmedzí 0 až 50%. V pozitívnom prípade sleduje rozdiel f_{skut} od hodnoty nominálnej frekvencie. V prípade, že je v pásme necitlivosti a zároveň je splnená predchádzajúca podmienka (SOC_{BESS} je 0 až 50%) zvyšuje hodnotu SOC_{BESS} (nabíjanie). V prípade, že je odchýlka frekvencie mimo pásma necitlivosti je BESS vybíjaná/nabíjaná podľa charakteristiky PRV.

V negatívnom prípade (SOC_{BESS} je v intervale 50 až 100%) sleduje rozdiel f_{skut} od hodnoty nominálnej frekvencie. V prípade, že je v pásme necitlivosti a zároveň je splnená predchádzajúca podmienka (SOC_{BESS} je 50 až 100%) znižuje hodnotu SOC_{BESS} (vybíjanie). V prípade, že je odchýlka frekvencie mimo pásma necitlivosti je BESS vybíjaná/nabíjaná podľa charakteristiky PRV.

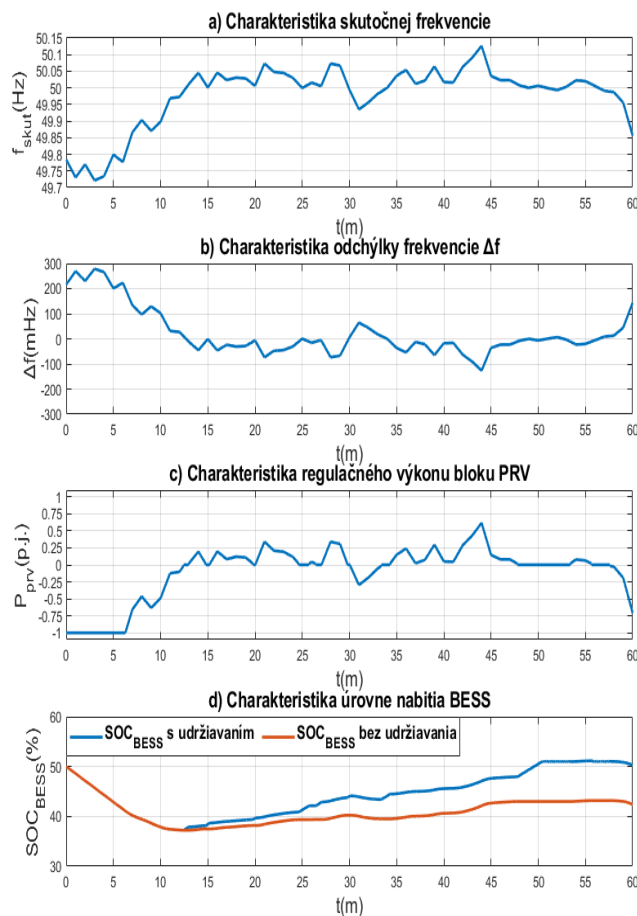


Obr. 21. Implementácia regulátora v prostredí Matlab Simulink

Na Obr. 21 je možné vidieť implementáciu algoritmu v prostredí softvéru Matlab Simulink. Na vstup bloku viacportového prepínača je privedený signál SOC_{BESS} na základe, ktorého sa prepína medzi dvoma rozsahmi SOC.

V prvom rozsahu 0 až 50%, prebieha nabíjanie BESS v pásme necitlivosti. V druhom rozsahu 50 až 100% prebieha vybíjanie BESS.

V prípade kedy je odchýlka mimo pásma necitlivosti, je BESS nabíjaná a vybíjaná podľa charakteristiky signálu vstupujúceho do regulátora z bloku prevodníku.



Obr. 22. Charakteristika a) skutočnej frekvencie, b) odchýlky frekvencie, c) regulačného výkonu bloku PRV, d) úrovne nabitia BESS (s udržiavaním a bez udržiavania SOC) za čas 60 min

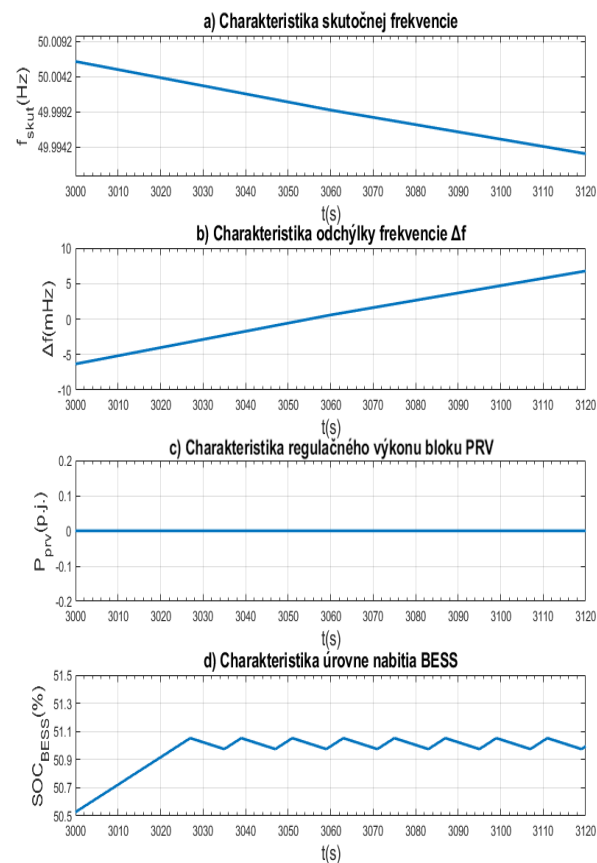
Na Obr. 22 je možné vidieť charakteristiku a) skutočnej frekvencie, b) odchýlky frekvencie, c) regulačného výkonu bloku PRV, d) úrovne nabitia BESS (s udržiavaním a bez udržiavania SOC) za čas 60m.

Na Obr. 22 d) Je možné pozorovať rozdiel v prípade kedy je implementovaný algoritmus udržiavania SOC na nami špecifikovanej hodnote a kedy je počas celého rozsahu BESS prevádzkovaná iba podľa charakteristiky PRV.

Na Obr. 23 je možné pozorovať činnosť regulačného algoritmu. V časovom intervale 3000 až 3120s:

- je skutočná frekvencia v rámci intervalu 50,009Hz až 49,5Hz,
- odchýlka frekvencie je v pásme necitlivosti,

- výkon z prevodníka je 0 p.j.,
- SOC sa udržiava v definovanej úrovni blízko hodnoty 50%.



Obr. 23. Charakteristika a) skutočnej frekvencie, b) odchýlky frekvencie, c) regulačného výkonu bloku PRV, d) úrovne nabitia BESS (s udržiavaním SOC) v časovom intervale 3000 až 3120s

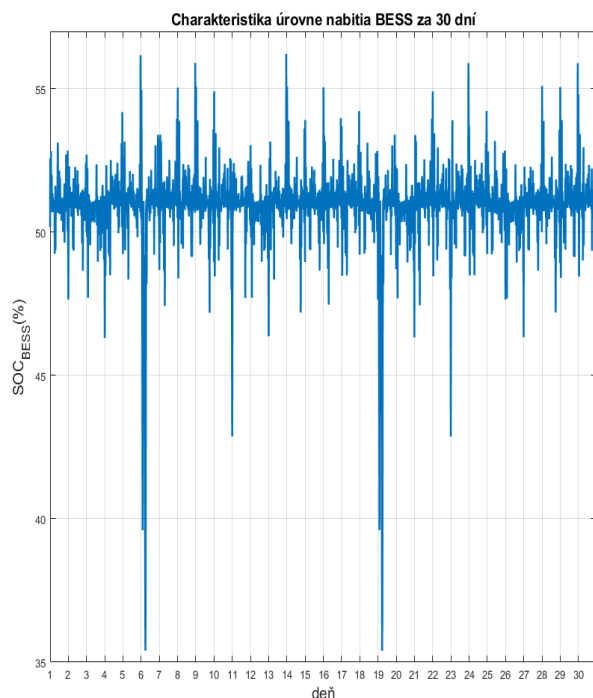
C. Simulácia využívania BESS na PRV za 30dní

Na Obr. 24 je možné vidieť charakteristiku úrovne nabitia BESS za 30 dní simulácie. Maximálna úroveň nabitia BESS za simulovaný mesiac bola na úrovni 56,208% naopak minimálna na úrovni 35,402%. Priemerná hodnota SOC za simulovaný mesiac bola na úrovni 50,937%.

Podľa Tab. V je možné uviesť, že odchýlka frekvencie počas celého mesiaca bola v rozmedzí pásma necitlivosti počas 302,662h čo predstavovalo 57,965% času, v tomto čase bola BESS udržiavaná v okolí 50% SOC. BESS bola nabíjaná PRV počas 196,180h čo predstavuje 27,247%. BESS bola vybíjaná PRV počas 221,158h čo predstavuje 30,716%. SOC bolo v rozmedzí 30 až 40% počas 1,925h, v rozmedzí 40-50% 30,315h a v rozmedzí 50-60% SOC 687,768h čo predstavuje 95,523% času z 30 dní simulácie.

TABUĽKA V. ČASOVÁ TABUĽKA POSKYTOVANIA PRV+,PRV- A PÁSMA NECITLIVOSTI ZA OBDOBIE 30 DNÍ

Intervaly Δf(mHz)	Čas (h)	Čas (%)
> 10	221,158	30,716
<-10	196,180	27,247
-10 < Δf < 10	302,662	57,965



Obr. 24. Charakteristika úrovne nabitia BESS za 30 dní

TABUĽKA VI. STRATA KAPACITY BESS ZA 30 DNÍ

Výchylka SOC	Dolný Limit (%)	Horný Limit (%)	Počet cyklov (-)	Strata kapacity (%)
<2%	0	2	44813	0,0265412
2~4%	2	4	107	0,0001644
4~6%	4	6	23	8,4436.10 ⁻⁶
6~8%	6	8	0	0

Na Tab. VI je možné vidieť stratu kapacity pri jednotlivých výchylkách úrovne nabitia za simulovaných 30 dní. Počet cyklov v rozmedzí 0 až 2% SOC bol na úrovni 44813, čo predstavovalo stratu kapacity 0,0265412%. Počet cyklov v rozmedzí 2 až 4% SOC bol na úrovni 107, čo predstavovalo 0,0001644% stratu kapacity. Počet cyklov v rozmedzí 4 až 6% SOC bol na úrovni 23, čo predstavovalo 8,4436.10⁻⁶ stratu kapacity Celková strata kapacity spôsobená cyklickým nabíjaním a vybíjaním bola za 30 dní na úrovni 0,026789918%. V prepočte na rok to predstavuje degradáciu 0,326% spôsobenú iba cyklovaním batérie.

D. Návravnosť projektu

Za celkovú cenu investície projektu nie je možné uvažovať iba cenu za samotné batérie. Do úvahy je potrebné zohľadniť v skupinách:

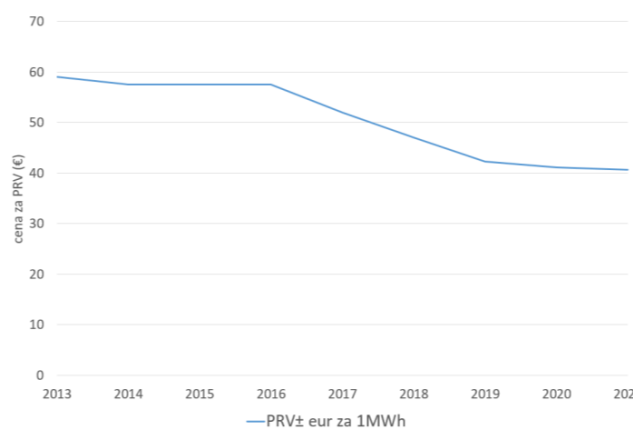
- 1) Projektovú dokumentáciu (vrátane dokumentácie pre stavebné povolenie, realizácie stavby a skutočného vyhotovenia).
- 2) Dodávku akumulátorov, systémov pre správu batérií, kontajnerov, transformátorov, rozvádzačov, protipožiarneho systému, skúšok a uvedenie do prevádzky.
- 3) Stavebnú časť.

Celková cena za 1MW/1MWh BESS (vychádza z reálnej cenovej ponuky):

Skupina	Cena (€) bez DPH
1	54000
2	1001000
3	78000
celkovo	1133000

Je možné skonštatovať že najvýznamnejšiu časť z celkovej investície tvorí práve 2. kategória.

Na Obr. 25 je možné vidieť trend v poklese cien za rezervu PRV za 1MWh určenú každoročne ÚRSO. Od roku 2013 klesla z 59€ na 40,61€ v roku 2021. Priemerný ročný pokles cien za 1MWh PRV je na úrovni 2,229€.



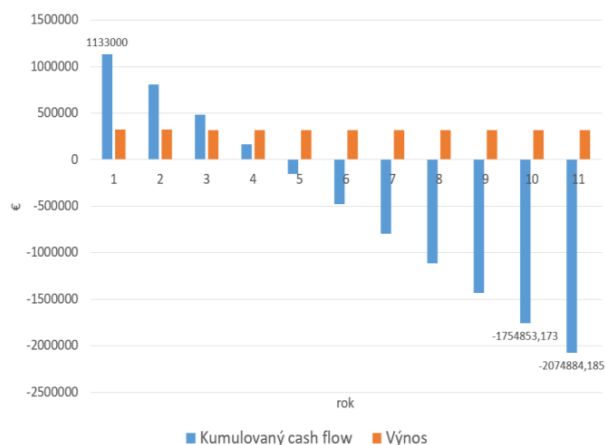
Obr. 25. Pokles cien za rezervu PRV [47]

Tento pokles je nutné zohľadniť v potenciálnych ročných príjmoch za poskytovanie PRV pomocou BESS. Tak isto je nutné zohľadniť aj priemernú ročnú infláciu stanovenú na základe údajov Štatistického úradu SR od 2013 po 2020 na 1,11%/rok.

V kalkulácii sú zohľadnené aj náklady na prevádzku a údržbu BESS na 30000€/rok. Celkový ročný príjem za poskytovanie PRV s 1MW/1MWh odhadujeme na 320719,354 € bez DPH (priemerná hodnota z výnosov za 11 rokov).

Na Obr. 26 je možné vidieť graf návratnosti projektu s uvažovaním predchádzajúcich predpokladov. Je možné vidieť splatenie počiatočnej investície 1133000 € po 4 rokoch poskytovania podpornej služby PRV. V 5 roku začína projekt prinášať zisk. Predpokladanú životnosť BESS je možné

odhadnúť nasledovne. Batéria zaznamená pokles kapacity na 80% zo svojej pôvodnej hodnoty pri vystavení 6000 plných nabíjajúcich cyklov (Zo 100% SOC na 0%, z 0 na 100% SOC). Pri uvažovaní 1,494 plného cyklu do dňa je možné životnosť stanoviť na 11 rokov. Eventuálne je teda možné na projekte získať v období 11 rokov 2074884,185 €.



Obr. 26. Návratnosť projektu

IX. VYUŽITIE KOMBINÁCIE BESS A OZE V OFF-GRID SYSTÉME

Cieľom je preskúmanie napájania komerčného subjektu z off-grid systému pozostávajúceho z OZE v spolupráci s BESS a zhodnotiť jeho možné prínosy.

A. Softvérové prostredie – HOMER pro

Softvér HOMER slúži na vytváranie optimálnych on-grid alebo off-grid modelov. Dokáže odsimulovať kombinačné varianty zvolených zariadení v simulovanom prípade s cieľom selekcie ich optimálnej kombinácie. V závislosti od nastavenia dokáže softvér simulovať tisícky možných riešení. [54]

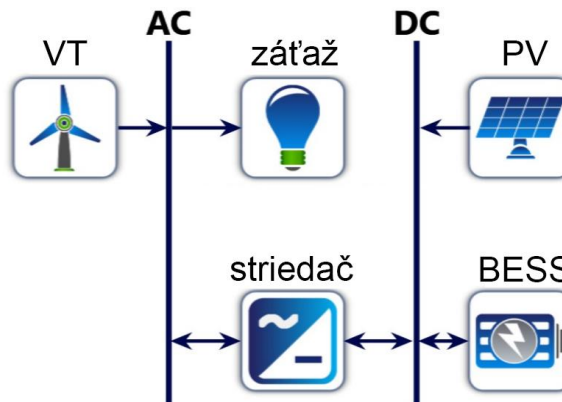
B. Popis modelu

Z knižníc softvéru HOMER pro boli vybrané komponenty z ktorých bol zložený model. Blokovú schému modelu je možné vidieť na Obr. 27. Cieľom modelu je energetická sebestačnosť komerčného objektu v lokalite Stankovce (48°45.8' severne, 21°39.3' východne) na východnom Slovensku.

Model sa skladá z nasledujúcich komponentov:

- AC zbernica,
- DC zbernica,
- Veterná elektrárňa,
- Fotovoltická elektrárňa,
- Striedač,
- BESS.

Úlohou HOMER pro je nájsť na základe vstupných blokov modelu optimálne riešenie off-grid systému. Počet a koncový výkon jednotlivých komponentov je stanovený softvérom po vykonaní optimalizačnej simulácie s ohľadom na čo najvýhodnejšiu ekonomiku projektu.



Obr. 27. Bloková schéma modelu využitia kombinácie BESS a OZE v off-grid systéme

C. Optimalizačná simulácia

Softvér dokázal z množstva možných kombinácií zvoliť tri realizovateľné scenáre, ktoré je možné vidieť na Obr. 28. Ako najvhodnejšie sa javí 1. riešenie. Na nájdenie optimálnej architektúry systému bol použitý kombinovaný algoritmus cyklického nabíjania a pokrývania záťaže. Cieľom daných algoritmov je maximalizovať využitie úložiska pri plnom pokrytí záťaže.

	PV (kW)	G10	1MLI	Converter (kW)
1	1,868	66	4	562
2	3,124		8	472
3		164	17	371

Obr. 28. Optimálne riešenie systému

Simulovaný bol jeden kalendárny rok. Časový krok simulácie bol z dôvodov výpočtového výkonu stanovený na 60min.

Možné riešenia:

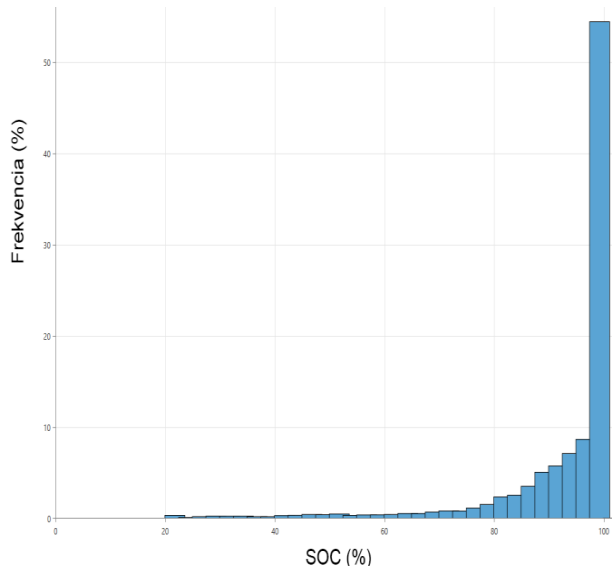
1. systém pozostáva z nami špecifikovanej kombinácie OZE a BESS.
2. V ponúkanom riešení absentujú veterné turbíny.
3. V ponúkanom riešení absentujú fotovoltické panely.

Na základe simulácie je možné skonštatovať, že:

- inštalovaný výkon fotovoltiky bol stanovený na úroveň 1868kWp,

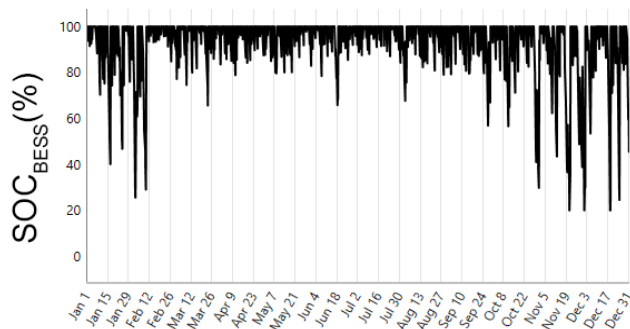
- v simulácii bolo použitých 66 turbín o celkovom inštalovanom výkone 660kW,
- výkon striedaču bol stanovený na 562kW.
- kapacita BESS bola stanovená na hodnotu 4MWh.

D. Využitie BESS v off-grid systéme



Obr. 29. Histogram úrovne nabitia BESS

Mínimálna hodnota SOC BESS bola za obdobie 365 dní na úrovni 20%. Maximálna úroveň SOC BESS bola na úrovni 100%. Priemerná hodnota SOC BESS 92,44%. Z histogramu úrovne nabitia BESS na Obr. 29 je možné skonštatovať, že úroveň nabitia BESS bola na úrovni 80% až 100% počas 89,22% roku. Počas 6,32% času z roku bola v intervale 60 až 80% SOC. V intervale 40 až 60% SOC bola počas 2,91% času. V intervale 20 až 40% bola počas 1,55% času.



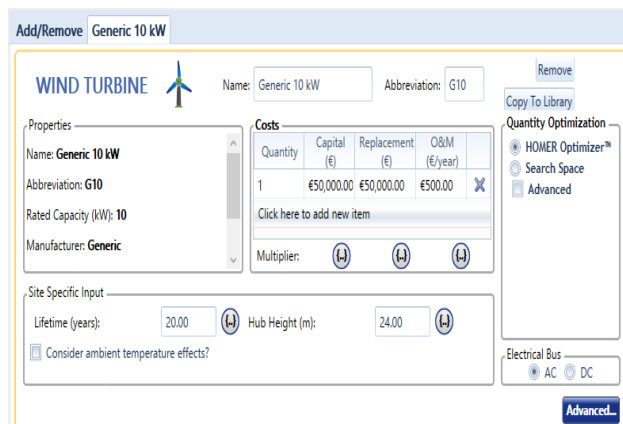
Obr. 30. Charakteristika úrovne nabitia BESS za kalendárny rok

E. Ekonomické zhodnotenie modelu

Použitý softvér dokáže na základe vstupných ekonomických parametrov jednotlivých komponentov zhodnotiť ekonomickú časť projektu. Charakteristický príklad ekonomických parametrov je možné vidieť na Obr. 31, kde v

sekcii „costs“ je možné dané parametre zadať. Vstupnými ekonomickými parametrami komponentov sú:

- Cena komponentu,
- Cena výmeny komponentu,
- Náklady na prevádzku.



Obr. 31. Zadávanie parametrov komponentu

V Tab. VII je možné vidieť čisté náklady na komponenty za dobu životnosti projektu (25 rokov). Tieto náklady predstavujú súčasnú hodnotu všetkých použitých komponentov mínus hodnotu výnosov za dobu životnosti projektu. Celková cena za projekt na jeho konci bude na úrovni 13605460€ (pozostáva z ceny komponentov, nákladov na prevádzku, ceny výmeny komponentov a zvyškovej hodnoty komponentov na konci životnosti projektu).

TABUĽKA VII. ČISTÉ NÁKLADY NA PROJEKT

Komponent	Cena komponentov (€)	Náklady na prevádzku (€)	Cena výmeny komponentu (€)	Zvyšková hodnota na konci životnosti projektu (€)	Celková cena (€)
Veterné turbíny	3300000	426608	1 050000	-592906	3133702
Fotovoltaické panely	4670000	241472	0	0	4911472
Striedač	168676	0	71565	-13469	226772
BESS	2800000	517101	1190000	-223587	4283514
Systém celkovo	10938676	1 185 181	2311565	-829962	13605460

Cena za 1kWh elektrickej energie v prípade variantu č.1 je na úrovni 1,19€ ($COE = \frac{\text{analizované náklady}}{\text{ročná spotreba el.energie}} (\text{€/kWh})$). V prípade pripojenia daného subjektu do distribučnej sústavy Východoslovenskej distribučnej, a.s. podľa súčasne platného cenníka [55] Východoslovenská energetika je za 1kWh možné uvažovať koncovú cenu 0,10€, čo predstavuje 8,4% z ceny za 1kWh OZE v projekte.

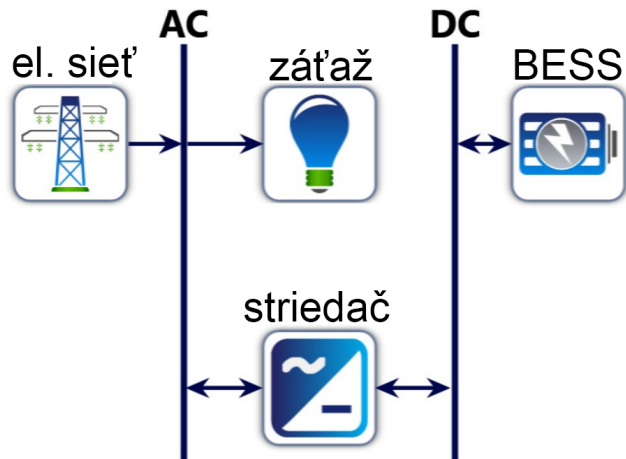
X. SIMULÁCIA VYUŽITIA BESS PRI VYHLADZOVANÍ ŠPIČIEK ZÁŤAŽE

Na simuláciu využitia BESS pri vyhladzovaní špičiek záťaže bol zvolený optimalizačný softvér HOMER pro. Cieľom bolo zostaviť model využívania BESS pri vyhladzovaní špičiek záťaže.

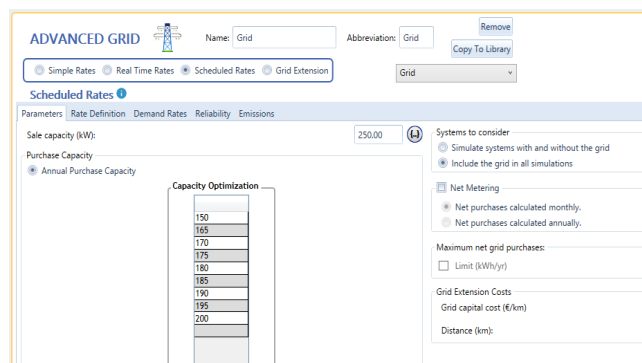
A. Popis modelu

Z knižnic softvéru HOMER pro boli vybrané komponenty, z ktorých bol zložený model. Blokóvú schému modelu je možné vidieť na Obr. 33.

Cieľom modelu je znížiť odber v špičkách záťaže komerčného objektu v lokalite Stankovce (48°45.8' severne, 21°39.3' východne) na východnom Slovensku.



Obr. 32. Blokóvú schému modelu využívania BESS pri vyhladzovaní špičiek záťaže



Obr. 33. Parametre elektrickej siete

Model sa skladá z nasledujúcich komponentov:

- AC zbernica,
- DC zbernica,
- Elektrická sieť,
- Striedač,
- BESS.

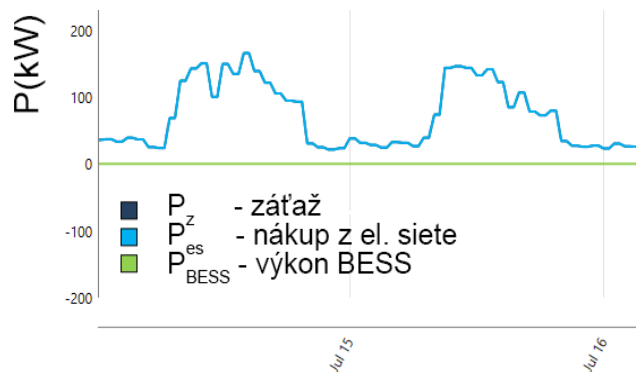
V modeli uvažujeme s pripojením k elektrickej sieti. Cieľom optimalizačnej simulácie je nájsť vhodnú kapacitu siete (maximálny možný odoberaný výkon zo siete) a kombináciu BESS na vyhladzovanie špičiek. V karte „parameters“ (pozri Obr. 33) je možné navoliť základné požiadavky na sieť.

TABULKA VIII. ŠPECIFIKÁCIA NAKONFIGUROVANÝCH TARÍF

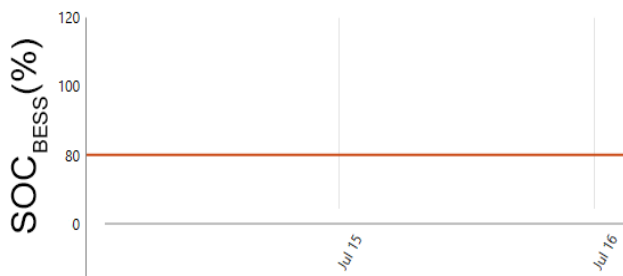
Tarifa č.	Čas od	Čas do	Nákupná cena (€)	Výkupná cena (€)
1	05:00	10:00	0,1	0,08
1	14:00	22:00	0,1	0,08
2	23:00	04:00	0,08	0,04
3	11:00	13:00	0,12	0,10

Ďalším parametrom, ktorý je možné nakonfigurovať je výber taríf, ten je možné nastaviť manuálne alebo importovať zo súboru. Parametre nakonfigurovaných taríf je možné vidieť v Tab. VIII V tarífach č. 1 a č.3 nie je nabíjanie BESS z elektrickej siete povolené.

B. Optimalizačná simulácia



Obr. 34. Výkonové toky v systéme v prípade špičkovej záťaže nižšej ako 200kW za 15. a 16. júla



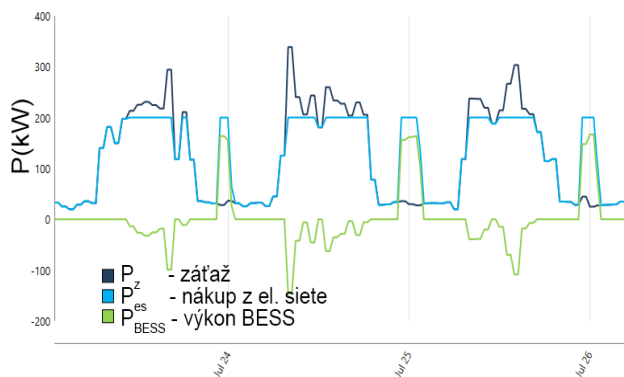
Obr. 35. SOC BESS za 15. a 16. júla

Z 266 možných kombinácií softvér vybral ako najvhodnejšiu iba jednu. Na nájdenie optimálnej architektúry systému bol

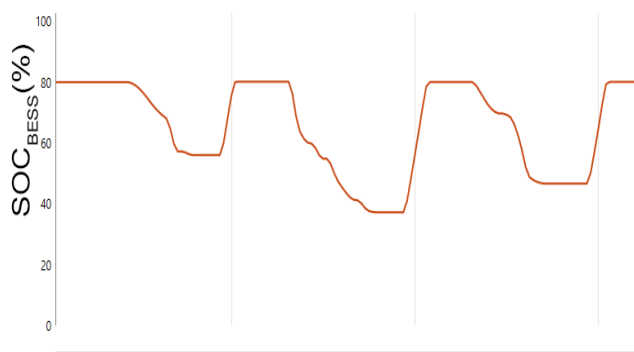
použitý algoritmus cyklického nabíjania a vybijania. Cieľom daného algoritmu je optimálne využívanie BESS.

Simulovaný bol jeden kalendárny rok. Časový krok simulácie bol z dôvodov výpočtového výkonu stanovený na 60 min. V danej konfigurácii bola softvérom stanovená kapacita elektrickej siete na 200kW a počet kusov BESS bol stanovený na 1.

Na Obr. 34 a Obr. 35 je možné vidieť výkonové toky a úroveň nabitia BESS za 15. a 16. júla. Je možné konštatovať že kapacita siete stačila na pokrytie daných dní. BESS nie je v dané dni využívaná.



Obr. 36. Výkonové toky v systéme v prípade špičkovej záťaže vyššej ako 200kW za 24. až 26. júla



Obr. 37. SOC BESS za 24. až 26. Júla

Na Obr. 36 a Obr. 37 je možné vidieť výkonové toky a úroveň nabitia BESS za 24. až 26. júla. Je možné konštatovať, že kapacita siete v daný časový nesačila na pokrytie záťaže. Dňa 24. júla je v čase 8:00 záťaž na úrovni 338,46kW, maximálna kapacita siete je 200kW výkonovú bilanciu pomáha zachovávať BES, ktorá dodáva zvyšnú hodnotu 147,75kW až do času. V daný deň BESS dorovnáva výkonovú bilanciu od 8:00 až do času 18:59, SOC BESS v danom intervale klesla z 80% na 37,28%. V čase 23:00 až do 1:48 bola BESS dobíjaná z elektrickej siete v tarife č. 2 až na úroveň 80%. V simulácii je nastavený rozsah využiteľnosti zásobníka na 80% až 10% z dôvodu zvýšenia životnosti batérií.

Podobný trend správania sa systému je možné pozorovať aj v ostatné dni časového intervalu 24. až 26. júla.

C. Ekonomické zhodnotenie modelu

Architecture				Cost			
BESS	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	
1	200	250	€3.43M	€0.300	€205,742	€775,000	

Obr. 38. Ekonomické zhrnutie simulácie

Na Obr. 38 je možné vidieť ekonomické zhodnotenie simulácie. V Tab. IX je možné vidieť čisté náklady na projekt a na jednotlivé komponenty systému za dobu životnosti projektu (25 rokov).

Komponent	Cena komponentov (€)	Náklady na prevádzku (€)	Cena výmeny komponentu (€)	Zvyšková hodnota na konci životnosti projektu (€)	Celková cena (€)
BESS	700000	129275	296992	-55897	1070370
Elektrická sieť	0	2260000	0	0	2260000
Striedač	75000	0	31821	-5989	100832
Systém celkovo	775000	2389275	328813	-61886	3431202

Tieto náklady predstavujú súčasnú hodnotu všetkých použitých komponentov mínus hodnotu výnosov za dobu životnosti projektu. Celková cena za projekt na jeho konci je 3431202€ (pozostáva z ceny komponentov, nákladov na prevádzku, ceny výmeny komponentov a zvyškovej hodnoty komponentov na konci životnosti projektu).

Cena za 1kWh elektrickej energie je v danom prípade na úrovni 0,3€ (pozri Obr. 38 položka $COE = \frac{\text{anualizované náklady}}{\text{ročná spotreba el.energie}} (\text{€/kWh})$).

Cenu za 1kWh elektrickej energie v prípade, že nie je uvažovaná cena ostatných komponentov je možné vyčíslieť na 0,196€.

TABUĽKA X. MNOŽSTVO ELEKTRICKEJ ENERGIE NAKÚPENEJ V JEDNOTLIVÝCH TARIFÁCH ZA 365DNÍ BEZ UVAŽOVANIA ZÁPORNEJ CENY V TARIFE Č. 2

Tarifa č.	Množstvo el. energie (kWh)	Cena (€)
1	592151	59215
2	117115	93692
3	184892	22187
Celkovo	894158	175094

V prípade, že by sa za odoberanú elektrickú energiu uvažovalo v čase tarify č.2 od 23:00 do 04:00, kedy bolo BESS povolené dobíjať, uvažovalo na miesto kladnej nákupnej ceny (pozri Tab. X), záporná nákupná cena (pozri Tab. XI). Za odoberanú elektrickú energiu zo siete by teda boli nadobúdané finančné prostriedky -0,08€ za kWh. Za rok nabíjania v danej tarife by sa celkovo nadobudlo 12290€, príjem za elektrickú

energiu by teda bol na úrovni 0,013€ za 1kWh celkovo. Je možné skonštatovať možný potenciál BESS pri odoberaní elektrickej energie v určitom čase dňa kedy by bola účtovaná nižšia, alebo záporná cena a jej spotrebovávanie, alebo predávanie v čase špičiek.

TABUĽKA XI. MNOŽSTVO ELEKTRICKEJ ENERGIE NAKÚPENEJ V JEDNOTLIVÝCH TARIFÁCH ZA 365DNÍ S UVAŽOVANÍM ZÁPORNEJ CENY V TARIFE Č. 2

Tarifa č.	Množstvo el. energie (kWh)	Cena (€)
1	592151	59215
2	117115	-93692
3	184892	22187
Celkovo	894158	-12290

XI. ZÁVER

Podiel obnoviteľných zdrojov elektrickej energie bude v nasledujúcich rokoch rásť nie len v ostatných častiach Európskej únie, ale aj na území Slovenskej republiky. Základným problémom ich používania spočíva v nepredvídateľnej výrobe elektrickej energie z nich. Jedným z možných riešení je akumulácia elektrickej energie s cieľom jej neskoršieho využitia v čase potreby.

Tento článok podrobne spracováva problematiku obnoviteľných zdrojov elektrickej energie v spolupráci s batériovými systémami.

V článku je popísaný model primárnej regulácie činného výkonu poskytovaného pomocou batériového systému. Model je realizovaný v softvérovom prostredí Matlab Simulink. Uvažovaný výkon batériového systému bol 1MW a kapacita 1MWh. V modeli bol navrhnutý a implementovaný prevodník rozdielu skutočnej frekvencie od hodnoty nominálnej frekvencie na činný výkon. Ďalšou dôležitou časťou modelu bol návrh a implementácia algoritmu udržiavania úrovne nabitia batériového systému v blízkosti hodnoty 50%. Nami navrhnutý algoritmus na začiatku zisťuje úroveň nabitia batériového systému a skutočnú hodnotu frekvencie. V nasledujúcom kroku zisťuje, či je úroveň nabitia v rozmedzí 0 až 50%. V pozitívnom prípade sleduje rozdiel skutočnej hodnoty frekvencie od jej nominálnej hodnoty. V prípade, že sa daný rozdiel nachádza v pásme necitlivosti a zároveň je naplnená podmienka úrovne nabitia v rozmedzí 0 až 50% zvyšuje úroveň nabitia BESS. V prípade, že je odchýlka frekvencie mimo pásmo necitlivosti nabíja, alebo vybíja batériový systém podľa charakteristiky primárnej regulácie. V negatívnom prípade, kedy je úroveň nabitia v intervale 50 až 100% sleduje rozdiel skutočnej hodnoty frekvencie od jej nominálnej hodnoty. V prípade, že sa odchýlka nachádza v pásme necitlivosti a zároveň je splnená podmienka o intervale 50 až 100% úrovne nabitia, tak znižuje hodnotu úrovne batériového systému. V prípade, že je odchýlka frekvencie mimo pásma necitlivosti nabíja alebo vybíja batériový systém podľa charakteristiky primárnej regulácie.

Bola zrealizovaná simulácia primárnej regulácie činného výkonu s využitím batériového systému. Kde simulovaný

scenár spočíval v poskytovaní PRV pomocou BESS za obdobie 30 dní s implementovaným algoritmom na udržiavanie SOC v okolí 50% v pásme necitlivosti. Strata kapacity zapríčinená teplotou a kalendárnym starnutím nebola v simulácii uvažovaná.

Vstupnými údajmi v simulácii boli skutočná hodnota frekvencie úroveň nabitia batériového systému a nominálna hodnota frekvencia. Výstupnými údajmi v simulácii boli počiatočná úroveň nabitia batériového systému, odchýlka frekvencie a výstupný regulačný výkon.

Simulovaný bol jeden kalendárny mesiac (30dní). Maximálna úroveň nabitia batériového systému za simulovaný mesiac bola na úrovni 56,208% a minimálna na úrovni 35,402%. Čo predstavovalo predpokladaný výsledok s ohľadom na implementovaný algoritmus udržiavania úrovne nabitia a dĺžku odchýlky frekvencie v pásme necitlivosti, ktorá sa za daný mesiac vyskytovala 57,965% času. Batériový systém bol nabíjaný z primárnej regulácie počas 27,247% času daného mesiaca a vybíjaný počas 30,716% času. Za kalendárny mesiac batéria prekonala 44813 mikrocyclov v rozmedzí výchylky úrovne nabitia 0 až 2%, 107 mikrocyclov v rozmedzí výchylky 2 až 4% a 23 mikrocyclov v rozmedzí výchylky 4 až 6%. Predpokladaná strata kapacity cyklickým nabíjaním a vybíjaním batérie za daný mesiac bola na úrovni 0,0267% čo v prepočte na 365 dní môžeme vyjadriť ako 0,326%.

Zhodnotená bola aj návratnosť projektu. Predpokladaná investícia projektu vrátane projektovej dokumentácie a stavebnej časti bola na úrovni 1,13 mil. €. Celkovo projekt splatil počiatočnú investíciu po 4 rokoch. V piatom roku začal projekt prinášať zisk. Za predpokladanú dobu životnosti batériového systému sme odhadli dobu 11 rokov. Eventuálne projekt dokázal získať v období 11 rokov 2,07 mil. €.

Ako simulačný softvér sme zvolili softvér, pri skúmaní využitia batériového systému v off-grid systéme sme zvolili HOMER pro, ktorý svojou bohatou knižnicou obnoviteľných zdrojov a batériových systémov predstavoval dostatočný nástroj na preskúmanie využiteľnosti batériového systému v danom prípade.

Model pozostával z obnoviteľných zdrojov (veternej a fotovoltaickej elektrárne), striedaču a batériového systému. Úlohou bolo zabezpečiť energetickú sebestačnosť komerčného objektu v lokalite Stankovce na východnom Slovensku. Vstupným údajom v simulácii bol profil záťaže daného subjektu, ktorý bol umelo vygenerovaný v softvéri HOMER pro. Špička záťaže bola na úrovni 406,02kW a priemerná denná spotreba elektrickej energie bola na úrovni 2424,25kWh. Úlohou softvéru bolo nájsť vhodnú kombináciu komponentov na zabezpečenie nárokov na pokrytie elektrickej energie daného subjektu. Z 849 simulačných variantov softvér vybral 3 realizovateľné. Ako najvhodnejší sa javil nasledujúci systém:

- Výkon fotovoltaickej elektrárne 1868kWp,
- Výkon veternej elektrárne 660kW,
- Výkon striedaču 562kW,
- Kapacita batériového systému 4MWh.

Daná kombinácia komponentov zabezpečila pokrytie spotreby elektrickej energie subjektu. Simulovaný bol jeden kalendárny rok (365dní), počas ktorého bola minimálna hodnota úrovne nabitia batériového systému na úrovni 20% a maximálna na úrovni 100%. Priemerná hodnota úrovne nabitia batériového systému bola na úrovni 92,44%. Úroveň nabitia batériového systému bola na úrovni 80% až 100% počas 89,22% roku. Počas 6,32% času z roku bola v intervale 60 až 80% úrovne nabitia. V intervale úrovne nabitia 40 až 60% bola počas 2,91% času. V intervale úrovne nabitia 20 až 40% bola počas 1,55% času. Použitie batériového systému v danom prípade bolo esenciálne, keďže iba použitím obnoviteľných zdrojov by nebolo možné dosiahnuť pokrytie spotreby elektrickej energie subjektu najmä v nočných hodinách a v dni kedy nebolo dostatok dopadajúceho slnečného žiarenia.

Celková cena komponentov na konci životnosti projektu (25rokov) bola na úrovni 13,6 mil. €. Daný systém teda vyrábala 1kWh elektrickej energie za cenu 1,19€. Čo sa javí ako príliš vysoká cena v porovnaní ak by daný subjekt odoberal elektrickú energiu z distribučnej sústavy v cene 0,1€ za 1kWh. Celkovo je teda možné skonštatovať ekonomickú neefektívnosť daného projektu. Za plus však môžeme pokladať zníženie uhlíkovej stopy daného subjektu pri využívaní obnoviteľných zdrojov v spolupráci s batériovým systémom.

V ďalšej časti článku sme skúmali využitie batériového systému pri vyhladzovaní špičiek záťaže. Podobne ako v predchádzajúcom prípade, cieľom bolo zabezpečiť pokrytie spotreby elektrickej energie komerčného subjektu v lokalite Stankovce na východnom Slovensku. Simulovaný bol jeden kalendárny rok (365dní). Uvažovaný systém pozostával z elektrickej siete, striedaču a batériového systému. Cieľom simulácie bolo nájsť vhodnú kombináciu batériového systému a striedaču. Výsledkom optimalizačnej simulácie bolo alokovanie maximálneho výkonu odoberaného zo siete na hodnotu 200kW. Výkon striedaču bol stanovený na 250kW. Kapacita batériového systému bola stanovená na úroveň 1MWh. Výsledkom simulácie bolo stanovenie celkovej ceny systému (nákladov). Na konci životnosti projektu bolo možné vyčísliť túto sumu na 3,4 mil. €. Cena za 1kWh takéhoto systému bola na úrovni 0,3€. V prípade neuvažovania ostatných komponentov bola celková cena elektrickej energie za 1kWh na úrovni 0,196€. V prípade, že by sa za odoberanú elektrickú energiu uvažovalo v čase tarify č.2 od 23:00 do 04:00, kedy bolo batériový systém povolené dobíjať, uvažovalo na miesto kladnej nákupnej ceny, záporná nákupná cena. Za odoberanú elektrickú energiu zo siete by teda boli nadobúdané finančné prostriedky -0,08€ za kWh. Za rok nabíjania v danej tarife by sa celkovo nadobudlo 12290€, príjem za elektrickú energiu by teda bol na úrovni 0,013€ za 1kWh celkovo. Je teda možné skonštatovať možný potenciál batériových pri odoberaní elektrickej energie v určitom čase dňa, kedy by bola účtovaná nižšia, alebo záporná cena a jej spotrebovávanie, alebo predávanie v čase špičiek.

V súčasnosti sa batériové systémy z ekonomického hľadiska najviac hodia na využívanie pokrývania podporných služieb z dôvodu nízkej vyťaženia pri ich poskytovaní (cyklickému nabíjaniu a vybíjaniu). Na území Slovenskej republiky je podľa technických podmienok PPS platných od začiatku roku 2021 možné využívať batériové systémy pri

primárnej regulácii činného výkonu. Podľa výsledkov prezentovaných v tomto článku, je možné skonštatovať, že nasadenie batériových systémov má najväčší ekonomický zmysel práve pri primárnej regulácii činného výkonu.

Využitie v kombinácii s obnoviteľnými zdrojmi ako sme preukázali v kapitole 9 nedáva z ekonomického hľadiska zmysel avšak je potrebné zohľadniť aj environmentálne hľadisko výsledkom, ktorého by bolo zníženie emisií skleníkových plynov používaním práve takýchto systémov. Ďalším odôvodneným využitím off-grid systému je napájanie zariadení (telekomunikačných, meteorologických, ...) v teréne bez možnosti napájania z distribučnej siete.

Využívanie batériových systémov pri vyhladzovaní špičiek a novej arbitráži, na ktoré sme poukázali v je ďalším z možných racionálnych prípadov nasadenia batériových systémov v elektroenergetike.

O AUTOROCH

Jakub URBANSKÝ narodený v roku 1991. V roku 2017 absolvoval vysokoškolské štúdium na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. V súčasnosti je Ph.D. študent na Katedre elektroenergetiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Jeho výskum je zameraný najmä na oblasť akumulácie elektrickej energie.



Lubomír BEŇA narodený v roku 1975. V roku 1998 absolvoval vysokoškolské štúdium na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Kandidátsku dizertačnú prácu obhájil v roku 2002. V súčasnosti pôsobí ako docent na Katedre elektroenergetiky FEI TU v Košiciach.



REFERENCES

- [1] Organizácia spojených národov, "Paris agreement," UN. New York, pp. 1-27, 2015.
- [2] Európska komisia, "Smernica európskeho parlamentu a rady podpore využívania energie z obnoviteľných zdrojov (prepracované znenie)," Európska komisia. Brusel, pp. 1-119, 2017.
- [3] Európska rada, "Výsledky zo zasadnutia európskej rady," Európska rada. Brusel, 2019.
- [4] M. Kolcun, V. Griger: "Riadenie prevádzky elektrizačnej sústavy," Mercury -Smékal, Košice, 2003, 288 pages, ISBN 80-89061-57-5.
- [5] V. Quasching: "Understanding Renewable Energy Systems," Earthscan, London, 2005, 192 pages, ISBN 1-84407-128-6.
- [6] R. Rybár, D. Kudelas: "Energetické zdroje – klasifikácia a výklad pojmov v súvislostiach," in Acta Montanistica Slovaca, 2007, vol. 12, pp.269-273
- [7] P. Mastný, J. Drápela, S. Mišák, J. Macháček, M. Ptáček et al.: "Obnoviteľné zdroje energie," ČVUT, Praha, 2011, 257 pages, ISBN 978-80-01-04937-2
- [8] Ch. Gatzen: "The Economics of Power Storage," Oldenbourg Industrieverlag, München, 2008, 227 pages, ISBN 978-3-8356-3138-0
- [9] S. Amrouche, D. Rekioua, T. Rekioua: "Overview of Energy Storage in Renewable energy Systems," in International Journal of Hydrogen Energy, Issue 41, 2016 ISSN 0360-3199, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.243
- [10] J. Urbanský: "Možnosti napojenia elektromobilov na inteligentný dom," Diplomová práca, Košice, 2017
- [11] Linden D., Reddy T.: "Handbook of batteries 3rd. edition," McGraw-Hill professional, 2001 ISBN 0-07-135978-8
- [12] IEEE Smart Grid Battery Storage Working: "White Paper - Battery Storage Systems," draft
- [13] Energetické centrum Bratislava. "OBNOVITEĽNÉ ZDROJE ENERGIE (OZE)," Bratislava, 2019
- [14] ENTSO-E: "Winter Outlook 2018-2019 data for publication," Brusel, 2019.
- [15] SEPS a.s.: "Individuálna a konsolidovaná výročná správa 2015," Bratislava: SEPS a.s., 2016.
- [16] SEPS a.s.: "Individuálna a konsolidovaná výročná správa 2016," [online]. Bratislava: SEPS a.s., 2017.
- [17] SEPS a.s.: "Individuálna a konsolidovaná výročná správa 2017," Bratislava: SEPS a.s., 2018.
- [18] SEPS a.s.: "Individuálna a konsolidovaná výročná správa 2018," Bratislava: SEPS a.s., 2019.
- [19] SEPS a.s.: "Individuálna a konsolidovaná výročná správa 2019," Bratislava: SEPS a.s., 2020.
- [20] International Energy Agency: "Energy Policies of IEA Countries: Slovak Republic 2018 Review," Paris, 2018.
- [21] J Melichár.: "Slovensko prestáva byť múzeom obnoviteľných zdrojov energie," Euractiv.sk, 2019.
- [22] Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky: "Tlačová správa: MHSR spúšťa historicky prvú aukciu na výrobu zelenej energie," Bratislava: MH SR, 2020
- [23] Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky: "Tlačová správa: Aukcia na podporu výroby zelenej energie je pre koronakrízu zrušená," Bratislava: MH SR 2020.
- [24] Eurostat: "Share of renewable energy in gross final energy consumption," Brusel, 2020.
- [25] HUVILINNA, J. Huvilinna: "Value of Battery Storage at Ancillary Service Markets," Espoo: Aalto University, 2015.
- [26] ABB: "Battery Energy Storage Systems: Energy storage inverter (ESI) offering," Zürich, ABB: 2016
- [27] ABB: "ABB launches flexible plug and play microgrid solution to boost use of renewables," Zürich, ABB, 2016.
- [28] Enel: "New energy: storage is key," Rím: Enel S.p.A., 2018
- [29] Samsung SDI: "Energy Storage System: From kWh to MWh," Južná Kórea: SAMSUNG SDI CO.,LTD., 2018
- [30] F. Gattigilo: "L'impatto degli accumuli sul sistema elettrico e sulla E-mobility," Eurobat, Poland, 2017
- [31] Energy Storage Assotiation: "Spinning reserve," Washington DC, Energy storage association, 2013.
- [32] M. Koller et al.: "Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system," In : Electric Power Systems Research. 2015, 120, 128-135. ISSN 0378-7796
- [33] Alfen Elkamo Oy Ab: "First FCR energy storage in Belgium for Engie," Finsko, 2017.
- [34] U.S. Department of Energy: "DOE Global Energy Storage Database," Washington D.C., USA : U.S. DoE, 17.11.2020.
- [35] N. Mahdavi Tabatabaei et al. "Reactive Power Control in AC Power Systems," Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-51118-4
- [36] Y.P. Gusev, P.V Subbotin: "Using Battery Energy Storage Systems for Load Balancing and Reactive Power Compensation in Distribution Grids," In: 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Ruská federácia : IEEE, 2019. s1-5. doi:10.1109/icieam.2019.8742909
- [37] G. Hanieh : "Power Factor Controlwitha Battery Energy Storage System (BESS)"
- [38] Adelaide, Austrália : "Energy storage case study power factor control with BESS," Austrália, 2018.
- [39] W. Wang et al. "Active and reactive power coordinated control strategy of battery energy storage system in active distribution network," In 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC) [online]. [s.l.]: IEEE, 2017. http://dx.doi.org/10.1109/YAC.2017.7967453
- [40] Aeterna Energy: "What is peak shaving with battery storage." Kalifornia, USA: Aeterna Energy, 2019.
- [41] T.H. Mehr et al. : "Grid-connected Lithium-ion battery energy storage system for load leveling and peak shaving," In : Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Hobart, TAS, 2013, s. 1-6. ISBN:978-1-86295-913-2.
- [42] A. A. Akhil et al.: "DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA," Kalifornia: Sandia National Laboratories, 2015.
- [43] European Association for Storage of Energy, "Emergency Black Start Capability: GE's Energy Storage Battery System," Brusel, European Association for Storage of Energy, 2018.
- [44] Slovenská elektrizačná a prenosová sústava a.s., "Platné Technické podmienky prístupu a pripojenia, pravidlá prevádzkovania prenosovej sústavy - Dokument B," Bratislava, 2021.
- [45] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví (ÚRSO), "Rozhodnutie číslo: 0100/2021/E," Bratislava, 2020.
- [46] Slovenská elektrizačná a prenosová sústava a.s., "Stratégia zabezpečenia dostatočného objemu podporných služieb pre poskytovanie systémových služieb a bezpečnej a spoľahlivej prevádzky ES SR pre rok 2022," Bratislava, 2019.
- [47] Slovenská elektrizačná a prenosová sústava a.s., "Cenové rozhodnutia ÚRSO: Vybrané rozhodnutia ÚRSO 2013 – 2021," Bratislava, 2021
- [48] Slovenská elektrizačná a prenosová sústava a.s., "Platné Technické podmienky prístupu a pripojenia, pravidlá prevádzkovania prenosovej sústavy - Dokument N," Bratislava, 2021.
- [49] Európska Komisia, "Nariadenie komisie Európskej únie 2016/631," Brusel, 2016.
- [50] A. Oudalov, D. Chartouni, CH. Ohler, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control," In IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. 2007, no. 3, 1259-1266s. ISSN 0885-8950.
- [51] G. Rancilio et al., "Grid-Scale BESS for Ancillary Services Provision: SoC Restoration Strategies," In MDPI Applied Sciences. 2020, vol.10 issue 12, 4121, 1-18s. ISSN 2076-3417
- [52] T. Košický, L. Beňa, M. Kolcun ml., "Analýza využiteľnosti systémov akumulácie energie pre frekvenčnú reguláciu," In Elektroenergetika. Ročník 7, číslo 2, 28-32s. ISSN 1337-6756
- [53] T. Košický, "Využitie FACTS zariadení s možnosťou akumulácie elektrickej energie v elektrizačnej sústave," TUKE, Košice, 2015.
- [54] UL LLC, "HOMER pro: Products," Illinois USA, UL LLC, 2021.
- [55] VSE a.s., "Cenník elektriny pre malé podniky na rok 2021," Košice, VSE a.s., 2021

Modely a metódy analýzy dát na tvorbu znalostných modelov z dátových zdrojov

Ludmila Puzstová

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Letná 9, Košice, Slovensko
ludmila.puzstova.2@tuke.sk

František Babič

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Letná 9, Košice, Slovensko
frantisek.babic@tuke.sk

Ján Paralič

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Letná 9, Košice, Slovensko
jan.paralic@tuke.sk

Abstrakt—Príspevok sa zaoberá analýzou súčasného stavu v oblasti systémov na podporu rozhodovania, prípadového usudzovania a dolovania v dátach so zameraním na ich využitie v procese medicínskej diagnostiky. Kombináciou prípadového usudzovania a systému na podporu rozhodovania je lekárovi umožnené lepšie pochopenie znalostí a následné rozhodnutie o výslednej diagnóze pacienta. V rámci skúmanej oblasti bol identifikovaný najzávažnejší problém, a to semi-automatizácia aktualizácia rozhodovacích modelov na základe vstupov od experta bez potreby opätovného generovania týchto modelov. Navrhli sme vlastný mechanizmus adaptácie v procese prípadového usudzovania, ktorý podporuje adaptáciu pravidiel a implementovali sme ho do vlastného systému. Experimentálne sme otestovali tento systém na medicínskych vzorkách pacientov s možným výskytom srdcových chorôb. Využitím tohto systému môže lekár získať odporúčanú výslednú diagnózu pre nového pacienta podľa určitého pravidla. Navrhovanú diagnózu môže následne lekár zvážiť dvoma spôsobmi: použiť navrhovanú diagnostickú cestu alebo upraviť existujúce pravidlá na základe skutočných podmienok.

Kľúčové slová—adapácia pravidiel; dolovania v dátach; medicínska diagnostika; prípadové usudzovanie; systémy na podporu rozhodovania

Abstract—The paper deals with the analysis of the current state of Decision Support Systems, Case-Based Reasoning, and data mining focused on their use in the process of medical diagnostics. The combination of Case-Based reasoning and Decision Support Systems allows the physician to understand the knowledge better and make a subsequent decision on the patient's final diagnosis. By researching this area, we have identified the most serious problem: the semi-automatic updating of decision models based on input from an expert without regenerating them. Therefore, we designed own adaptation mechanism in Case-Based reasoning process, which supports the adaptation of rules, and implemented it into our system. We experimentally tested this system on four different medical samples of patients. Using this system, the doctor can obtain the selected patient's recommended final diagnosis according to a certain rule. The physician can then consider the physician's proposed diagnosis in two ways: to use the proposed diagnostic route or modify the existing rules based on the actual conditions.

Keywords—rules adaptation; data mining; medical diagnostics; Case-Based Reasoning; Decision Support Systems

I. ÚVOD

Hlavným cieľom tohto článku je popis vytvoreného mechanizmu adaptácie v procese prípadového usudzovania ako aj implementácia tohto mechanizmu v systéme na podporu rozhodovania, ktorého základ budú tvoriť medicínske data. Cieľom tejto podpory je zvýšenie presnosti procesu diagnostiky vybraných ochorení, výber správneho spôsobu liečby a taktiež aj identifikácia užitočných a na prvý pohľad skrytých znalostí. Tradičné podporné rozhodovacie modely využívajú pravidlá extrahované z týchto dát a tie sa následne využívajú na vyhodnotenie nových prípadov. Problém však nastáva, ak nový prípad nespĺňa ani jedno z existujúcich pravidiel. V tejto situácii je nutné opätovné vygenerovanie všetkých pravidiel na základe rozšírenej dátovej vzorky. V prípade klinickej praxe, tento prístup nie je ideálny, nakoľko noví alebo rovnakí pacienti v rôznych zdravotných stavoch prichádzajú každý deň. Tento problém je možné čiastočne riešiť pomocou metódy prípadového usudzovania, ktoré využíva znalosti a riešenia použité pri minulých prípadoch na základe podobnosti. Samotné prípadové usudzovanie simuluje ľudské myslenie, kde sa predchádzajúce riešenia aplikované na historické podobné problémy využívajú na riešenie nových problémov. Aj v tejto oblasti však experti identifikovali viacero výskumných problémov. V oblasti medicíny je veľkou výzvou fáza adaptácie pravidiel, ktorej sa viacero využívaných systémov prípadového usudzovania vyhýba.

Informačné technológie sa čoraz viac aplikujú do nemocníc s cieľom reagovať na potreby lekárov pri každodenných rozhodovacích činnostiach. Samotné nemocnice sú dnes schopné generovať a zhromažďovať veľké množstvo údajov. Heterogenita a objem týchto dát si vyžaduje nové spôsoby a prístupy, ako ich spracovať a analyzovať. Pomocou vhodných techník dolovania v dátach je možné získať zaujímavé a užitočné vedomosti, ktoré sa následne môžu využívať na zlepšenie kvality poskytovanej zdravotnej starostlivosti, zlepšenie diagnostiky ochorení a samotných liečebných postupov. Pre lekára nie je vždy jednoduché pri diagnostike alebo určení správneho liečebného postupu zohľadniť veľký objem dát. Môže teda dochádzať k nedostatočnému alebo chybnému rozhodnutiu, čo je veľmi znepokojujúce ak sa jedná o životy ľudí. Stanovenie správnej diagnózy ochorenia alebo stavu sa teda spolieha na dostupnosť všetkých potrebných

informácií. Množstvo symptómov je premenlivých v závislosti od osoby, mnohé diagnostické testy sú drahé a nepravidelné, a často nedávajú správnu odpoveď. Lekári často veria počiatočnému diagnostickému dojmu, hoci ďalšie informácie tento predpoklad nemusia podporiť. Vzhľadom na narastajúcu rozmanitosť liečebných postupov a liekov, rýchlosť zhromažďovania údajov, dostupnosť diagnostických testov a rozdiely v názoroch lekárov, je pomoc v podobe počítačovej podpory nevyhnutná.

V tejto publikácii sa prvotne venujeme vymedzeniu základných riešených oblastí ako sú systémy na podporu rozhodovania, prípadové usudzovanie a dolovanie v dátach. Následne je popísaný návrh vlastného mechanizmu adaptácie pravidiel v procese prípadového usudzovania ako aj jeho implementácia v nami vytvorenom systéme na podporu rozhodovania. Záverečná kapitola sa venuje experimentálnemu overeniu mechanizmu adaptácie na medicínskych vzorkách popisujúcich pacientov s možným výskytom srdcovej choroby.

II. VYMEDZENIE ZÁKLADNÝCH OBLASTÍ

A. Systémy na podporu rozhodovania

Systémy na podporu rozhodovania (Decision Support Systems DSS) sú označované ako interaktívne a flexibilné počítačové systémy, ktoré napomáhajú subjektom rozhodovať sa a riešiť rôzne typy problémov v rozhodovacích procesoch. Podľa kolektívu autorov [1] sa DSS tradične používa na modelovanie ľudského uvažovania a rozhodovacieho procesu. Z tohto dôvodu je schopný prijímať fakty od používateľov, spracovať ich a navrhnúť riešenia, ktoré sú blízke riešeniam experta v danej oblasti. DSS teda môžu byť výrazne užitočné pri podpore hodnotení rôznych rozhodnutí, a systematicky transparentne tak zvolit' najsilnejšie a nákladovo efektívnejšie odpovede. Podľa zdrojov [2] a [3] sa od iných predtým zavedených systémov DSS odlišujú hlavne tým, že uľahčujú a podporujú presnosť, včasnosť, kvalitu a celkovú účinnosť konkrétneho rozhodnutia; sú určené na interaktívne použitie pre používateľov; podporujú používateľov na akejkolvek úrovni organizácie; výstupné informácie z DSS slúžia pre budúce udalosti s cieľom znižovať riziká; umožňujú používateľom prístup k údajom z rôznych zdrojov súčasne atď. Existuje množstvo kritérií, podľa ktorých sú DSS systémy systematizované, avšak medzi najrozšírenejšie rozelenie patrí kritérium spôsobu podpory [4]. Podľa tohto kritéria sa rozlišujú DSS založené na komunikácii, DSS založené na dokumentoch, DSS založené na údajoch, DSS založené na modeloch a DSS založené na znalostiach. Pre účely tejto práce boli relevantným práve posledný typ DSS, ktorý je najviac podobný *expertným systémom*.

Expertné systémy (ES) sú jedným z prvých príkladov užitočného výstupu umelej inteligencie (UI). Rozsiahle expertné systémy sú vybudované iteratívnym spôsobom prostredníctvom opakovaných rozhovorov medzi jedným alebo viacerými doménovými odborníkmi a znalostným inžinierom. ES sú navrhnuté tak, aby napodobňovali inteligenciu a funkcie experta pri rýchlej a presnej kvalite rozhodnutia v danej aplikačnej oblasti. Napriek tomu, že sa vyznačujú množstvom výhod (znovu použiteľnosť, konzistentnosť, dostupnosť k znalostiam, automatizácia a rýchlosť) [5] majú však aj výrazné

nevýhody voči ľudským odborníkom a to hlavne ohľadom *integrity údajov*. Keďže ES je potrebné aktualizovať ručne, samotný expertný systém sa nedokáže učiť sám. Integrita údajov je teda jednou z hlavných nevýhod používania ES. Systém musí byť manuálne aktualizovaný programátorom alebo iným odborníkom v danej oblasti. Taktiež sa nevýhody týkajú aj získavania znalostí pri uplatňovaní ES v nových doménach, nakoľko je potrebné množstvo času na získanie potrebných poznatkov. Ďalej je to aj jeho špecifickosť - ES sú všeobecne vyvinuté pre špecifickú doménu, zatiaľ čo odborný personál môže byť špecializovaný na viac ako len jednu oblasť. V neposlednom rade sem patrí aj jeho chybovosť - ES môžu vykonať aj zlé rozhodnutia, keďže prechádzajú len vopred danými a naprogramovanými pravidlami alebo predpismi. Naprogramovanie riešení pre úplne nový druh problému je veľmi náročné.

Medzi hlavné komponenty, ktoré tvoria architektúru ES patrí *znalostná báza* (ukladá všetky relevantné informácie, údaje, pravidlá, prípady a vzťahy používané ES); *báza dát* (uchováva symbolickú reprezentáciu konkrétnych faktorov súvisiacich s pravé riešeným problémom); *používateľské rozhranie* (component zodpovedný za komunikáciu medzi používateľom systému a samotným systémom); *inferenčný mechanizmus* (tvorí jadro expertného systému, ktorý je zodpovedný za všetky úlohy). Medzi ďalšie komponenty patrí - *používateľ systému*, *znalostný inžinier* (zabezpečuje komunikáciu s expertom za účelom získania odborných znalostí), *expert*, *editor znalostnej bázy*, *komponent získavania poznatkov* (zabezpečuje získanie vedomostí o konkrétnej doméne z nejakého zdroja) a medzi prídavné komponenty patrí - *komunikačný model* (zabezpečuje interakciu medzi používateľom a ES, a umožňuje zobrazovať výsledky používateľovi), *vysvetľovací modul* (vysvetľuje a zdôvodňuje stav a priebeh riešenia problému) a *generator výsledkov* (zostavuje čiastkové výsledky do odôvodneného celku bez nadbytočných informácií).

Expertné systémy patria medzi najpoužívanější typ DSS v oblasti medicíny. Ich hlavnou úlohou je pomáhať lekárom pri každodenných rozhodovacích procesoch ako napríklad pri diagnostikovaní jednej alebo viacerých chorôb, navrhnutí vhodnej liečby, diagnostike absolútnej absencie niektorého z ochorení alebo hľadani príčin ich vzniku [6]. Staršie systémy boli navrhnuté iba na zvládnutie jedného problému, napríklad na riešenie srdcových porúch, avšak súčasné systémy už pokrývajú širokú škálu problémov v medicínskej oblasti [7]. Prvé medicínske expertné systémy vznikali už od roku 1960 [6][8][9] a postupným vylepšovaním sa vyvíjajú dodnes.

Medzi typických predstaviteľov týchto systémov v medicínskej oblasti patrí **DENDRAL** [10] - medicínsky expertný systém, ktorý bol v roku 1960 vytvorený ako projekt umelej inteligencie. Jeho hlavnou úlohou bolo pomôcť chemikom pri identifikácii neznámych organických molekúl analýzou ich spektier s využitím poznatkov z chémie. Považuje sa za prvý expertný systém, nakoľko automatizoval proces rozhodovania a riešenia problémov. Z tohto expertného systému bolo odvodených aj niekoľko iných ako napríklad **MYCIN**, **MOLGEN**, **PROSPECTOR**, **XCON** a **STEAMER**. **MYCÍN** [9] - ES, ktorého hlavnou úlohou bola pomoc lekárom

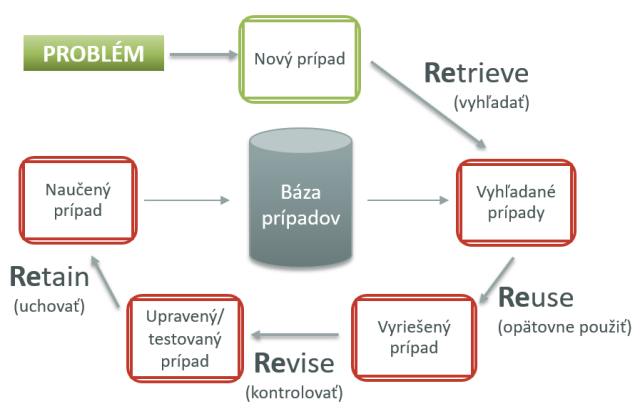
pri identifikácii baktérií spôsobujúcich závažné infekčné choroby a odporučiť liečbu antibiotikami s dávkou upravenou podľa telesnej hmotnosti pacienta (názov MYCÍN odvodený od antibiotík s príponu „- mycín“). **MOLGEN** [11] - najznámejší ES v oblasti genetiky, ktorý poskytuje poradcu v oblasti inteligencie molekulárnemu genetikovi pri navrhovaní experimentov, vrátane liečby DNA. **INTERNIS-1** [12] - vzdelávací projekt vyvinutý na univerzite v Pittsburghu na začiatku roka 1970. Cieľom tohto systému bolo poskytnutie pomoci zdravotníckym pracovníkom pri diagnostike chorôb v rámci všeobecného interného lekárstva. Databáza týchto systémov popisovala 570 chorôb v oblasti interného lekárstva. **HDP (Heart Disease Program)** [13] je rozsiahly medicínsky expertný systém vyvinutý na liečbu srdcových ochorení. Lekárovi umožňoval zadávať informácie o histórii, fyzickom vyšetrení a laboratórnych vyšetreniach pacienta a následne generovať podrobné vysvetlenie diferenciálnych diagnóz označujúcich klinické údaje, ktoré podporujú každú diagnózu srdcového ochorenia. **PUFF (Pulmonary Function System)** [14] - expertný systém, ktorý diagnostikuje výsledky testu pľúcnej funkcie (PF), ako je objem pľúc, schopnosť pacienta presunúť vzduch do a z pľúc a taktiež aj schopnosť pľúc dostať kyslík do krvi a do oxidu uhličitého. Výsledkom je súbor interpretovaných vyhlásení a diagnóz pacienta. Systém využíva spätné reťazenie pravidiel a využíva bázu znalostí pozostávajúcu z približne 400 pravidiel. Medzi ďalšie expertné systémy patrí napríklad **ONCOCIN** (zameraný na liečbu pacientov s chemoterapiou), **SPE** (zameraný na diagnostiku stavu pri zápalových procesoch) alebo **TRAUMA Advisor**, ktorého je hlavnou úlohou pomáhať klinickým pracovníkom vo vidieckych oblastiach pri diagnostike a liečbe traumatických pacientov s poranením hlavy. Informácie o ďalších medicínskych expertných systémoch sú predstavené v štúdií [15].

B. Prípadové usudzovanie

Prípadové usudzovanie (Case-Based Reasoning CBR) sa podľa histórie vývoja radí medzi jeden zo štyroch hlavných typov klinický systémov na podporu rozhodovania (CDSS). Za posledné desaťročia sa CBR stalo veľmi populárnym v oblasti zdravotníctva. Zaraduje sa medzi oblasť výskumu strojového učenia, ktorý sa vo všeobecnosti zameriava hlavne na pamäť, s cieľom učiť ľudí nové zručnosti alebo vytvárať hypotézy o nových situáciách na základe minulých skúseností. Tento proces zahŕňa prispôbenie použitých riešení na splnenie nových požiadaviek a použitie starých prípadov na vysvetlenie nových riešení. V terminológii CBR sa prípadom myslí zvyčajne nejaká problémová situácia, ktorú je potrebné vyriešiť. Metodika CBR na seba pritiahla veľkú pozornosť, pretože základná myšlienka opätovného využitia skúseností pri riešení predchádzajúcich problémov napodobňuje proces ľudského myslenia. Spoliehať sa na predchádzajúce skúsenosti je intuitívny a bežne používaný spôsob riešenia problémov. Využitím predchádzajúcim skúseností je často možné odvodiť riešenie nedávno zisteného problému [16]. CBR usudzovanie je prírastkového charakteru [17]. To znamená, že vždy keď sa problém vyrieši, nová skúsenosť sa zachová a je okamžite sprístupnená pre budúce použitie riešenia problémov. Vo všeobecnosti, CBR pozostáva z dvoch hlavných úloh:

1. vyhľadanie a výber najpodobnejšieho prípadu zo znalostnej bázy. Je dôležité, aby sa jednotlivé prípady porovnávali s cieľom nájsť tie prípady, ktoré sú novému najviac podobné.
2. prispôbenie riešenia. To predstavuje aplikovanie riešenia predchádzajúcich podobných prípadov tak, aby zodpovedali súčasnému prípadu a ich následné uloženie do bázy prípadov. Ak neexistujú významné rozdiely medzi novým a podobným prípadom, postačí jednoduchý prenos riešenia. Často je potrebných len niekoľko substitúcií, ale niekedy je adaptácia veľmi komplikovaný proces

Na správne pochopenie fungovania metódy prípadového usudzovania boli v literatúra navrhnuté rôzne modely, ako napríklad Huntov model, Allenov model, model od autorov Kolodner a Leake [18] a model R4, ktorý navrhli Aamodt a Plaza [19]. **Model R4** patrí medzi najpoužívanejšie a nachádza sa na najvyššej úrovni všeobecnosti. Proces zahrňujúci tento model môže byť reprezentovaný schematickým cyklom obsahujúcim „štyri RE“ ako je znázornené na obrázku 1.



Obr. 1. Cyklus metódy CBR podľa Aamodt a Plaza

Fáza RETRIEVE - vyhľadanie a načítanie najpodobnejších prípadov. Podľa autorov [20] a [21] táto fáza patrí medzi najdôležitejšie, nakoľko vytvára základ pre správny chod system. Prvotne v tomto kroku dochádza k definovaniu nového problému a končí sa nájdením najpodobnejšieho prípadu/prípadov k aktuálne riešenému prípadu. Na samotný proces vyhľadávania sa najčastejšie používajú metriky vzdialenosti ako napr. Euklidovská, Manhattanská, Hammingova a Levenshteinova vzdialenosť a taktiež aj techniky založené na princípe k-najbližších susedov, induktívne prístupy, znalostné prístupy alebo validované vyhľadávanie.

Fázy REUSE - opätovné použitie navrhovaného riešenia. V tejto fáze dochádza k návrhu riešenia nového prípadu opätovným použitím informácií a poznatkov z najpodobnejšieho prípadu alebo viacerých najpodobnejších prípadov. Fáza končí riešením nového prípadu, ktoré sa posúva na jeho kontrolu. Táto fáza môže vyžadovať aj adaptáciu riešenia za účelom lepšieho prispôbenia sa

aktuálne situácií. V takom to prípade je nutné zvážiť spôsob adaptácie, napríklad vymazanie sekundárneho komponentu. Tento krok je považovaný za ten najkomplikovanejší z celého cyklu, nakoľko existuje viacero spôsobov prístupu k adaptácii riešenia. Vo fáze opätovného použitia boli dosiahnuté pokroky v závislosti od účelu systému, t.j. diagnostikovanie, klasifikácia, učenie a plánovanie. Pokiaľ ide o diagnostiku a klasifikáciu, väčšina systémov sa opiera o metódy adaptácie, ktoré spočívajú v kopírovaní riešenia najpodobnejšieho prípadu alebo ich kombinácie, t.j. opätovného použitia riešenia [22].

Fáza REVISE - kontrola navrhovaného riešenia. V tejto fáze dochádza ku kontrole správnosti navrhovaného riešenia. Kontrola môže prebiehať vo forme kvalifikácie správnosti výsledku alebo vo forme revidovaného prípadu expertom. Potvrdené riešenie je vstupom pre ďalšiu fázu cyklu. V mnohých praktických aplikáciách je často ťažké rozlíšiť krok REUSE a REVISE. V dôsledku toho ich mnohí výskumní pracovníci spájajú do jednej fázy zvanej ADAPT (adaptácia-prispôsobenie) [21].

Fáza RETAIN - uchovanie (uloženie) naučeného prípadu pre budúce využitie. Táto fáza je fázou učenia sa systému, ktoré prebieha pridaním nového prípadu do bázy prípadov. Mnoho systémov uchováva len riešenie predchádzajúceho problému, zatiaľ čo niektoré systémy ukládajú aj riešenie nového prípadu. Uchovaný nový prípad je však hneď k dispozícii pre riešenie ďalších problémov. Tento proces zachovania môže viesť k nekontrolovanému rastu bázy prípadov, čo spôsobuje zhoršenie výkonu systému z hľadiska rýchlosti, ako to spomínajú aj autori v práci [23].

1) Prípadové usudzovanie a medicínska diagnostika

Pri používaní CBR systémov v medicíne existujú určité obmedzenia pri ich plynulom používaní.

V lekárskej oblasti je počet podobných prípadov často extrémne vysoký [24]. Kládne sa dôraz na úložisko prípadov, kde na jednej strane je výhodné mať množstvo prípadov v báze, avšak na strane druhej, je potrebné väčšie množstvo času na nájdenie podobných prípadov. CBR systémy majú taktiež problémy so spracovaním zašumených údajov. Tento problém následne spôsobuje neefektívne ukladanie a vyhľadávanie prípadov. Podľa autorov Smiti a Elouedi [25], úspech CBR závisí práve od kvality prípadov v báze a rýchlosti procesu vyhľadávania.

Z vyššie vymenovaných krokov cyklu CBR, patrí fáza adaptácie k najkritickejším obmedzením pri plynulom používaní a implementácii CBR systémov v medicínskej oblasti. Podľa autorov D'Aquin a kol. [26] je adaptácia pomerne náročný proces hlavne, pretože sa musí zaoberať veľkým nedostatkom relevantných informácií o pacientovi. Adaptácia je teda náročná otázka, pretože tradične je vykonávaná expertmi v danej oblasti. Autori Schmidt a kol. [27] poukazujú, že zavedenie kroku adaptácie v systéme CBR bolo veľmi náročným krokom v oblasti medicíny. Doposiaľ sa však nevytvorili žiadne všeobecné modely na adaptáciu, pretože do veľkej miery závisia od charakteristiky domény a

ich aplikácie. Navyše, väčšina systémov CBR, ktoré neuplatňujú adaptáciu, nedokážu vyriešiť niektoré nové problémy a ich presnosť je v kritických oblastiach nepresvedčivá [16]. Výskyt systémov v lekárskej oblasti, ktoré uplatňujú úplnú metódu CBR (retrieve, reuse, revise, retain), je zatiaľ len veľmi nízky. V praktických aplikáciách je krok adaptácie buď vynechaný a riešenie najpodobnejšieho prípadu je aplikované na nový problém bez akýchkoľvek úprav alebo je adaptácia ponechaná na koncového používateľa.

Problém fázy adaptácie sa snažilo riešiť už množstvo autorov. Autor Choudhury [24] uvádza, že medicínske CBR systémy riešia problém adaptácie dvoma spôsobmi – aplikujú len fázu vyhľadávania v CBR cycle alebo riešia adaptačnú úlohu pomocou teórie domén založenej na pravidlách, ktorá bola aplikovaná aj v medicínskom expertnom systéme CASEY [28]. Prvá verzia systému KASIMIR [26] využívala na riešenie problému adaptácie formalizmus, druhá už používala znalostné jazyky pri procese prispôsobenie sa, avšak aj v tomto prípade bol krok adaptácie nevyhnutný. Niektoré z novších systémov úspešne vykonávali adaptáciu pomocou výpočtových techník, napr. eXiT * CBR.v2 [29] revidoval a opätovne používal prípady pomocou genetických algoritmov; EquiVox vyvinutý Henrietom a kol. [30] uskutočňoval adaptáciu pomocou umelých neurónových sietí. V štúdiách [16] a [17] sa autori problém adaptácie rozhodli riešiť vytvorením CBR systému, ktorý integroval CBR (prípadové) a RBR (pravidlové) usudzovanie. Vytvárali teda tzv. hybridný CBR pre lekárske diagnostické systémy, ktorý automaticky uplatňoval proces adaptácie s využitím adaptačných pravidiel. Hybridný adaptačný model navrhli aj autori Salem a El Bagoury [31], ktorý kombinoval transformačné a hierarchické adaptačné techniky s umelými neurónovými sieťami a istými faktormi pre diagnózu rakoviny štítnej žľazy. Zubi a Saad [32] použili kombinované techniky dolovania v dátach s neurónovými sieťami pre včasnú diagnostiku rakoviny pľúc. Pre diagnózu rakoviny prsníka používali Keles, Keles a Yavuz [33] neuro-fuzzy pravidlá, zatiaľ čo Sharaf-el-Deen a kol. [16] predstavili hybridný prístup, ktorý kombinoval taktiež CBR a RBR usudzovanie.

C. Dolovanie v dátach

Dolovanie v dátach (ang. Data mining DM) predstavuje aplikáciu inteligentných metód pre extrahovanie platných vzorov a pravidiel z veľkého množstva dát. Patrí medzi kľúčový krok procesu objavovania znalostí (ang. Knowledge Discovery in Databases), v ktorom však ešte nehovoríme o znalostiach. Tie vznikajú až výberom z vygenerovaných vzorov a ich aplikáciou vo vybranej úlohe. Techniky DM sa štandardne delia na *popisné* (orientujú sa na popis a charakteristiku skúmaných dát), *prediktívne* (orientujú sa na predpovedia výskytu hodnôt cieľového atribútu) a *preskriptívne úlohy* (orientujú sa na rozhodovanie a optimalizáciu.). Medzi *popisné úlohy* patria techniky ako zhlukovanie a asociačné pravidlá; medzi *prediktívne úlohy* patria rozhodovacie stormy, bayesovské siete, naivný bayesovský klasifikátor, k- najbližších susedov, medóta podporných vektorov, umelé neurónove siete ale aj rôzne formy regresie; medzi *preskriptívne úlohy* patria napríklad

optimalizačné metódy, simulácie, multikriteriálne rozhodovanie, matematické modelovanie, atď.

V oblasti medicíny sa DM uplatňuje primárne pri diagnostike, personalizovanej liečbe, objavovaní liekov, výskume klinických štúdií, rádiológií a rádioterapií, inteligentných elektronických zdravotných záznamov a iných zaujímavých oblastiach, kde je aplikácia DM veľmi nápomocná.

V oblasti medicíny je možné využiť akúkoľvek techniku DM vzhľadom na typ riešenej úlohy [34]. Medzi najviac používanú však patria *rozhodovacie stromy*, ktoré boli použité aj pri vytváraní našich experimentov.

Rozhodovacie stromy predstavujú najpoužívanejší spôsob riešenia klasifikačných úloh, ktorých výsledky sú jednoducho interpretovateľné a pochopiteľné. Je to predovšetkým ich grafickou podobou, keďže ponúkajú prehľadnú formu zobrazenia výsledkov. Následne je možná jednoduchá interpretácia, ktorá umožní používateľom rýchlo a ľahko vyhodnotiť získané výsledky. Rozhodovacie stromy v podstate vytvárajú grafické znázornenie vzťahov, ktoré je možné jednoducho transformovať na množinu pravidiel, pričom jeden listový uzol stromu predstavuje jedno pravidlo. Na generovanie rozhodovacích stromov boli vyvinuté rôzne algoritmy, pričom medzi najpoužívanejšie patria algoritmy *C4.5* (dokáže pracovať s chýbajúcimi hodnotami, používa orezávanie tromu, vie pracovať s numerickými atribútmi, kritériom vetvenia je pomerový informačný zisk), *C5.0* (vylepšený algoritmus C4.5, lepšie pracuje s pamäťou, dokáže pracovať s diskretnými a spojitémi hodnotami, kritériom vetvenia je informačný zisk a entropia), *cTree* (používa sa na rekurzívne rozdelenie binárných údajov) a *rpart* (založený na rekurzívnom rozdelení množiny údajov). Export pravidiel využitím algoritmu *rpart* je veľmi populárny, nakoľko poskytuje možnosť *zobrazenia vygenerovaných pravidiel* (*rpart.plot*), *vygenerovania zoznamu všetkých pravidiel* (*rpart.rules*) a *zoznamu podpravidel* (*rpart.subrules*) aj *v podobe tabuliek*, ktoré boli použité aj v tejto práci.

III. MECHANIZMUS ADAPTÁCIE PRAVIDIEL IMPLEMENTOVANÝ V SYSTÉME NA PODPORU ROZHODOVANIA

Ako bolo spomenuté v úvode, našim hlavným cieľom bolo pomôcť tradičnému CBR prístupu s vyriešením problému fázy adaptácie. Navrhli sme teda poloautomatické prispôbenie existujúcej bázy prípadov podľa nových pacientov alebo znalostí experta. Najväčšou motiváciou bolo upustenie od nutnosti opätovného generovania rozhodovacích modelov pomocou algoritmov strojového učenia. Následne sme integrovali tento inovatívny CBR prístup k jednoduchému CDSS a experimentálne sme ho otestovali prostredníctvom dostupných lekárskeho vzoriek. Implementácia prebieha v dvoch krokoch a bola realizovaná v programovacom jazyku R ako interaktívna webová aplikácia. Návrh mechanizmu adaptácie pravidiel prebiehal vo viacerých iteráciách, pričom jeho finálna verzia a podrobný popis bol publikovaný v článku [35].

Predpokladom pre začatie cyklu v tomto prístupe je zoznam rozhodovacích pravidiel vytvorených pomocou algoritmov rozhodovacieho stromu. Pravidlá sú uložené v báze prípadov

vo forme AK podmienka TAK dôsledok. Uložené historické prípady už majú hodnotu cieľového atribútu (trpí/netrpí daným ochorením). Samotný cyklus začína krokom RETRIEVE ako reakcia na nový prípad (zadaný používateľom) bez hodnoty cieľového atribútu. Nový prípad je následne porovnaný s existujúcimi historickými prípadmi uloženými v báze prípadov pomocou inferenčného mechanizmu (IM). Výsledkom porovnania je zoznam relevantných pacientov s percentom podobnosti a hodnotou skóre.

Ak IM nájde *rovnaký (totožný) prípad* so 100% podobnosťou ku novému prípadu, nový pacient bude klasifikovaný do rovnakej hodnoty cieľového atribútu.

AK IM *nenájde žiadnu zhodu* s novým prípadom (0 % podobnosť), t.j. všetky existujúce prípady uložené v báze prípadov sa výrazne líšia od nového prípadu, je potrebný zásah experta, ktorý klasifikuje nový prípad.

Poslednou možnosťou je vyhľadanie *čiastočne podobné prípady* z bázy prípadov s rôznymi hodnotami cieľového atribútu. V tomto prípade môže expert zohľadniť príslušné podpravidlá a prispôbiť ich podľa nových podmienok. To znamená, že expert môže prispôbiť typický interval hodnôt pre daný factor v súlade s konkrétnou skupinou pacientov

Implementácia tohto mechanizmu do systému na podporu rozhodovania bola rozdelená na dva moduly. Hlavnou úlohou modulu 1 bolo generovanie rozhodovacích pravidiel za použitia vhodných algoritmov strojového učenia. Výsledkom tohto modulu bolo nájdenie najsúspešnejšieho modelu z pohľadu presnosti a kvality vygenerovaných pravidiel. Vstupy do tohto modulu zadáva znalostný inžinier, ktorý ma okrem možnosti tvorby modelov aj možnosť prvotného zoznámia sa s dostupnými dátami pomocou rôznych frafov a tabuliek. Modul 2 už predstavuje samotný systém na podporu rozhodovania, ktorý využíva mechanizmus adaptácie CBR metódy. V tomto module sa už používa najsúspešnejší model z modulu 1 a znalostná báza je naplnená súborom podpravidel tohto modelu.

V nasledujúcej časti uvádzame najdôležitejšie funkcie, ktoré samotný systém ponúka. Funkcia *vygenerovania pravidiel* bez ktorej by nebolo možné pokračovať na nasledujúce kroky tohto systému. Obr.2 reprezentuje jednotlivé podpravidlá zapísané formou tabuľky.

	Subrule	Variable	Value	Less	Greater
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	L1	restwma	0		
2	L2	age		66.5	
3	L3	basedp		9585	
4	L4	basebp	131		131
5	L5	pkhr	107.5		107.5
6	L6	hxofHT	0		
7	L7	posECG	0		
8	L8	pkhr	120.5		120.5
9	L9	equivecg	0		
10	L10	dobEF	52.5		52.5

Obr. 2. Vygenerované podpravidlá vo forme tabuľky

Tabuľka je tvorená 5 stĺpcami, pričom každý riadok reprezentuje jedno podpravidlo. 1.stĺpec určuje označenie samotného podpravidla podľa toho, či ide o ľavú vetvu stromu

(L-left) alebo pravú vetvu stromu (R-right). 2.stĺpec obsahuje názov atribútu, ktorého sa týka podpravidlo. Ďalšie 3 stĺpce už popisujú interval hodnôt atribútu konkrétneho podpravidla. Každý atribút môže mať hodnotu rovnú, menšiu alebo väčšiu, ako je hodnota v danom riadku a stĺpci. Ak sa v jednom riadku vyskytuje hodnota vo viacerých stĺpcoch popisujúcich interval (rovné a menšie alebo rovné a väčšie), jedná sa o konjunkciu týchto intervalov. Samotné pravidlo rozhodovacieho stromu je tak tvorené konjunkciou podpravidiel. Napríklad, prvé pravidlo je tvorené podpravidlami L1 a L2. Tieto vygenerované podpravidlá sa v systéme používajú na určenie pokrytia nového prípadu ako aj historických prípadov uložených v databáze.

Funkcia *zápisu nového prípadu* zabezpečí zadanie nového pacienta do systému, ktorého chce používateľ klasifikovať. Na zápis nového prípadu musí používateľ zadať postupne všetky hodnoty dostupných atribútov nového prípadu. Systém pracuje aj s chýbajúcimi hodnotami, to znamená, že nový prípad nemusí mať zapísanú hodnotu každého atribútu. Nový prípad v systéme predstavuje jeden riadok tabuľky pozostávajúci z konkrétnych hodnôt atribútov oddelených tabulátorom.

Funkcia *vyhľadania podobných prípadov*. Po tom, ako systém určí pokrytie nového prípadu a historických prípadov uložených v databáze, dochádza k porovnaniu medzi novým a historickými prípadmi. Ich porovnanie sa určuje na základe výpočtu *podobnosti a hodnoty skóre* (Obr.3). *Podobnosť* môže mať hodnotu od 0 po 100 podľa toho, na koľko % sa pokrytie historického prípadu a nového prípadu zhoduje. Hodnota skóre určuje minimálny počet operácií, ktoré je potrebné vykonať, aby konjunkcia podpravidiel historického prípadu a nového prípadu bola totožná. Týmito operáciami môže byť vloženie podpravidla, odstránenie podpravidla alebo substitúcia podpravidiel. Napríklad, ak sa skóre rovná hodnote 4, môže to predstavovať operáciu vloženie=1, vymazanie=1 a substitúcia=2 alebo aj vloženie=2, vymazanie=1 a substitúcia=1 atď.

Subrules	podobnosť	skóre	vloženie	vymazanie	substitúcia
All	A			f	A
R1,R6,L10,R11	75	4	2	2	0
R1,R6,L10,R11	75	4	2	2	0
R1,R6,L10,R11	75	4	2	2	0
R1,R6,L10,R11	75	4	2	2	0
R1,R6,R10	66.67	3	1	2	0
R1,R6,R10	66.67	3	1	2	0
R1,R6,R10	66.67	3	1	2	0

Obr. 3. Výpočet podobnosti a hodnoty skóre medzi novým a historickými prípadmi

S touto funkciou úzko súvisí aj funkcia *určenia podobnosti* medzi historickými prípadmi a novým prípadom, ktorú môže systém vyhodnotiť 3 možnými alternatívami:

- systém nájde *totožný historický prípad* s novým prípadom (podobnosť je rovná 100% a hodnota skóre rovná 0);

- systém nájde *veľmi odlišných historické prípady* k novému prípadu (podobnosť je rovná 0%);
- systém nájde *čiastočne podobné prípady* (podobnosť je väčšia ako 0% a zároveň menšia ako 100%).

Na základe stanovenia konkrétnej alternatívy, systém odporučí používateľa na ktorú časť systému (kartu) sa má presunúť. Každá z týchto alternatív má určenú svoju nasledujúcu kartu systému, v ktorej sú funkcie prispôbené na danú podobnosť.

Pokiaľ sa jedná o totožnú podobnosť medzi historickým a novým prípadom, systém poskytne zobrazenie totožných prípadov pričom používateľ vie jednoducho klasifikovať nový prípad podľa klasifikácie totožných prípadov

Pokiaľ sa jedná o veľmi odlišnú podobnosť medzi historickým a novým prípadom, systém poskytne používateľovi pomocné tabuľky v podobe zobrazenia jedinečných podpravidiel na základe podobnosti a hodnoty skóre, výpis celého podpravidla/podpravidiel vrátane hodnoty zadanej používateľom pre daný atribút podpravidla. Používateľovi tieto pomocné tabuľky slúžia na zistenie štatistik v rámci jedinečných podpravidiel a majú podporiť jeho rozhodovanie v otázke klasifikácie nového prípadu. Keďže sa jedná o veľmi odlišnú podobnosť, pri klasifikácii nového prípadu musí používateľ využiť aj svoje znalosti. Klasifikovaný prípad je následne uložený do databázy historických prípadov, pričom používateľovi sa ponúka aj možnosť stiahnutia report obsahujúceho dôležité výstupy.

Pokiaľ sa jedná o čiastočnú podobnosť medzi historickým a novým prípadom, systém poskytne používateľovi pomocné tabuľky v podobe zobrazenia jedinečných podpravidiel na základe podobnosti a hodnoty skóre; výpis celého podpravidla/podpravidiel vrátane hodnoty zadanej používateľom pre daný atribút podpravidla; rozhodovací strom, z ktorého boli vygenerované podpravidlá a taktiež aj samotné podpravidlá v podobe adaptovateľnej tabuľky. Keďže sa jedná o čiastočnú podobnosť, práve v tomto prípade má používateľ možnosť adaptácie vygenerovaných podpravidiel (pokiaľ je to nutné). Pokiaľ však zväží, že podpravidlá majú vhodne stanovené intervaly atribútov získané z rozhodovacieho stromu a nie je potrebné ich adaptovať, môže okamžite klasifikovať nový prípad, uložiť ho do databázy a podľa potreby aj stiahnuť report.

Hlavným výstupom tohto systému je *klasifikovaný prípad, nová databáza historických prípadov doplnená o nový klasifikovaný prípad* ako aj *adaptované podpravidlá uložené v znalostnej báze* (ak prebehla samotná adaptácia). Databáza prípadov a adaptované pravidlá predstavujú aktuálnu databázu prípadov a podpravidiel pri klasifikovaní ďalšieho nového prípadu.

IV. VERIFIKÁCIA VYTVORENÉHO PRÍSTUPU

Experimentálne overenie a verifikácia mechanizmu adaptácie v systéme na podporu rozhodovania prebehla prostredníctvom voľne dostupnej medicínskej vzorky Cardio.

Primárnym cieľom pri práci s touto vzorkou je pomôcť lekárovi (používateľovi systému) pri rozhodovaní a stanovení výslednej diagnózy nového pacienta na základe najpodobnejších známych pacientov a umožniť mu vykonať

adaptáciu pravidiel. Pravidlá sú po adaptácii okamžite prístupné pri stanovení diagnózy ďalších nových pacientov, pričom nie je potreba opätovne generovať samotné rozhodovacie modely.

A. Popis dát a ich príprava

Databáza Cardio pochádza štúdie, ktorá prebiehala na univerzite v Los Angeles a vznikla testovaním pacientov na prítomnosť/nepítomnosť srdcovej choroby pomocou lieku dobutamín. Tento liek dostane srdce človeka do stavu ako pri záťažovom teste. Hlavným zámerom tejto štúdie bolo zistiť, či je možné tento liek efektívne použiť pri záťažových testoch na meranie rizika srdcového infarktu hlavne u starších pacientov. Na vyhodnotenie testovania porovnali predpovedané výsledky s realitou. Bližšie informácií o samotnej štúdií sú publikované v práci [36].

Samotná databáza obsahuje 558 záznamov a 32 atribútov a nenachádzala v nej žiadne chýbajúce hodnoty. Na týchto dátach sme vykonali len dve úpravy - odstránili sme duplicitné záznamy a odvodili sme cieľový atribút. Cieľový atribút *event* vznikol zo 4 binárnych atribútov:

- *newMI* - pacient mal srdcový infarkt,
- *newPTCA* - pacient podstúpil transluminálnu koronárnu angioplastiku,
- *newCABG* - pacient podstúpil aortokoronárne premostenie (bypass),
- *death* - pacient zomrel.

Pokiaľ sa aspoň v jednom z týchto binárnych atribútov vyskytovala hodnota 1, cieľový atribút *event* nadobúdal taktiež hodnotu 1, a teda pacient má srdcovú chorobu. Vo všetkých ďalších prípadoch bola hodnota cieľového atribútu *event* rovná 0, a teda pacient nemá srdcovú chorobu.

Po úpravách vykonaných nad dátami obsahovala databáza 472 záznamov a 28 atribútov (vrátane cieľového), pričom z celkového počtu záznamov trpelo srdcovou chorobou 180 pacientov a zvyšných 292 pacientov bolo bez výskytu srdcovej choroby. V nasledujúcej tabuľke sa nachádza popis jednotlivých atribútov a ich nadobúdajúce hodnoty po úprave.

Tab. 1. Popis atribútov Cardio databázy

Názv atribútu	Popis atribútu	Typ atribútu	Nadobúdajúce hodnoty
<i>age</i>	Vek pacienta	num	<26,93>
<i>sex</i>	Pohlavie pacienta	bin	0 (muž), 1 (žena)
<i>bhr</i>	Bazálny tep	num	<44,127>
<i>basebp</i>	Bazálny systolický krvný tlak	num	<85,201>
<i>dp</i>	Rate pressure product vypočítaný ako násobok systolického krvného tlaku <i>sbp</i> a maximálnej tepovej frekvencie <i>pkhr</i>	num	<5940,45114>
<i>dobEF</i>	Ejekčná frakcia po užití dobutamínu	num	<23,90>

<i>basedp</i>	bazálny rate je mierou namáhania srdca, indikuje energetickú spotrebu srdca a vypočíta sa ako násobok bazálneho systolického krvného tlaku <i>basebp</i> a bazálneho tepu <i>bhr</i> , ideálny v intervale 20 000 - 25 000	num	<5000,21082>
<i>pkhr</i>	Predikovaná maximálna tepová frekvencia	num	<62,182>
<i>sbp</i>	Systolický krvný tlak	num	<40,3098>
<i>dose</i>	Množstvo užitého dobutamínu	num	<10, 40>
<i>maxhr</i>	Predikovaná maximálna tepová frekvencia po užití dobutamínu	num	<62,182>
<i>mphr</i>	Percentuálne vyjadrenie dosiahnutej maximálnej tepovej frekvencie s predikovanou maximálnou tepovou frekvenciou pacienta	num	<39,133>
<i>mbp</i>	Maximálny systolický krvný tlak po užití dobutamínu	num	<90,309>
<i>dpmaxdo</i>	Rate pressure product po užití maximálneho množstva dobutamínu	num	<7130,45114>
<i>dobdose</i>	Množstvo užitého dobutamínu pri ktorom bol rate pressure product najväčší	num	<5,40>
<i>baseEF</i>	Bazálna ejekčná frakcia	num	<20,79>
<i>chestpain</i>	Bolesť na hrudi	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>posECG</i>	Známky srdcového infarktu spozorované na EKG	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>equivecg</i>	Nejednoznačné výsledky EKG	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>restwma</i>	Zistené anomálie pohybu stien srdca pri echo vyšetrení srdca	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>posSE</i>	Pozitívne výsledky záťažového echo vyšetrenia srdca	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>hxofHT</i>	Pacient mal alebo má hypertenziu	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>hxofdm</i>	Pacient má diabetes	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>hxofcig</i>	Pacient bol alebo je fajčiar	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>hxofMI</i>	Pacient už niekedy mal srdcový infarkt	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>hxofPTCA</i>	Pacient už niekedy podstúpil angioplastiku	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>hxofCABG</i>	Pacient už má na srdci bypass	bin	0 (nie), 1 (áno)
<i>event</i>	Výskyt srdcovej choroby	bin	0 (pacient nemá srdcovú chorobu), 1 (pacient má srdcovú chorobu)

B. Experimenty a ich vyhodnotenie

Prenosť modelov vytvorených v module 1 pre všetky kombinácie výberu pomeru množiny (60/40,70/30,80/20,90/10) a algoritmu rozhodovacieho stromu

(ctree, C5.0, rpart a C4.5) je zobrazená na nasledujúcej tabuľke.

Tab. 2. Presnosť modelov

Pomer	RS	%	Pomer	RS	%
60/40			70/30		
	ctree	68,0%		ctree	73,9%
	C5.0	75,7%		C5.0	80,6%
	rpart	81,8%		rpart	83,1%
	C4.5	75,1%		C4.5	81,3%
Pomer	RS	%	Pomer	RS	%
80/20			90/10		
	ctree	75,3%		ctree	66,7%
	C5.0	82,0%		C5.0	86,7%
	rpart	84,9%		rpart	81,5%
	C4.5	83,1%		C4.5	86,7%

Za najlepší model, z ktorého boli vygenerované rozhodovacie pravidlá použité v systéme na podporu rozhodovania, sme vybrali model vytvorený algoritmom rpart pri rozdelení množiny v pomere 80:20.

Počet pravidiel vygenerovaných z toho modelu bolo 6 a počet podpravidiel 10, ktorých rôzne kombinácie vytvárali konkrétne pravidlo. Napríklad, prvé pravidlo je tvorené podpravidlami L1, L2 a L3. To znamená, že toto pravidlo má tvar: **AK** hxofMI=0 **A** basedp < 15009.5 **A** dobEF >= 51.5 **POTOM** výsledná diagnóza (uvedená v rozhodovacom strome na konci tohto pravidla). Na nasledujúcom obrázku vidíme tieto podpravidlá vo forme tabuľky.

Subrule	Variable	Value	Less	Greater
1	L1	hxofMI	0	
2	L2	basedp	15009.5	
3	L3	dobEF	51.5	51.5
4	L4	posSE	0	
5	L5	dpmaxdo	19461.5	19461.5
6	R1	hxofMI	1	
7	R2	basedp	15009.5	15009.5
8	R3	dobEF	51.5	
9	R4	posSE	1	
10	R5	dpmaxdo	19461.5	

Obr. 4. Vizualizácia systému - zoznam podpravidiel vygenerovaných z najlepšieho modelu

Výpočet podobnosti sme testovali pomocou troch nových pacientov.

Pacient č.1 má 56 rokov, je mužského pohlavia, má zistené anomálie pohybu stien srdca pri echo vyšetrení srdca a pacient už v minulosti mal srdcový infarkt. Systém zistil, že tento pacient je pokrytý konjunkciou podpravidiel R1 (hxofMI=1) a R4 (posSE=1) a v databáze sa nachádza 21

historických pacientov so 100% podobnosťou k pacientovi č.1. Používateľ klasifikoval tohto pacienta triedou 1 (pacient s výskytom srdcovej choroby), ktorá sa vyskytovala pri 86% totožných pacientov. Zvyšní pacienti už mali nižšiu podobnosť s pacientom č.1, len menej ako 33% s hodnotu skóre 2 a 3.

Pacient č.2 má vek 55 rokov, je ženského pohlavia, jeho bazálny tep je 63, hladina systolickeho krvného tlaku 64 a ejekčná frakcia po použití dobutamínu 55. Systém zistil, že tento pacient je pokrytý pravidlom/podpravidlom L3 (dobEF ≥ 51.5) a historickí pacienti v databáze sa od neho veľmi líšia (najvyššia podobnosť len 33% so skóre hodnotou 2). Systém v tomto prípade poskytol používateľovi pomocné tabuľky na základe ktorých bol tento pacient klasifikovaný triedou 0 (u pacienta sa nevyskytuje prítomnosť srdcovej choroby). Používateľ mohol klasifikovať tohto pacienta podľa svojich znalostí alebo podľa klasifikácie odporúčanej systémom. Klasifikovaný pacient bol následne uložený do databázy historických pacientov.

Pacient č.3 má vek 49 rokov, bazálnu hodnotu 8000, ejekčnú frakciu po užití dobutamínu 52, má zistené anomálie pohybu stien srdca pri echo vyšetrení srdca a má negatívne výsledky záťažového echo vyšetrenia srdca. Systém zistil, že tento pacient je pokrytý konjunkciou podpravidiel L3 (dobEF ≥ 51.5), R2 (basedp ≥ 15009.5) a R4 (posSE=1) a v databáze sa nachádzajú podobní pacienti (najvyššia podobnosť 65% so skóre hodnotou 2). Pacientov s najvyššou podobnosťou bolo 28, pričom u nich prevládala trieda 1 v cieľovom atribúte (výskyt srdcovej choroby). Databáza obsahovala aj pacientov s podobnosťou 33,33% a skóre hodnotou 5 ale taktiež aj pacientov s nulovou podobnosťou a skóre hodnotou 3 pri 29 historických pacientoch. Keďže v databáze sa nachádzajú čiastočne podobní pacienti k pacientovi č.3, systém používateľovi poskytol pomocné tabuľky na podporu jeho rozhodnutia ohľadom klasifikácie pacienta. Tie podporili rozhodnutie používateľa, čo naznačovalo klasifikáciu tohto pacienta triedou 1 (u pacienta sa vyskytuje srdcová choroba). Klasifikovaný pacient je uložený do databázy historických pacientov. V prípade využitia možnosti adaptácie pravidiel resp. podpravidiel sme adaptovali podpravidlá L2 (basedp < 15009.5) a R2 (basedp ≥ 15009.5) s atribútom basedp. Na obrázku č.5 sa nachádzajú pôvodné podpravidlá a výsledok adaptácie je vizualizovaný na obrázku č.6. Hranice sa zmenili z **basedp < 15009.5** na **basedp < 15100** a z **basedp ≥ 15009.5** na **basedp ≥ 15100**.

Subrule	Variable	Value	Less	Greater
1	L1	hxofMI	0	
2	L2	basedp	15009.5	
3	L3	dobEF	51.5	51.5
4	L4	posSE	0	
5	L5	dpmaxdo	19461.5	19461.5
6	R1	hxofMI	1	
7	R2	basedp	15009.5	15009.5
8	R3	dobEF	51.5	
9	R4	posSE	1	
10	R5	dpmaxdo	19461.5	

Obr. 5. Vizualizácia systému – podpravidlá najlepšieho modelu pred adaptáciou

Subrule	Variable	Value	Less	Greater
1	L1	hxofMI	0	
2	L2	basedp	15100	
3	L3	dobEF	51.5	51.5
4	L4	posSE	0	
5	L5	dpmaxdo	19461.5	19461.5
6	R1	hxofMI	1	
7	R2	basedp	15100	15100
8	R3	dobEF		51.5
9	R4	posSE	1	
10	R5	dpmaxdo		19461.5

Obr. 6. Vizualizácia systému – podpravidlá najlepšieho modelu po adaptácii

Adaptované podpravidlá systém uložil do znalostnej bázy, to znamená, že boli okamžite prístupné pri hľadaní pokrytia nových pacientov. Po opätovnom načítaní pacienta č.3 do systému už bol pacient pokrytý konjunkciou podpravidel L2 (basedp <15009.5), L3 (dobEF \geq 51.5) a R4 (posSE=1). Po adaptácii vybraných podpravidel sa síce v databáze nachádzali podobní pacienti, ale najvyššia podobnosť bola len o niečo vyššia - 66,67% so skóre hodnotou 2 a prevalenciou triedy 0 v cieľovom atribúte. Zvyšné podobnosti boli nižšie ako 33,33%, pričom v týchto prípadoch bola prevalencia výskytu srdcovej choroby rovnomerná. V tomto prípade sme zhodnotili, že krok adaptácie nebol veľmi úspešný nakoľko sa najvyššie percento podobnosti k pacientovi č.3 len mierne zvýšilo.

V. ZÁVER

Tento príspevok sa zameriava na zlepšenie existujúcich príležitostí pre lekársku diagnostiku smerom k lepšiemu pochopeniu analytických výsledkov. Tento krok vpred zahŕňa vysvetliteľné rozhodovacie modely generované metódami strojového učenia pri spracovaní, analýze a využívaní efektívne dostupných lekárskeho údajov. Proces prípadového usudzovania apodobňuje riešenie problémov ľuďmi, pri ktorom využívajú skúsenosti z predchádzajúcich prípadov na riešenie nových prípadov založené na podobnosti. Jednou z aktuálnych výskumných úloh v tejto oblasti je navrhnutie spôsobu adaptácie uložených prípadov na základe nových prípadov. Navrhli sme nový mechanizmus na poloautomatickú adaptáciu v metóde CBR a integrovali sme ho do nášho systému na podporu rozhodovania. Metóda je založená na automatickej extrakcii najdôležitejších rozhodovacích pravidiel a ich fragmentov vhodných pre nový prípad. Okrem toho tento systém ponúka komplexné možnosti pre používateľa, ktorý nie je pasívnym príjemcom informácií a môže na základe svojich znalostí a skúseností aktívne ovplyvňovať diagnostický postup. Tento prístup sme úspešne vyhodnotili pomocou bezplatne dostupného súboru údajov o srdcových chorobách. Použitie vytvoreného mechanizmu adaptácie na HDD dátach a výsledky vykonaných experimentov sme publikovali v podobe článku *Semi-Automatic Adaptation of diagnostic rules in the Case-Based Reasoning process* v karentovanom časopise v Q2 podľa JCR

[37]. Potenciál tohto systému bol otestovaný aj kardiológom z medicínskej oblasti.

Systém na podporu rozhodovania s využitím mechanizmu adaptácie sme navrhli na základe našej predchádzajúcej a existujúcej spolupráce s rôznymi lekáskymi odborníkmi z Lekárskej fakulty Osijek, Univerzity JJ Strossmayera, Osijek, Chorvátsko a Východoslovenského ústavu srdcových a cievnych chorôb, Košice, Slovensko. Máme skúsenosti s rôznymi úlohami analýzy medicínskych údajov, ako napríklad predikcia metabolického syndrómu alebo mierneho kognitívneho poškodenia prostredníctvom vhodných metód strojového učenia.

Taktiež sme sa zúčastnili experimentov zameraných na klastrovú analýzu vzorky lekárskeho údajov z Chorvátska. Cieľom bolo analyzovať multimorbiditu z hľadiska fyzickej slabosti, kognitívnych porúch a symptómov úzkosti a depresie. Výsledky boli publikované v karentovanom časopise Medical Science Monitor v Q3 podľa JCR [38]. Zistili sme, že tvorba jednotlivých klastrov pacientov je závislá od veku a je ovplyvnená prítomnosťou duševných porúch a konkrétnymi kognitívnymi výkonnosťnými úlohami.

Vykonané experimenty a získané skúsenosti nám pomohli pochopiť, ako efektívne poskytovať analytické výsledky koncovým používateľom a ušetriť čas pacientom.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-16-0213 a APVV-17-0550.

REFERENCES

- [1] M.Rashidi, M.Ghodrat, B. Samali and M.Mohammadi, "Decision support systems," Management of Information Systems. 2018. Doi:10.5772/intechopen.79390
- [2] S.Alter, "Decision Support Systems: Current Practice and Continuing Challenges," Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., 1980. ISBN 0-201-00193-4.
- [3] E.Turban, J.Aronson, T.P. Liang and R.V. McCarthy, "Decision Support Systems and Intelligent Systems," New Delhi, India: Prentice Hall; 2001.
- [4] M.Bohanec, "What is decision support?," Proc. Information Society IS-2001: Data Mining and Decision Support in Action!, (eds. Škrjanc, M., Mladenec, D.), Ljubljana, 2011, pp.86-89.
- [5] B.G.Buchanan and E.A. Feigenbaum, "DENDRAL and Meta-DENDRAL: Their applications dimension," Artificial Intelligence, 1978. Doi: 10.1016/0004-3702(78)90010-3.
- [6] C.F.Tan, L.S.Wahidin, S.N. Khalil, N.Tamaldin, J.Hu and G.W.M. Rauterberg, "The Application of Expert System: a Review of Research and Applications," Journal of engineering and applied sciences 11 (4), pp. 2448-2453, 2016.
- [7] A.Ahmed, T.Aduragba, A.A. Ajani, B. Jimada-Oluolape and M.O. Ahmed, "Expert system in rural medical care," International journal of engineering sciences and research technology 6(9), 2017.
- [8] A.K.Meena and S.Kumar, "Review : Use of Expert System in Medical Science," International journal of advanced research in computer science and software 5 (10), 2015, pp.371-373.
- [9] W.N.Melle, "The Structure of the MYCIN System," International Journal of Man-Machine Studies, 2018, pp. 313-322..
- [10] F.U.Rashid, "A Review on Dendral Expert System," International journal for research in applied science and engineering technology 6 (2), 2018, pp.1089-1091.

- [11] M.Stefik, "Planning with Constraints (MOLGEN 1)". Artificial Intelligence 16 (2), 1981, pp. 111-139.
- [12] R.A.Miller, M.A.McNeil, S.M.Challinor, F.E. Masarie and J.D.Myers, "The INTERNIST-1/QUICK MEDICAL REFERENCE project-status report," The Western journal of medicine, 145(6), 1986, pp. 816-822.
- [13] A.Al-Ajlan, "Medical Expert Systems HDP and PUFF," King Saud University, 2007, pp.3-8.
- [14] J.S.Aikins, J.C.Kunz, E.H.Shortliffe and R.J. Fallat, "PUFF: An expert system for interpretation of pulmonary function data," Comput Biomed Rec 16 (3), 1983, pp.199-208. Doi: 10.1016/0010-4809(83)90021-6.
- [15] B.B. Abu-Nasser, "Medical expert systems survey," International Journal of Engineering 1, 2017, pp.218-224.
- [16] D.A.Sharaf-El-Deen, A.F.Moawad and M.E.Khalifa, "A New Hybrid Case-Based Reasoning Approach for Medical Diagnosis Systems," Journal of Medical Systems 38, 2014. Doi: 10.1007/s10916-014-0009-1.
- [17] R.M.Saraiva, J.Bezerra, M.Perkusich, H.Almeida and C. Siebra, "A Hybrid Approach Using Case-Based Reasoning and Rule-Based Reasoning to Support Cancer Diagnosis: A Pilot Study," Stud Health Technol Inform, 2015. Doi: 10.3233/978-1-61499-564-7-862.
- [18] D.B.Leake, "Case-Based Reasoning: Experiences, lessons and future directions," MIT press, 1996. ISBN 978-0-262-62110-6
- [19] A.Aamodt and E. Plaza, "Case-based reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches," AI Communications. OSI Press 7, 1994, pp. 39-59.
- [20] R.L.De Mantaras, D.Mcherry, D.G.Bridge, I. Watson, et al., "Retrieval, reuse, revision and retention in case-based reasoning," The Knowledge Engineering Review 20 (3), 2005, pp. 215-240, Doi: 10.1017/S0269888906000646
- [21] S.K.Pal and S.C.K. Shiu, "Foundations of soft case-based reasoning," John Wiley & Sons, 2004. ISBN: 978-0-471-64466-8
- [22] C.Pous, P.Gay, A.Pla, J.Brunet, J.Sanz, T.R.Cajal and B.Lopez, "Modeling reuse on case-based reasoning with application to breast cancer diagnosis," Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications 2008, pp. 322-332.
- [23] A.Lawanna and J.Daengdej, "Methods for case maintenance in casebased reasoning," Int. J. Comput. Inform. Eng 2010, pp. 10-18. Doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.1071736>
- [24] N.Choudhury, "A Survey on Case-based Reasoning in Medicine," International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA) 7 (8), 2016. doi: 10.14569/IJACSA.2016.070820
- [25] A.Smiti and Z.Elouedi, "Using clustering for maintaining case based reasoning systems," 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013, pp. 1-6. Doi: 10.1109/ICMSAO.2013.6552628
- [26] M.D'Aquin, J.Lieber and A.Napoli, "Adaptation knowledge acquisition: A case study for case-based decision support in oncology," Computational Intelligence 22 (3- 4), 2006, pp. 161-176.
- [27] R.Schmidt, S.Montani, R.Bellazzi, L.Portinale and L.Gierl, "Cased-based reasoning for medical knowledge-based systems," International Journal of Medical Informatics 64 (2), 2001, pp. 355-367.
- [28] P.Koton, "A medical reasoning program that improves with experience," Computer methods and programs in biomedicine 30 (2), 1989, pp. 177-184.
- [29] A.Pla, B.LóPez, P.Gay and C.Pous, "Distributed case-based reasoning tool for medical prognosis," Decision Support Systems 54 (3), 2013, pp. 1499-1510.
- [30] J.Henriet, P.E.Leni, R.Laurent and M.Salomon, "Case-Based Reasoning adaptation of numerical representations of human organs by interpolation," Expert Systems with Applications 41 (2), 2014, pp. 260-266.
- [31] A.B.M.Salem and B.M.E.L.Bagoury, "A Case-Based Adaptation Model for Thyroid Cancer Diagnosis Using Neural Networks," Proceedings of the Sixteenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference 2003, pp. 155-159.
- [32] Z.S.Zubi and R.A.Saad, "Using Some Data Mining Techniques for Early Diagnosis of Lung Cancer," In Recent Researches in Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Base, 2011, pp. 32-37.
- [33] A.Keles, A.Keles and U.Yavuz, "Expert system based on neuro-fuzzy rules for diagnosis breast cancer," Expert Systems with Applications 38(5), 5719-5726, 2011. doi: 10.1016/j.eswa.2010.10.061
- [34] S.A.Lashari, R.Ibrahim, N.Senan, N.S.A.M.Taujuddin, "Application of Data Mining Techniques for Medical Data Classification," A Review. MATEC Web of conference 150, pp. 1-6, 2017.
- [35] L.Pusztová, F.Babič, J.Paralič and Z.Paraličová, "How to Improve the Adaptation Phase of the CBR in the Medical Domain," International Cross-Domain Conference for Machine Learning and Knowledge Extraction (CD-MAKE) 3, pp. 168-177, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-29726-8_11
- [36] J.Krivokapich, J.S. Child, D.O.Walter and A.Garfinkel, "Prognostic value of dobutamine stress echocardiography in predicting cardiac events in patients with known or suspected coronary artery disease," Journal of the American College of Cardiology 33 (3), 1999, pp. 708-716.
- [37] L.Pusztová, F.Babič, J.Paralič, "Semi-Automatic Adaptation of diagnostic rules in the Case-Based Reasoning process," Applied Sciences 11 (1), 2021. doi:10.3390/app11010292
- [38] L.T.Majnaric, S.Bekic, F.Babič, L.Pusztová a J.Paralič, "Cluster analysis of the associations among physical frailty, cognitive impairment and mental disorders," International journal of Experimental and Clinical Research 26, 2020. doi: 10.12659/MSM.924281

Rozšírenie systémov kolaboratívnej virtuálnej reality o podporu technológií X-Reality

Marián Hudák

Katedra počítačov a Informatiky,
KPI FEI TUKE,
Košice, Slovensko,
marian.hudak.2@tuke.sk

Branislav Sobota

Katedra počítačov a Informatiky,
KPI FEI TUKE,
Košice, Slovensko,
branislav.sobota@tuke.sk

Abstrakt— Súčasná kolaboratívna virtuálna realita čelí širokej diverzite používateľského hardvéru a softvéru, kvôli ktorej narastajú požiadavky na vývoj multiplatformových systémov. Využitie viacpoužívateľských adaptívnych rozhraní môže pozitívne ovplyvniť multiplatformovú podporu a viacpoužívateľskú interakciu. V tomto príspevku predstavujeme rozšírenie webového systému kolaboratívnej virtuálnej reality o podporu technológií X-Reality. Naším cieľom je posilniť virtuálnu kolaboráciu prostredníctvom virtuálnych prostredí nezávislých od softvérovej platformy, ktoré poskytujú adaptívne ovládanie pre široké spektrum používateľských zariadení.

Kľúčové slová—*Virtuálna Realita; Kolaboratívne virtuálne prostredia; X-Realita; Viacpoužívateľské rozhranie; Adaptívne rozhrania;*

Abstract— Contemporary collaborative virtual reality is facing hardware and software diversity which increases demands to develop multiplatform systems. The utilization of multi-user adaptive interfaces can positively affect multiplatform support and interaction for various users. In this study, we present the enhancement of a web-based collaborative virtual reality system with X-Reality support. Our goal is to enhance virtual collaboration through platform-independent virtual environments that adapt to user devices and interfaces.

Keywords—*Virtual Reality; Collaborative virtual environments; X-Reality; Multi-user interface; Adaptive interfaces;*

I. ÚVOD

V súčasnosti sa vývoj Virtuálnej Reality (VR) zameriava na kolaboratívne aktivity používateľov v reálnom čase. Prostredníctvom systémov kolaboratívnej virtuálnej reality je možné zapájať skupinu používateľov do riešenia rôznych kolaboratívnych úloh [1]. Okrem zdokonaľovania technologickej úrovne VR sa začínajú aktívne presadzovať aj technológie Zmiešanej (MR) a Augumentovanej reality (AR). Týmto spôsobom narastá dopyt za účelom sprostredkovať virtuálnu kolaboráciu, ktorá by bola platformovo nezávislá.

V zámere pokryť technologickú podporu systémov VR, MR a AR vzniká oblasť X-Reality (XR). Účelom tejto oblasti je zjednotenie uvedených systémov do spoločného celku XR, pod ktorým je možné rozširovať kompatibilitu virtuálnych prostredí o rôzne typy používateľských zariadení [2]. Vďaka oblasti XR sa postupne vyvíjajú webové technológie, ktoré

rozširujú systémy virtuálnej kolaborácie na úroveň webovej platformy [3]. Hlavným zámerom webových platforiem je poskytovať prístup na globálnej úrovni pre širokú skupinu používateľov. Tým sa zvyšuje pravdepodobnosť, že používatelia budú k webovému systému pristupovať pomocou rôznych zariadení, ktoré sa neodlišujú len typom a operačným systémom ale rovnako aj spôsobmi interakcie. Riešením uvedeného problému je vývoj adaptívnych vlastností systémov a ich používateľských rozhraní tak, aby bolo možné poskytovať rovnaké funkcie ovládania pre rozdielne druhy hardvérových a softvérových zariadení súčasne.

Za účelom vývoja adaptívnych rozhraní je nevyhnutné systémy kolaboratívnej virtuálnej reality klasifikovať podľa nasledujúcich kritérií :

- Dostupnosť a účel zamerania systémov.
- Aplikačné architektúry systémov.
- Spracovávanie a riadenie viacpoužívateľského prístupu a interakcie.

Podľa uvedených kritérií je možné navrhnuť adaptívne vlastnosti, ktoré budú v rámci systému virtuálnej kolaborácie vyvíjané.

II. SYSTÉMY KOLABORATÍVNEJ VIRTUÁLNEJ REALITY

Systémy kolaboratívnej virtuálnej reality poskytujú široký účel využitia pre rôzne oblasti simulácií, tréningov, edukácie, medicínskych aplikácií a rovnako výskumu [4]. Z tohto dôvodu je koncepcia systémov prispôbovaná konečnému použitiu. Podľa dostupnosti je možné systému virtuálnej kolaborácie klasifikovať vzhľadom na lokálny alebo globálny prístup používateľov a rovnako ich fyzickú alebo vzdialenú prítomnosť.

A. Klasifikácia systémov kolaboratívnej Virtuálnej reality podľa dostupnosti

1) Lokálne zdieľané systémy s centralizovaným prístupom

V lokálnych systémoch s centralizovaným prístupom je prítomnosť používateľov plne fyzická. Typický príklad predstavuje systém Virtuálnej jaskyne [5], ktorý plne pohlcuje

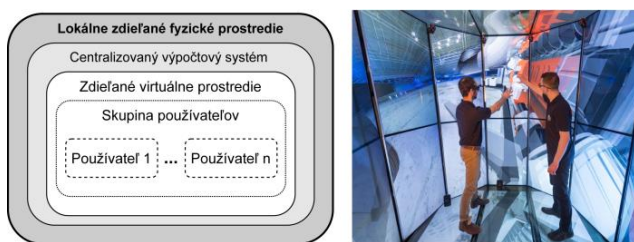
používateľov a poskytuje vysoko efektívny a realistický spôsob kolaborácie [6]. Pri kolaborácii sú používatelia medzi sebou reálne viditeľní (Obr.1). Pre dosahovanie spoločnej komunikácie medzi používateľmi nie je potrebné využívanie externých technológií.

Uvedený systém využíva dve skupiny rozhraní :

Používateľské rozhrania poskytujú priamu interakciu používateľov so spoločne zdieľaným virtuálnym prostredím pomocou rôznych hardvérových prvkov a ovládačov (dotykové rozhrania, haptické ovládače, gestikulačné vstupy, senzorické zariadenia).

Aplikačné rozhrania predstavujú softvérové komponenty systému, ktoré komunikujú s používateľskými rozhraniami a následne zabezpečujú potrebnú spätnú väzbu (vizuálna, zvuková, haptická).

Rozširovanie Virtuálnych jaskýň o adaptívne vlastnosti je efektívne na úrovni aplikačných rozhraní, ktoré môžu spracovávať široké spektrum používateľských vstupov a zariadení.



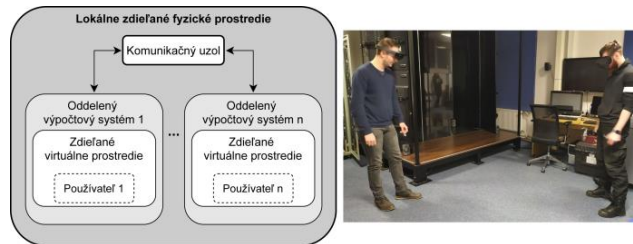
Obr. 1 Lokálne zdieľaný systém Virtuálnej jaskyne LIRKIS CAVE.

2) Lokálne zdieľané systémy s oddeleným prístupom

Zdieľanie virtuálnej kolaborácie s oddeleným prístupom dovoľuje používateľom interagovať osobitne pomocou vlastného zariadenia [7] (oddeleného výpočtového systému). Používatelia sa nachádzajú v spoločnom fyzickom priestore, v ktorom sú schopní komunikovať prirodzene, verbálnym spôsobom (Obr.2). Pre dosiahnutie vizuálnej interakcie sú entity používateľov reprezentované virtuálnymi avatarmi.

Každý z oddelených výpočtových systémov disponuje rovnakým virtuálnym prostredím [8], ktoré zobrazuje. Zdieľanie virtuálneho prostredia je docielené prostredníctvom sieťového komunikačného uzla, v rámci ktorého sú prenášané údaje o interakcii a pohybe každého z používateľov.

Spôsob interakcie závisí od dostupnej funkcionality používateľského zariadenia, ktorá musí byť rovnako podporovaná virtuálnym prostredím. Pre pokrytie širokého spektra používateľskej interakcie prudko narastá modularita virtuálnych prostredí. Dôvodom tohto problému je potreba spracovávať rôzne typy používateľských rozhraní. Nasadením adaptívnych rozhraní je možné zamedziť prudkému nárastu modularity pomocou inteligentných komponentov, ktoré sú schopné dynamicky rozpoznať vstupné zariadenia. Vzhľadom na typ vstupného zariadenia je následne možné sprostredkovať vhodnú interakčnú techniku vo virtuálnom prostredí.



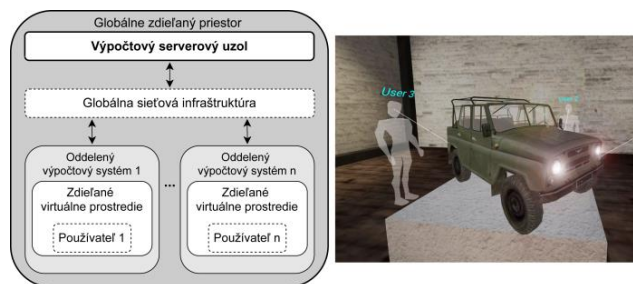
Obr. 2 Lokálne zdieľaný systém s oddeleným prístupom používateľov.

3) Globálne zdieľané systémy

Zdieľanie globálne dostupných virtuálnych prostredí (Obr.3) využíva dostupné prostriedky webových technológií a siete internet [10]. Na rozdiel od predošlých systémov sú globálne systémy schopné pohltiť oveľa väčšie skupiny používateľov. Tým narastá potreba zabezpečiť kompatibilitu systému s rozsiahlou skupinou používateľských rozhraní.

Zdieľanie interakcie je sprostredkované výpočtovým serverovým uzlom, ktorý riadi priebeh virtuálnej kolaborácie [11]. Entity používateľov sú reprezentované virtuálnymi avatarmi so zdieľaním pohybu a interakcie. Zmeny vykonané používateľmi sú podávané priamo serveru. Hlavnou úlohou servera je získané údaje spracovať a následne replikovať pre všetkých používateľov v rámci celej kolaboratívne skupiny.

V uvedenom systéme dochádza často k hromadnému viacpoužívateľskému prístupu. Z tohto dôvodu sú globálne zdieľané virtuálne prostredia odbavené širokým spektrom používateľských rozhraní. Rovnako ako v prípade lokálne zdieľaných systémov s oddeleným prístupom vzniká prudký modularity systému, za účelom poskytovať multiplatformovú dostupnosť a interakciu. Ďalší problém vyplýva z vysokej redundancie komponentov systému, hlavne kvôli zabezpečeniu akýchkoľvek používateľských vstupov. Vzhľadom na riešenie uvedeného problému je potrebné zavádzanie adaptívnych rozhraní s poskytovaním viacpoužívateľskej interakcie a prístupu. Hlavným zámerom tohto riešenia je znížiť počet redundantných rozhraní na stranách používateľov a poskytovať len korešpondujúce spôsoby interakcie vzhľadom na používateľské zariadenia.



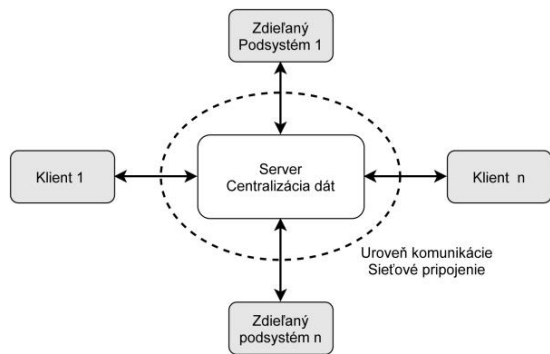
Obr. 3 Globálne zdieľaný systém s oddeleným prístupom používateľov.

B. Konceptie aplikačnej architektúry

Systemy virtuálnej kolaborácie využívajú rôzne konceptie sieťových aplikačných architektúr pre zdieľanie údajov medzi používateľmi. Použitie aplikačnej architektúry úzko súvisí s potrebami, pre ktoré je cieľový systém určený. Pri tvorbe viacúčelových prostredí je možné aplikovať štandardné typy architektúr bez zmien ich komponentov. Avšak pre systémy so špecifickým účelom sú rozšírenia a úpravy aplikačných architektúr nevyhnutné.

1) Architektonický vzor Klient-server

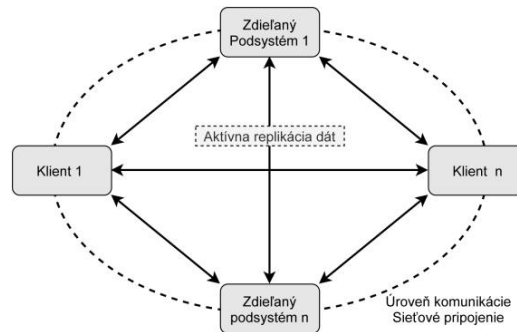
V uvedenej architektúre je komunikácia klientov závislá od hlavného uzla, servera (Obr.4). Server centralizuje údaje medzi klientmi, ktoré následne spracováva a replikuje v celej skupine. Konzistencia zdieľaných údajov je v tomto prípade ľahko kontrolovateľná [12]. Tento typ aplikačnej architektúry je v zásade použiteľný pre všetky systémy virtuálnej kolaborácie. Avšak, dostupnosť služieb na úrovni servera je závislá od jeho výpočtového výkonu. Vzhľadom na narastajúci počet klientov sú kladené vyššie výpočtové nároky spracovávanie a zdieľanie klientskych dát. V dôsledku toho je potrebné optimalizovať veľkosť zasielaných údajov a rovnako riešiť časový interval ich zasielania zo strany klientov [13].



Obr. 4 Model aplikačnej architektúry s využitím vzoru Klient-server.

2) Architektonický vzor Peer-to-peer

Nasledujúci architektonický vzor Peer-to-peer (Obr.5) využíva aktívnu replikáciu údajov medzi klientmi bez používania centralizovaného uzla, servera [14]. Konzistencia údajov je v prípade zdieľania používateľskej interakcie ohrozená ak je výpočtový výkon klientov výrazne odlišný. Z tohto dôvodu je uvedený vzor výrazne limitovaný pre globálne využitie, nakoľko riadenie zdieľaných interakcií je ovplyvnené práve výkonnostným pomerom klientov. V skutočnosti je možné architektúru Peer-to-peer použiť ako náhradný mechanizmus pri výpadkoch služieb v systémoch klient-server.



Obr. 5 Model aplikačnej architektúry s využitím vzoru Peer-to-peer.

III. SPRACOVÁVANIE VIACPOUŽÍVATEĽSKÉHO PRÍSTUPU PRI ZDIEĽANÍ VIRTUÁLNEHO PROSTREDIA

V systémoch s podporou globálnej virtuálnej kolaborácie dochádza k hromadnému prístupu používateľov v reálnom čase. Vzhľadom na túto skutočnosť sú zavádzané mechanizmy replikácie údajov a riadenia viacpoužívateľskej interakcie. Ich použiteľnosť je optimálna úrovni na architektúr klient-server [15].

A. Mechanizmy replikácie údajov pri viacpoužívateľskom prístupe

Za účelom riadiť používateľský prístup vznikajú mechanizmy replikácie údajov, ktoré sa sústreďujú na synchronne a asynchronne zdieľanie používateľských aktivít.

Za synchronnu aktivitu je možné považovať úkon alebo požiadavku používateľa na systém, pre ktorú musí obdržať spätnú odpoveď. Systém pri prijatí požiadavky spracuje prijaté údaje a následne odpovie používateľovi. Používateľ je počas spracovávania požiadavky limitovaný vykonávať akékoľvek iné aktivity, pokiaľ neobdrží spätnú odpoveď. Ako príklad je možné uviesť je prihlasovanie používateľov do systému, kedy sú nútení čakať na povolenie k pripojeniu do zdieľaného virtuálneho prostredia. Po spracovaní prihlásenia je serverom zaslaná odpoveď používateľovi a následne replikovaná udalosť jeho pripojenia medzi ostatných používateľov.

Asynchronna aktivita je spájaná s dynamickým správaním používateľov [16]. Tie súvisia s činnosťou, ktorá sa mení v krátkych časových úsekoch. Medzi uvedené aktivity sú radené : pohyb v zdieľanom virtuálnom prostredí a zasielanie komunikačných správ. Pri vykonávaní týchto aktivít je používaný mechanizmus asynchronnej replikácie údajov. Jeho primárnym účelom je zdieľanie priebežného stavu aktívnych používateľov v krátkych časových úsekoch, slučke. Prijaté údaje sa serverom nespracovávajú a nesynchronizujú, len replikujú všetkým používateľom v reálnom čase. Aj keď konzistencia údajov môže byť ohrozená, interval replikácie je krátky, preto je stratovosť údajov zanedbateľná.

B. Riadenie interakcie skupiny používateľov

Riadenie interakcií používateľov sa zaoberá ich konkurenciou pri práci so spoločne zdieľanými virtuálnymi objektmi. V zásade je možné poskytovať dva spôsoby riadenia interakcie: interakciu s blokováním prístupov a interakciu s voľným prístupom.

Používanie interakcie s blokováním prístupov je založené na synchronnom spôsobe [17]. Pokiaľ niektorý z používateľov interaguje s zdieľaným objektom, tento objekt je automaticky uzamknutý a nedostupný pre ostatných používateľov. Tí môžu vykonávať len pozorovanie objektu bez zásahov. Akonáhle je interakcia ukončená, objekt sa odomkne a sprístupní ďalšiemu z používateľov. Uvedený spôsob interakcie je možné nasadiť v prípade architektúry klient-server.

V prípade voľnej interakcii dochádza ku konkurencii používateľov, kedy je možné získať zdieľaný objekt kedykoľvek, dokonca v prípade ak už nad objektom vykonáva interakciu niektorý z používateľov. Tento druh riadenia interakcie je aplikovateľný v rámci všetkých koncepcií architektúr.

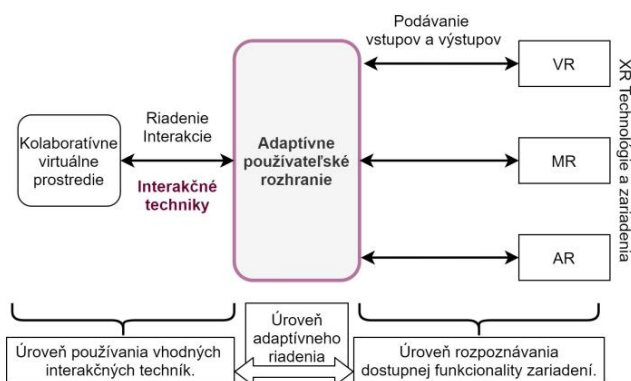
**IV. ADAPTÍVNE ROZHRAŇA
SYSTÉMOV KOLABORATÍVNEJ X-REALITY**

Vzhľadom na problémy opísané v predošlých kapitolách je dôležité zavádzať adaptívne rozhrania v rámci systémov virtuálnej kolaborácie. Hlavným účelom týchto rozhraní je zníženie počtu systémových komponentov a poskytovanie potrebnej funkcionality pri ovládaní virtuálneho prostredia.

A. Viacpoužívateľské adaptívne rozhrania XR systémov

Pri používaní globálnych XR systémov je možné predpokladať, že do kolaboratívneho virtuálneho prostredia sa budú používatelia pripájať prostredníctvom rôznych XR technológií a platforiem [7]. Tie môžu disponovať rozdielnou funkcionality ovládania a interakciami s virtuálnym prostredím. Práve kvôli rozširovaniu podpory o XR technológie sú systémy kolaboratívnej virtuálnej reality dopĺňané o veľký počet rozhraní. Riešením uvedeného problému je nasadzovanie viacpoužívateľského adaptívneho rozhrania, ktoré je schopné spájať vstupy z XR zariadení s korešpondujúcou technikou interakcie.

Uvedené rozhranie (Obr.6) využíva tri úrovne sprostredkovania interakcie. Prvá úroveň predstavuje rozpoznávanie dostupnej funkcionality vstupných zariadení XR. V rámci tejto úrovne je dynamicky rozpoznávaný typ XR zariadenia a jeho dostupných vstupov. Druhá úroveň sa zaoberá získavaním interakčných techník z kolaboratívneho virtuálneho prostredia pre ovládanie interakcie. Na poslednej, tretej úrovni, je spustený proces adaptívneho riadenia. V rámci tohto procesu je detegovaným vstupom XR zariadení priradená zodpovedajúca interakčná technika.

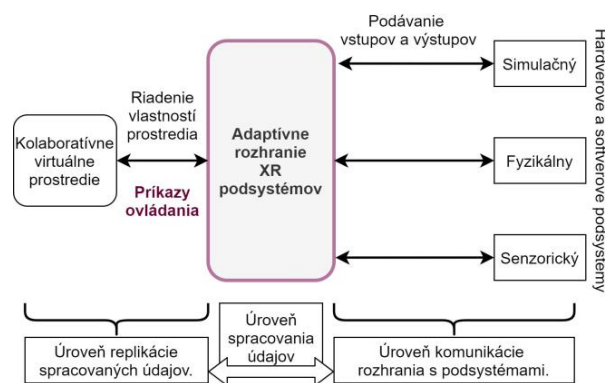


Obr. 6 Diagram adaptácie vstupov XR systémov na interakčné techniky riadenia kolaboratívneho virtuálneho prostredia.

B. Adaptívne rozhrania XR podsystémov

Zdieľanie XR podsystémov je ďalším z podstatne riešených problémov v globálnych systémoch kolaboratívnej X-reality. Za podsystém je možné považovať zariadenie alebo aplikáciu, ktorá spracováva špecifický typ údajov (simulácia, fyzikálne výpočty, senzorické údaje). Tie sú následne poskytované virtuálnemu kolaboratívne prostrediu. Vo väčšine prípadov je každý z podsystémov odbavený špecifickým rozhraním, ktoré rozširuje modularitu celého kolaboratívneho systému.

Uvedený problém je riešiteľný adaptívnym rozhraním podsystémov (Obr.7), ktoré je schopné sprostredkovať údaje z podsystému pre ovládanie kolaboratívneho virtuálneho prostredia. Adaptácia je riadená na troch úrovniach sprostredkovania údajov. Prvá úroveň predstavuje obojstrannú komunikáciu medzi adaptívnym rozhraním a podsystémom. Účelom tejto komunikácie je získať údaje z podsystému prostredníctvom štandardného dátového formátu (JSON, XML) priamo do adaptívneho rozhrania. Druhá úroveň pozostáva zo spracovania údajov rozhraním pre cieľové kolaboratívne prostredie. Na tretej úrovni sú údaje získané z podsystému spracované na príkazy ovládania a replikované do kolaboratívneho virtuálneho prostredia.



Obr. 7 Diagram adaptácie vstupov XR podsystémov na príkazy ovládania kolaboratívneho virtuálneho prostredia.

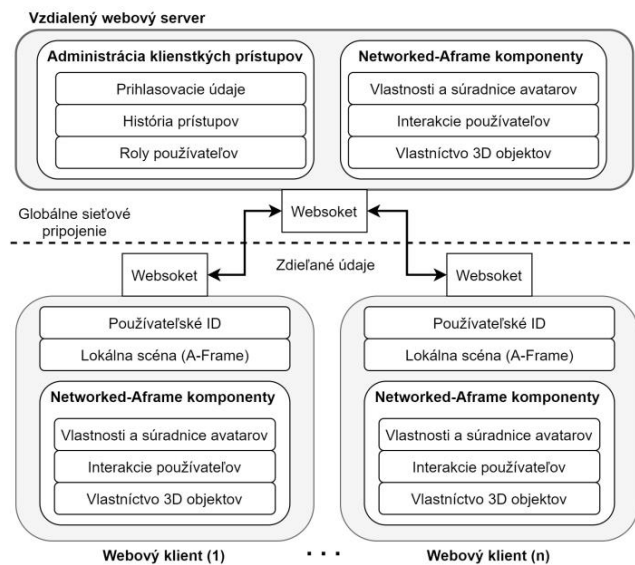
V. WEBOVÝ XR SYSTÉM PRE GLOBÁLNU KOLABORÁCIU POUŽÍVATEĽOV

A. Globálne kolaboratívne virtuálne prostredia

Za účelom testovať adaptívne rozhrania v systémoch kolaboratívnej X-reality bol vytvorený globálny webový systém LIRKIS G-CVE (LIRKIS Global-Collaborative Virtual Environments) [19] ako primárna testovacia platforma. Systém využíva architektúru klient-server, prostredníctvom ktorej poskytuje prístup viacerým klientom v reálnom čase.

Vzdialený webový server (Obr.8) je zodpovedný zdieľanie používateľských údajov a spracovanie viacpoužívateľského prístupu v reálnom čase. Komunikácia medzi webovými klientmi a serverom je riadená na úrovni websoketov. Server využíva tri aplikačné softvérové rámce: Node.js, Express.js a Networked-Aframe, implementované v skriptovacom jazyku JavaScript. Úlohou uvedených rámcov je zabezpečiť beh služieb na aplikačnom pozadí systému [19]. Node.js poskytuje websoketovú komunikáciu pre podporu webových rámcov Networked-Aframe a zdieľanie používateľskej komunikácie. Pomocou Networked-Aframe je spostredkované zdieľanie virtuálnych objektov vrátane používateľskej interakcie. Express.js poskytuje služby REST API servera za účelom spracovania HTTP požiadaviek od klientov.

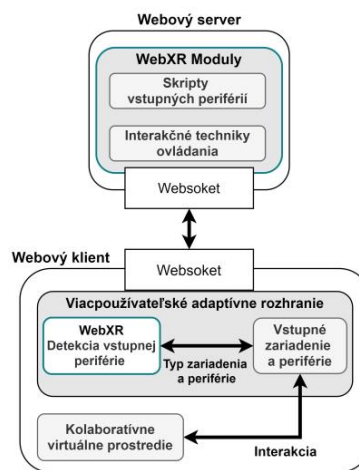
Na strane webového-klienta je nasadená webová technológia A-Frame. Jej hlavným účelom je sprostredkovať zdieľané virtuálne prostredie (lokálna scéna) a asynchrónne vykresľovať zdieľané aktivity v prostredí prostredníctvom webového prehliadača. V kombinácii s webovým rámcom Networked-Aframe sú medzi webovými klientmi zdieľané údaje vrátane avatarov, interakcie a vlastníctva 3D objektov.



Obr. 8 Architektúra webového systému LIRKIS G-CVE.

B. Viacpoužívateľské adaptívne rozhranie pre podporu interakcie

Účelom tohto viacpoužívateľského rozhrania (Obr.9) je eliminovať klientske zariadenie od redundantných skriptov periférnych rozhraní, ktoré súčasne nepoužíva. Proces eliminácie je riadený nasledovným spôsobom: Pred spustením kolaboratívneho virtuálneho prostredia je na strane webového klienta detegovaný typ používateľského zariadenia a jeho vstupných periférií pomocou služby WebXR. Následne je zo strany klienta vykonaný dotaz na server, ktorému zasiela výsledok detekcie. Ako odpoveď server klientovi preposiela skripty pre vstupné periférie a interakčné techniky, pomocou ktorých je klient schopný vykonávať interakcie. V závere je na strane webového klienta spustené virtuálne prostredie s príslušnou interakciou, závislej od jeho od vstupnej perifériei.



Obr. 9 Diagram adaptívneho viacpoužívateľského rozhrania.

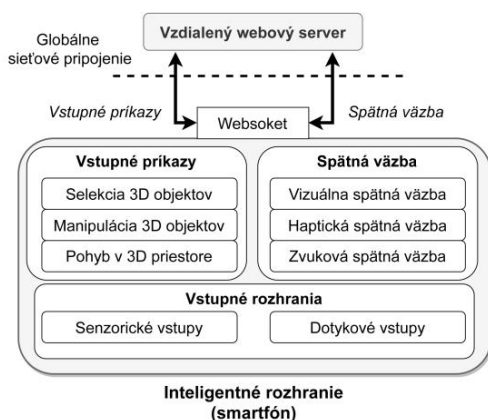
C. Viacúčelové inteligentné rozhranie pre ovládanie XR interakcie

V prípade webového rozhrania klienta je možné pripájať rôzne typy XR zariadení, ktoré využívajú vlastné ovládače pre dosahovanie používateľskej interakcie. Väčšina týchto ovládačov je schopná sprostredkovať len úzku škálu interakcie, kvôli ktorej klesá úroveň ovládania 3D objektov. Ďalší problém vzniká pri XR zariadeniach, ktoré sú limitované výpočtovým výkonom a nie sú schopné poskytovať plynulú interakciu pri používaní ovládačov.

Za účelom zjednodušiť používateľskú interakciu a poskytnúť rôzne typy interakčných techník bolo navrhnuté viacúčelové inteligentné rozhranie pre ovládanie virtuálnej scény smartfónom [20]. Smartfón ako inteligentné zariadenie disponuje širokým spektrom funkcionality vrátane dotykového vstupu, hlasového ovládania, a rôznej senzorickej bázy (Obr.10). Vzhľadom na výstupy je možné podávať vizuálnu, haptickú a zvukovú spätnú väzbu.

Komunikácia medzi smartfónom a rozhraním webového klienta je riadená prostredníctvom servera. Úlohou webového klienta je len zobrazovanie / vykresľovanie vizuálnych zmien vo virtuálnom prostredí. Celý proces ovládania a výpočtov

interakcie je riadený práve na strane smartfónu, ktorý webového klienta týmto spôsobom odľahčuje výkon webového klienta (XR systému). Rovnako je možné smartfón prepájať s akýmkoľvek XR systémom, nakoľko ich kompatibilita nie je úzko viazaná.



Obr. 10 Diagram viacúčelového používateľského rozhrania.

VI. EXPERIMENTÁLNE OVERENIE ADAPTÍVNYCH ROZHRAŇÍ

Po finalizácii implementácie riešení boli vykonané experimenty zamerané na overenie výkonnosti a použiteľnosti adaptívnych rozhraní.

A. Overenie latencií pri používaní inteligentného viacúčelového rozhrania

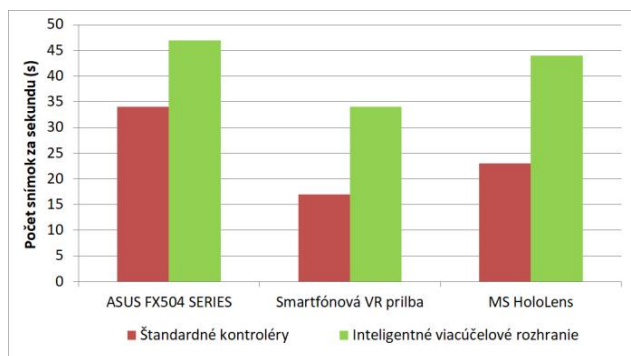
Pri realizácii experimentu [11] boli použité hardvérové prostriedky : MS HoloLens, notebook ASUS FX504 SERIES, a Smartfónová VR prilba ESPERANZA EGV300R spoločne s mobilným zariadením SAMSUNG J5 2017 SM-J530F. Inteligentné viacúčelové rozhranie bolo spúšťané pomocou druhého mobilného zariadenia SAMSUNG J5 2017 SM-J530F.

Zámerom experimentu bolo overenie latencií rozhraní s používateľským zariadením (Obr. 11).

V prvej fáze experimentu boli použité štandardné kontroléry (ovládače), ktoré sú súčasťou klientských zariadení (ASUS FX504 SERIES : klávesnica a myš, MS HoloLens : clicker, Smartfón : Experanza VR GamePad).

V druhej fáze boli štandardné kontroléry vymenené za viacúčelové inteligentné rozhranie, spustené na smartfóne. V oboch prípadoch sa porovnávali časy odozvy, medzi vstupnou akciou ovládača a zobrazením vizuálnej zmeny na používateľskom zariadení. Meranie sa v každom z prípadov vykonávalo v počte 1000 replikácií.

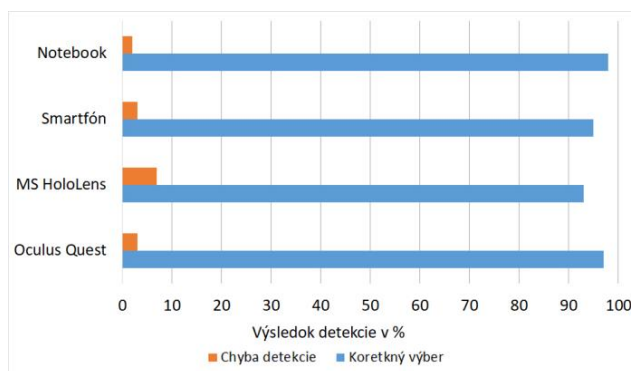
Z výsledkov meraní je viditeľné, že priemerné latencie pri používaní viacúčelového inteligentného rozhrania boli v každom prípade výrazne nižšie. V rámci výsledku je možné konštatovať, že oddelením výpočtov interakcií od klientskeho zariadenia narastal jeho výkon, v dôsledku ktorého sa znižovali latencie spôsobované predošlou záťažou.



Obr. 11 Porovnanie latencií rozhraní.

B. Overenie presnosti detekcie vstupných XR zariadení

Nasledujúci experiment sa zaoberal presnosťou detekcie vstupov XR zariadení pri používaní viacpoužívateľského adaptívneho rozhrania. V rámci experimentu boli aplikované nasledujúce zariadenia: notebook ASUS FX504 SERIES, smartfón Xiaomi Redmi Note 7 64GB, MS HoloLens, Oculus Quest 1. Počas experimentu sa každé zo zariadení pripájalo ku zdieľanému virtuálnemu prostrediu v počte 1000 replikácií. Úlohou adaptívneho rozhrania bolo rozpoznať typ vstupného zariadenia na základe jeho periférií. Výsledky zobrazené v grafe (Obr. 12) uvádzajú percentuálne vyhodnotenie presnosti detekcie vyplývajúcej z celkového počtu vykonaných replikácií. V prípade smartfónu a MS HoloLens boli zaznamenané vyššie odchýlky detekcie, ktoré mohli byť spôsobené latenciou zariadenia pri pripájaní sa k webovému serveru. Napriek uvedeným rozdielom sa v každom prípade úroveň detekcie pohybovala nad 90%.



Obr. 12 Porovnanie presnosti detekcie XR zariadení.

VII. ZÁVER

V uvedenom článku sme prezentovali rozšírenie systému kolaboratívnej virtuálnej reality o podporu technológií XR. Za účelom dosiahnuť širokú podporu používateľských rozhraní a zariadení je potrebné vyvíjať a zdokonaľovať adaptívne rozhrania systémov. Adaptívne rozhrania sa podpisujú k redukcii počtu rozhraní na stranách používateľov. Odstránenie redundantných rozhraní prispieva k zvyšovaniu výpočtového

výkonu používateľských zariadení. Tým je možné výpočtové prostriedky uvoľniť pre zdokonalenie detailov interakcie a virtuálneho prostredia. Výsledky experimentov vykonaných v tomto článku potvrdzujú túto skutočnosť. V rámci budúceho vývoja predpokladáme zdokonaľovanie adaptívnych rozhraní s podporou rozsiahleho spektra používateľských rozhraní a interakcie.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol s podporou grantovej agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-16-0202.

LITERATÚRA

- [1] D., Geszten, A., Komlódi, K., Hercegfı, B., Hámornik, A., Young, M., Köles, & W., Lutters. (2018). A content-analysis approach for exploring usability.
- [2] G., Margetis, G., Papagiannakis, & C., Stephanidis. (2019). Realistic natural interaction with virtual statues in x-reality environments.
- [3] C., Anthes, R., García-Hernández, M., Wiedemann, & D., Kranzlmüller.(2016). State of the art of virtual reality technology. In *2016 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–19).
- [4] A., Febretti, A., Nishimoto, V., Mateevitsi, L., Renambot, A., Johnson, & J., Leigh. (2014). Omegalib: A multi-view application framework for hybrid reality display environments. In *2014 IEEE Virtual Reality (VR)* (pp. 9–14).
- [5] M., Hudák, Š., Korečko, & B., Sobota, (2020). LIRKIS Global Collaborative Virtual Environments: Current State and Utilization Perspective. *Open Computer Science*, *11(1)*, 99–106.
- [6] T., Nguyen, & T., Duval. (2014). A survey of communication and awareness in collaborative virtual environments. In *2014 International Workshop on Collaborative Virtual Environments (3DCVE)* (pp. 1–8).
- [7] M., Hudák, (2020). Extension of Web-based Collaborative Virtual Environments for Mixed Reality Interfaces. In *SCYR 2020*. (pp. 97-98).
- [8] T., Piumsomboon, A., Day, B., Ens, Y., Lee, G., Lee, & M., Billinghamurst. (2017). Exploring enhancements for remote mixed reality collaboration. In *SIGGRAPH Asia 2017 Mobile Graphics & Interactive Applications* (pp. 1–5).
- [9] M., Hudák, Š., Korečko, B., Sobota. LIRKIS Global Collaborative Virtual Environments: Current State and Utilization Perspective. In: *Open Computer Science*,2020, 11(1), pp.99-106.
- [10] M., Hudák, M., Sivý.Web-based collaborative virtual environments to support cross-platform access, In: *Poster 2019 International student scientific conference*, Prague, 2019, pp.178-182.
- [11] M., Hudák, Š., Korečko, B., Sobota. Enhancing team interaction and cross-platform access in web-based collaborative virtual environments. In: *2019 IEEE 15th International Scientific Conference on Informatics*, IEEE 2019, pp.171-176.
- [12] A., García, T., Fernando, D., Roberts, C., Bar, M., Cencetti, W., Engelke, & A., Gerndt. (2019). Collaborative virtual reality platform for visualizing space data and mission planning. *Multimedia Tools and Applications*, *78(23)*, 33191–33220.
- [13] S., Khalid, S., Ullah, A., Alam, & F., Din. (2016). Optimal latency in collaborative virtual environment to increase user performance: A survey. *International Journal of Computer Applications*, *142(3)*, 35–47.
- [14] N., Capece, U., Erra, G., Losasso,.(2019). Design and Implementation of a Web-Based Collaborative Authoring Tool for the Virtual Reality. (pp. 603-610).
- [15] C., Fleury, T., Duval, V., Gouranton, & B., Arnaldi. (2010). A new adaptive data distribution model for consistency maintenance in collaborative virtual environments.
- [16] K., Chow, C., Coyiuto, C., Nguyen, & D., Yoon. (2019). Challenges and Design Considerations for Multimodal Asynchronous Collaboration in VR. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, *3(CSCW)*, 1–24.
- [17] O., Kipouridis, M., Roidl, M., Röschinger, M., Hompel, & W., Günthner. (2016). Collaborative design of material handling systems using distributed virtual reality environments. In *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality* (pp. 609–620).
- [18] F., Gullá, S., Ceccacci, M., Germani & L., Cavalieri. (2015). Design adaptable and adaptive user interfaces: a method to manage the information. In *Ambient Assisted Living* (pp. 47–58). Springer.
- [19] M., Hudák, Š., Korečko, B., Sobota. Hudák, M., Korečko, Š., & Sobota, B. (2020, September). Advanced User Interaction for Web-based Collaborative Virtual Reality. In: *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*. IEEE 2020, pp.343-348.
- [20] M., Hudák, M., Sivý, & B., Sobota. (2021). Uniform smartphone controller for web-based virtual reality purposes . In *Acta Electrotechnica et Informatica. - Košice (Slovensko) : Fakulta elektrotechniky a informatiky..*

Výskum využitia EEG signálov na detekciu rečovej aktivity

Marianna Koctúrová

Dept. of Electronics and Multimedia Communications
FEI TU of Kosice
Kosice, Slovak Republic
marianna.kosturova@tuke.sk

Jozef Juhár

Dept. of Electronics and Multimedia Communications
FEI TU of Kosice
Kosice, Slovak Republic
jozef.juhar@tuke.sk

Abstract—V tejto práci je popísaný výskum detekcie reči pomocou signálov elektroencefalografie, ktoré obsahovali informácie o mozgovej aktivite z produkcie reči a mozgovej aktivity vyvolanej vizuálnou stimuláciou. Výskum bol uskutočnený pomocou štyroch dobrovoľných subjektov, ktorým boli predkladané vizuálne stimuly, na ktoré reagovali rečou. Výskum využíva na klasifikáciu EEG signálov doprednú a konvolučnú neurónovú sieť, pomocou ktorých boli vytvorené modely detekcie reči s výsledkom miery F1 73,30% pre prvú neurónovú sieť a 84,39% pre druhú neurónovú sieť. Veríme, že náš vedecký príspevok môže viesť k lepšiemu rozpoznávaniu reči pomocou na BCI systémov.

Index Terms—Automatické rozpoznanie reči, akustické modely, čiastočne-dohľadové tréningovanie, bez-dohľadové tréningovanie, neurónové siete, klasifikácia

I. ÚVOD

Pochopenie všeobecných funkcií ľudského mozgu a vzťahov medzi mozgom a správaním je jednou z dôležitých znalostí potrebných k pokroku pri vytváraní systémov rozhrania mozog-počítač. Rozhranie mozog-počítač (z angl. Brain Computer Interface, skr. BCI), je hardvérový a softvérový komunikačný systém, umožňujúci využiť mozgovú aktivitu na riadenie počítačových aplikácií alebo externých zariadení bez použitia klasických výstupných kanálov mozgu, ktorými sú periférne nervy a svaly. Medzi najrozšírenejšie BCI technológie v súčasnosti patrí elektroencefalograf (EEG). Mobilné EEG zariadenia prinášajú možnosť vytvorenia BCI systému využiteľného v bežnom živote. Avšak vytvorenie takéhoto systému pre masový trh si ešte vyžaduje vyriešenie mnohých základných problémov.

Výskum opísaný v tomto článku bol zameraný na analýzu rečovú aktivitu s využitím EEG signálov. Práca vychádza z predpokladov, že ľudská reč je generovaná v rečových oblastiach mozgu, pričom na tvorbe reči sa podieľajú aj signály z ďalších oblastí mozgu, ako napríklad sluchová oblasť pre zapojenie zvukového vzoru slova, alebo motorická na ovládanie artikulačných orgánov. Predpokladom pri nahrávaní EEG signálov bolo, že pri generovaní slova môže mozog aktivovať nervové prepojenia aj ďalších oblastí, kde môže byť uložená subjektívna podoba slova a touto oblasťou môže byť zrková oblasť mozgu. Vo verbálnej komunikácii mozog využíva zrkovú oblasť čím urýchľuje generovanie slov. Tieto hypotézy sa opierajú o štúdiu [1], ktorá uvádza, že vizuálny stimul môže generovať tzv. imaginárnu reč. Na základe toho je

možné predpokladať, že predloženie vizuálneho stimulu môže aktivovať rečové oblasti mozgu. V práci bol navrhnutý nový prístup k problematike reči zahrňajúci použitie EEG signálov nahratých počas rečovej aktivity a s použitím vizuálnych stimulov, ktoré mali podnietiť vznik spomínanej rečovej aktivity. Navrhnuté riešenie detekcie reči bolo založené na použití doprednej a konvolučnej neurónovej siete.

II. METÓDY A PROSTRIEDKY PRE VYTvoreNIE EEG DATABÁZY

A. Nahrávacie EEG zariadenie

Nahrávanie databázy EEG signálov pre výskum bolo realizované pomocou náhlavnej súpravy *Ultracortex Mark III* EEG od spoločnosti OpenBCI. Použitý EEG zariadenie je zostavené tak, že umožňuje snímať signál na povrchu pokožky hlavy na 16 kanáloch, ktoré môžu byť umeistené na 35 možných pozíciách, určených medzinárodným konfiguračným systémom 10-20 []. EEG signál je zaznamenávaný pomocou elektród, pripojených k doske *Cyton* OpenBCI a modulu *Daisy* OpenBCI. Doska *Cyton* má 8-kanálovú a 32-bitový procesor. Základom platformy OpenBCI *Cyton* je mikrokontrolér na báze Arduino, ktorý poskytuje vysokú rýchlosť spracovania. Doska dokáže komunikovať s počítačom bezdrôtovo pomocou technológie BLE (Bluetooth Low Energy). Modul *Daisy* je rozšírením dosky *Cyton* a umožňuje pripojenie ďalších 8 kanálov. Prepojená doska *Cyton-Daisy* tak nahráva dáta zo 16 kanálov so vzorkovacou frekvenciou 125 Hz.

Pre nahrávanie spomínaným EEG zariadením bolo zvolené použitie suchých elektród od spoločnosti *Datwayler* [2]. Použitý elektródy sú označované ako tzv. mäkké elektródy, ktoré sú vyrobené z konduktívneho elastického polyméru a ich kontaktné časti sú pokryté vodivou kovovou vrstvou. Použitý elektródy zabezpečujú vyšší komfort počas nahrávania. Vďaka použitému elastickému materiálom sú elektródy mäkké a poddajné, čím sa lepšie prispôbia povrchu hlavy.

B. Konfigurácia elektród pre nahrávanie EEG signálov

Nahrávanie EEG signálov pomocou zariadenia *Ultracortex Mark III* bolo realizované na 16 koanáloch, ktoré boli rovnomerne rozmiestnené na povrchu hlavy, tak aby bolo

zabezpečené nahratie aktivity hlavných oblastí mozgu. Konfigurácia suchých elektród pozostávala zo 16 pozícií umiestnených na zaznamenanie signálov v rôznych oblastiach mozgu. Použité kanály pre záznam EEG boli umiestnené na pozíciách: Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, C3, C4, T3, T4, P3, P4, T5, T6, O1, O2 (na základe medzinárodného systému 10/20 [3]). Táto konfigurácia je znázornená na obrázku 1 spolu s pohľadom na rozmiestnenie jednotlivých mozgových oblastí.

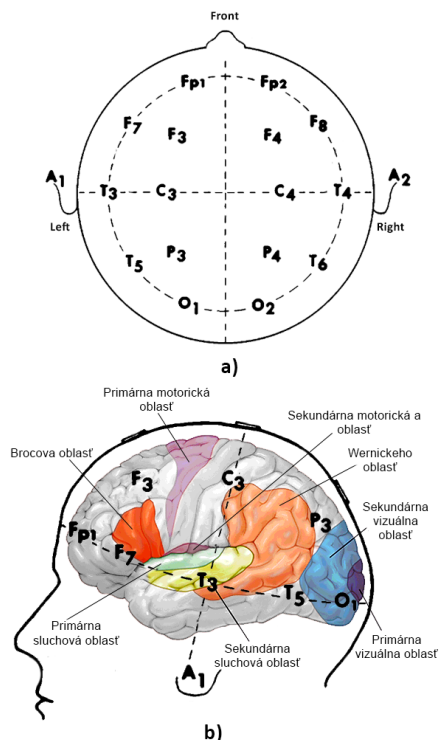


Fig. 1. a) Konfigurácia elektród použitá pri nahrávaní EEG signálov b) Laterálny pohľad na konfiguráciu elektród, s pohľadom na vyznačené mozgové oblasti (rečové, motorické, sluchové a vizuálne)

C. Nahrávanie EEG databázy

Pre experiment bol navrhnutý experimentálny protokol na nahratie mozgovej aktivity zúčastnených subjektov. Protokol bol navrhnutý tak aby sa počas nahrávania aktivovali zrakové a rečové oblasti mozgu subjektov. Pre účely experimentu boli nahraté EEG signály 4 subjektov. Subjekty počas nahrávania sedeli bez vykonávania zbytočných pohybov, pred subjektom bola umiestnená obrazovka na ktorej boli prezentované obrazové podnety. Úlohou subjektov bolo sledovať obrazovku, sústrediť sa na prezentované podnety a nahlas ich pomenovať. Obrazové podnety pozostávali s jednoducho identifikovateľných farieb. Bolo vybraných týchto 10 farieb: žltá, červená, modrá, zelená, oranžová, fialová, hnedá, ružová, biela a sivá. Nahrávanie EEG aktivity bolo realizované v dvoch reláciách, v prvej boli subjektom prezentované farby ako obrázky a v druhej relácii boli prezentované farieb ako text (názvy farieb). Úlohou subjektov bolo nahlas vysloviť názov zobrazenej farby alebo v prípade druhej relácie prečítať

text na obrazovke. Jednotlivé farby sa na obrazovke striedali v náhodnom poradí.

Predkladanie obrazových podnetov počas nahrávania EEG signálov malo aktivovať vizuálnu oblasť mozgu pred aktiváciou rečových oblastí. Počas striedania jednotlivých farieb sa zobrazila čierna obrazovka, ktorou bolo subjektu oznámená zmena zobrazenia farby. Každá farba bola na obrazovke prezentovaná 4 sekundy a pauza medzi striedaním farieb trvala 1 sekundu. Dĺžka nahrávania jednej relácie trvala viac ako 10 min. Tabuľka I obsahuje informácie o databáze EEG nahrávok. Stĺpec “Relácia“ poukazuje na typ stimulu, ktorý bol počas nahrávania prezentovaný subjektu. Stĺpec “Počet slov“ odkazuje na počet slov vyslovených v danej relácii.

TABLE I
DATABÁZA SIGNÁLOV REČOVEJ AKTIVITY.

Číslo subjektu	Relácia	Dĺžka EEG nahrávky	Počet slov
1	Obraz	10:27,239	124
1	Text	10:41,664	118
2	Obraz	11:29,715	122
2	Text	10:25,081	125
3	Obraz	11:50,156	131
3	Text	10:34,922	120
4	Obraz	11:09,171	118
4	Text	11:23,603	114

D. Synchronizácia EEG a audio signálu

Celá databáza experimentu pozostáva z EEG a audio signálov nahrávaných simultánne. Problémom pri nahrávaní týchto signálov bola ich časová synchronizácia. Nakoľko použité používateľské prostredie OpenBCI pre nahrávanie EEG neposkytuje možnosť pripojenia mikrofónu, synchronizácia bola realizovaná vlastným riešením. EEG signály sú ukladané do txt formátu s časový údajom zaznamenania každej vzorky. Pre nahrávanie zvuku bol vytvorený jednoduchý skript, ktorý pri spustení nahrávania audio signálu uložil presný čas spustenia nahrávania. Čas začatia nahrávania audia sa porovnal s časovými dátami EEG záznamu. Vzorky EEG nahraté pred spustením audio nahrávania boli odstránené.

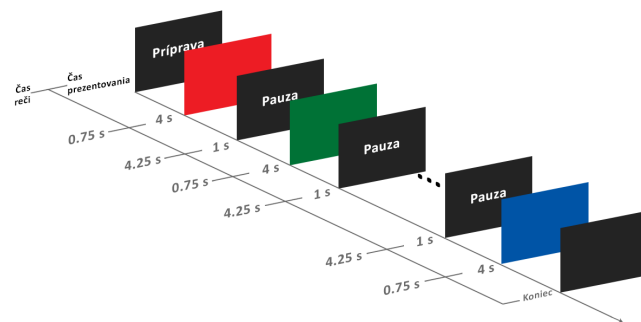


Fig. 2. Zobrazenie vizuálnych stimulov počas nahrávania EEG signálov. Os zobrazuje časové údaje prezentovania jednotlivých stimulov na obrazovke a priemerné časové údaje vyslovenia jedného slova subjektom. Prezentovanie stimulov bolo striedané s prerušeniami tvorenými čiernou obrazovkou.

III. SPRACOVANIE EEG DATABÁZY

A. Anotovanie dát a vytvorenie rečových tried

Pomocou audio nahrávok boli vytvorené rečové triedy označujúce prítomnosť reči v EEG signáloch. Prepis audio záznamov bol manuálne realizovaný v prostredí Transcriber. Pomocou prepisu nahrávky bol v prostredí Matlab vytvorený binárny signál so vzorkovacou frekvenciou 125 Hz. Jednotlivé segmenty prepisu vyslovených slov boli označené hodnotou 1, a prázdne segmenty s tichom boli označené ako 0. Dĺžka segmentu bola vynásobená vzorkovacou frekvenciou a výsledná hodnota určila počet vzoriek 1 alebo 0, ktoré boli uložené. Takouto postupnou transformáciou každého segmentu bol získaný binárny signál označujúci stav reči v EEG zázname.

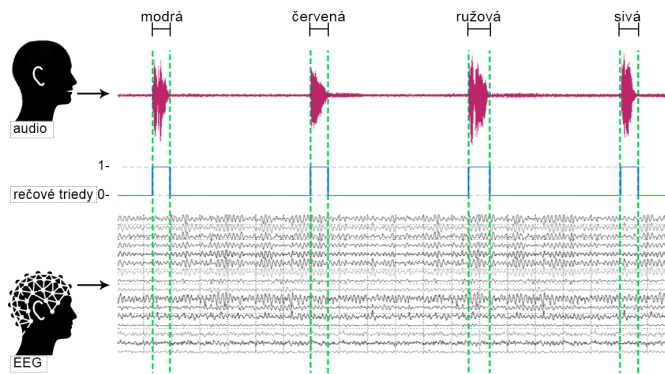


Fig. 3. Princíp vytvárania rečových tried zo zvukového záznamu. Segmentáciou rečových prejavov v zvukovom zázname boli vytvorené triedy 1 a 0, potrebné pre klasifikáciu EEG signálu

B. Vyváženie datasetu

Pri nahrávaní EEG signálov boli zúčastneným subjektom predkladané obrazové stimuly, na ktoré reagovali pomenovaním daného stimulu. Každý rečový prejav bol striedaný s dlhšou pauzou (tichom). Výslovenie jedného slova trvalo v priemere 0,75 sekundy, zatiaľ čo priemerný čas ticha medzi slovami trval v priemere 4,25 sekundy. Je zjavné, že celková dĺžka rečovej aktivity v jednej nahrávke je výrazne kratšia ako dĺžka ne-rečovej. Keďže záznam jednej relácie obsahuje okolo 120 vyslovených slov, v priemere ide o 90 sekúnd reči a približne 510 sekúnd ticha. V súhrne výrazne dominuje celková dĺžka segmentov ticha. Takáto disproporcija rečových tried môže spôsobiť chybnú klasifikáciu rečovej aktivity, ktorá by bola výrazne lepšie natrénovaná na majoritnú triedu, v tomto prípade ne-reč, čo by viedlo k vytvoreniu nefunkčného modelu detekcie reči.

Odstránenie tohto problému bolo realizované vyvážením datasetu metódou náhodného podvzorkovania majoritných tried. Náhodným algoritmom boli zo súboru rečových tried vybraté indexy majoritných tried v počte, ktorý odpovedal rozdielu medzi majoritnou a minoritnou triedou. Náhodne označené indexy určovali vzorky, ktoré boli vymazané zo súboru rečových tried aj zo súboru EEG dát. Tento proces zmenšil celkovú veľkosť datasetu, ale zabezpečil vyvážené dáta vhodné pre klasifikáciu.

C. Výber a extrahovanie príznakov

1) *Výpočet signálu s minimálnou fázou:* Jednou z inovácií predloženého experimentu je využitie minimálnej fázy signálu ako jeden z príznakov pre klasifikáciu EEG signálov. Tento príznak použitý a analyzovaný v experimente uverejnenom v publikácii [4]. Pre systém s minimálnou fázou platí, že póly a nuly jeho racionálnej prenosovej funkcie z oblasti Z ležia vo vnútri jednotkovej kružnice v komplexnej rovine. Signál minimálnej fázy je definovaný ako signál, ktorého je energia koncentrovaná v prednej časti signálu [5].

Výpočet ekvivalentného signálu s minimálnou fázou je založený na dvoch konverziách signálu pomocou rýchlej Fourierovej transformácie, čím sa pôvodný signál prevedie na jeho reálne kepstrum a následne je rekurzívnym procesom prevedený späť z reálneho kepstra.

Reálne kepstrum signálu sa získava pomocou druhej mocniny inverznej Fourierovej transformácie prirodzeného logaritmu \ln druhej mocniny magnitudy Fourierovej transformácie originálneho signálu $x(n)$ [6]. Analýzu reálneho kepstra možno vyjadriť nasledujúcim vzťahom [7]:

$$c_r(n) = \Re(\mathcal{F}^{-1}\{\ln |\mathcal{F}\{x(n)\}|^2\})^2, \quad (1)$$

kde $c_r(n)$ je reálne kepstrum. Rekurzívnym postupom možno pre originálny signál $x(n)$ nájsť ekvivalent s minimálnou fázou:

$$x_{min}(n) = \Re(\mathcal{F}^{-1}\exp[\mathcal{F}\{c_r(n)\}]). \quad (2)$$

Zo získaného ekvivalentného signálu s minimálnou fázou $x_{min}(n)$ boli v ďalších krokoch boli vypočítané príznaky, rovnako ako aj z originálneho EEG signálu.

2) *Výber ďalších príznakov:* Z pôvodného EEG signálu a z ekvivalentného signálu s minimálnou fázou boli vypočítané príznaky popisujúce niektoré ich časové a frekvenčné vlastnosti. Vybrané príznaky boli vypočítané pre rámce signálu signálu s veľkosťou 10 vzoriek, čo predstavuje 0.08 s a prekrytie rámcov bolo 50%. Výber príznakov pre experiment je založený na základe výskumov uvedených v publikáciách [8], [9], [10] a na základe experimentálnych výsledkov získaných v priebehu doktorandského štúdia [4]. Pre experiment boli vybrané nasledujúce príznaky:

- *Stredná hodnota*

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n). \quad (3)$$

- *Štandardná odchýlka*

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x(n) - \mu)^2} \quad (4)$$

- *Šikmosť*

$$Skew = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{n=1}^N (x(n) - \mu)^3, \quad (5)$$

- Špicatosť

$$Kurt = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{n=1}^N (x(n) - \mu)^4 \quad (6)$$

- Energia

$$Energy = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2 \quad (7)$$

- Výkon

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt \quad (8)$$

- Stredná kvadratická hodnota

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|^2} \quad (9)$$

- Shannonova entropia

$$Shannon = \sum_{n=1}^N x(n) \log_2 x(n) \quad (10)$$

- Spectrálny tok

$$Spectral\ flux = \sum_{k=1}^{M/2} (S_t(k) - S_{t-1}(k))^2, \quad (11)$$

kde $S_t(k)$ a $S_{t-1}(k)$ sú normalizované magnitúdy z Fourierovej transformácie pre rámeček t a predchádzajúci rámeček $t - 1$ [10].

IV. NÁVRH METÓD KLASIFIKÁCIE EEG SIGNÁLOV

EEG signály boli klasifikované pomocou dvoch neurónových sietí: Dopredná neurónová sieť a Konvolučná neurónová sieť. Vstupnými dátami pre tréning modelov detekcie reči pomocou neurónových sietí boli EEG signály definované príznakmi vypočítanými pre 16 pôvodných kanálov a pre 16 kanálov ekvivalentných EEG signály s minimálnou fázou, čím sa počet vstupných kanálov rozšíril na 32, pre ktoré bolo získaných 9 príznakov: *stredná hodnota*, *standardná odchýlka*, *šikmosť*, *špicatosť*, *energia*, *výkon*, *stredná kvadratická hodnota*, *shannonova entropia* a *spectrálny tok*. Konečný rozmer vstupných dát klasifikácie bol $N \times 288$, kde N je počet vzoriek v čase.

Výsledky detekcie reči boli v experimente posudzované najmä pomocou metrick presnosť a miera F1. Miera F1 bola pre tento výskum považovaná za najdôležitejšie meradlo, pretože cieľom výskumu bolo nájsť pozitívne výsledky stavu rečovej aktivity (ktorá bola označená triedou 1). Presnosť a miera F1 sú definované na základe získaných hodnôt výsledkov, ktoré boli zastúpené štyrmi stavmi predikcie:

- 1) pravdivo pozitívna - TP (angl. true positive),
- 2) falošne negatívna - FN (angl. false negative),
- 3) falošne pozitívna - FP (angl. false positive),
- 4) pravdivo negatívna - TN (angl. true negative).

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}. \quad (12)$$

$$F_1 = \frac{TP}{TP + \frac{1}{2}(FP + FN)} \quad (13)$$

A. Návrh doprednej neurónovej siete

Prvou metódou klasifikácie rečových a ne-rečových stavov v EEG signáloch bola zvolená dvojvrstvová dopredná neurónová sieť (angl. Feed-forward neural network, skr. FFNN). Sieť bola vytvorená a trénovaná v programovom prostredí Matlab. Výstupné triedy boli tvorené jednorozmerným vektorom obsahujúcim hodnoty 1 a 0. Pred vstupom do siete boli dáta predspracované pomocou *min-max* normalizácie, ktorou bol vstupný signál škálovaný do intervalu $[-1, 1]$. Normalizácia vstupného signálu jednotlivých kanálov x_n bola realizovaná podľa vzťahu:

$$x_{norm} = \frac{(a - b)}{x_{max} - x_{min}} * (x_n - x_{min}) - b \quad (14)$$

kde $a = 1$ a $b = -1$ sú hodnoty normalizácie, x_{min} je minimálna hodnota signálu x a x_{max} zodpovedá maximálnej hodnote signálu x_n .

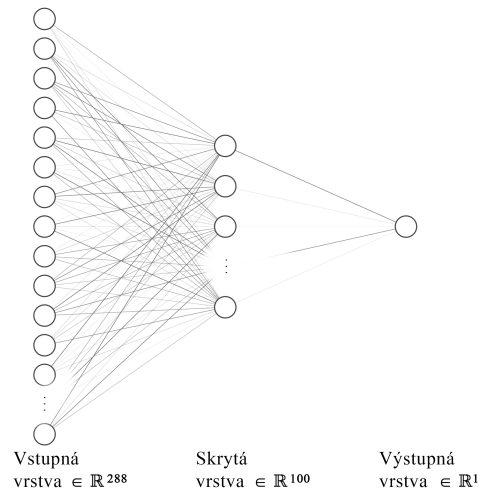


Fig. 4. Architektúra doprednej neurónovej siete

Neurónová sieť pozostávala z jednej skrytej vrstvy s aktivačnou funkciou *tanh* a z binárneho výstupu so *sigmoidálnou* funkciou. Sieť bola trénovaná so škálovanou konjugovanou gradientovou spätnou propagáciou, s binárnou krížovou entropiou ako chybovou funkciou. Prahové hodnoty výstupných pseudopravdepodobností boli s rozhodovacím prahom 0,5. Prvú vrstvu siete tvorilo 100 skrytých neurónov [11].

Pre uvedenú klasifikáciu boli vyslovené slová považované za jednu triedu. V experimente boli vytvorené modely s krížovou evalváciou medzi subjektami. Bolo vytvorených niekoľko datasetov s rozdielnym zložením EEG nahrávok. Pre každý dataset bolo vygenerovaných 100 modelov použitím toho istého nastavenia siete, kde sa váhy modelu inicializovali náhodne. Následne bol vybraný jeden model, ktorý vykazoval najlepšie výsledky.

1) *Výsledky modelov FFNN*: Modely detekcie reči boli trénované na vstupných dátach tvorených zmiešanými date-setmi od troch rôznych subjektov a boli rozdelené na 80% na trénovanie 20% na validáciu modelu. Testovanie modelu bolo uskutočnené na dataseze zvyšného 4. subjektu. Tabuľka II uvádza výsledky testovania vytvorených modelov a priemer výsledkov. Posledný riadok tabuľky uvádza výsledok modelu trénovaného na zmiešanom dataseze zloženom z EEG signálov všetkých 4 subjektov, ktorý bol rozdelený na 70% trénovacích dát, 15% validačných dát a 15% testovacích dát.

TABLE II
VÝSLEDKY KRÍŽOVÝCH MODELOV DETEKIE REČI

Číslo subjektov pre trénovanie modelu	Číslo subjektu pre testovanie modelu	Presnosť%	F1%
1, 2, 3	4	73.71	79.50
2, 3, 4	1	62.14	73.87
1, 3, 4	2	57.48	62.25
1, 2, 4	3	72.56	77.56
Priemer		66.47	73.30
1, 2, 3, 4	15% datasetu	81.51	83.81

Výsledky ukázali, že najlepší model bol vytvorený na dataseze zloženom z EEG signálov subjektov 1, 2, 3, ktorý bol testovaný na dátach subjektu 4. Tento model bol schopný detegovať reč s mierou F1 79,5% a s presnosťou 73,71%.

Posledný model vytvorený na tejto neurónovej sieti pozostávajúci zo dát všetkých subjektov v trénovacom procese mal najlepší výsledok spomedzi vytvorených klasifikácií. Miera F1 dosiahla hodnotu 83,81% a presnosť 81,51% pre tento model. Tieto vyššie hodnoty výsledkov boli očakávané, keďže model bol trénovaný a testovaný na oddelených množinách rovnakého datasetu.

B. Návrh hlbkej konvolučnej neurónovej siete

V práci bola na riešenie úlohy detekcie reči navrhnutá aj konvolučná neurónová sieť (angl. Convolutional Neural Network, skr. CNN), ktorej ilustračný model je zobrazený na obrázku 5. Návrh architektúry tejto siete bol čiastočne inšpirovaný experimentom publikovaným v článku v [12]. Vstupné dáta pre CNN boli rovnaké ako v predchádzajúcej klasifikácii, taktiež rozdelenie dát na trénovaciu, validačnú a testovaciu množinu bolo realizované rovnako ako v predchádzajúcej klasifikácii. Pred vloženíom do neurónovej siete boli dáta predspracované pomocou *min-max* normalizácie (ako v kap. IV-A). Sieť bola navrhnutá pomocou programovacieho jazyka Python s použitím knižníc *NumPy*, *pandas*, *TensorFlow* a *scikit-learn*. Navrhovaná architektúra CNN bola trénovaná s *rozptýlenou kategorickou krížovou entropiou* (angl. *sparse categorical cross entropy*) ako chybovou funkciou.

Architektúra siete je organizovaná ako séria sekvenčne skladaných operácií. Vstupnou vrstvou sú EEG signály, ďalšie vrstvy architektúry CNN sú konvolučné vrstvy s aktivačnou funkciou *ReLU*, funkcie výberu maxima tzv. *max-pooling*, *plne prepojená vrstva* (angl. *Fully Connected*), a výstupná vrstva. Bola použitá jednorozmerná CNN, pretože vstupné signály

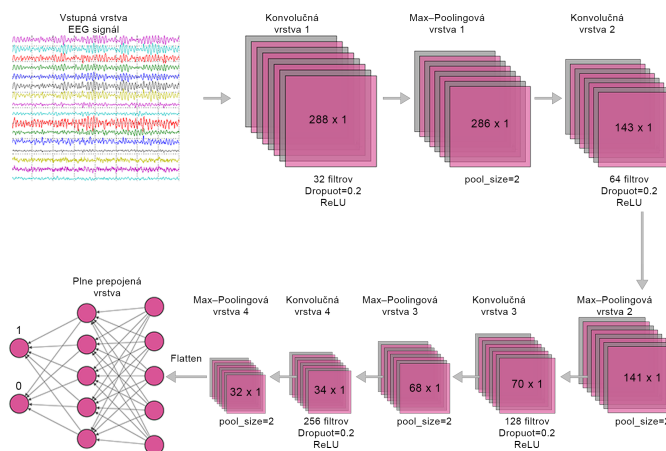


Fig. 5. Architektúra konvolučnej neurónovej siete

majú charakter jednorozmerného vektora, ktorý reprezentuje jeden časový interval dĺžky 0,08 s. Dáta boli pred začatím procesu trénovaní modelu ešte rozdelené do menších dávok bolo vykonané nastavením veľkosti parametra *batch* = 5.

Váhy filtra použité v tejto architektúre boli inicializované náhodne. Na optimalizáciu je použitá stochastická metóda optimalizácie *Adam*. Do neurónovej siete bola implementovaná metóda "dropout", ktorá minimalizuje preučenie modelu nazývané "overfitting". *Dropout* reguluje sieť tak, že v procese trénovaní siete sa určitá časť výstupov zahodí teda nastaví na nulu. Podiel zahodených neurónov bol nastavený na 20%. Táto operácia bola vložená za všetky konvolučné vrstvy. Dôležitou súčasťou neurónovej siete je aktivačná funkcia, v tejto architektúre boli použité aktivačné funkcie *ReLU* a *Sigmoid*. *ReLU* je použitá pre všetky konvolučné vrstvy a *Sigmoid* je použitá v poslednej plne prepojenej vrstve. Vo výstupnej vrstve navrhutej konvolučnej sieti sú dva výstupné neuróny, pričom každý z nich produkuje pseudo-pravdepodobnosť triedy 1 alebo triedy 0. Proces trénovaní siete bol cielene zastavený pred tým ako začala validačná chyba rásť v troch po sebe idúcich epochách.

C. Experimentálne výsledky modelov hlbkej konvolučnej neurónovej siete

Rovnako ako pri FFNN aj pri trénovaní CNN siete bolo vytvorených 100 modelov detekcie reči. Z týchto modelov bol vybratý jeden, s najlepším výsledkom miery F1 v procese testovania modelu. Dosiahnuté výsledky sú zoradené v tabuľke III. Najlepší výsledok detekcie reči bol opäť dosiahnutý na a dataseze zloženom z EEG signálov subjektov 1, 2, 3, ktorý bol testovaný na dátach subjektu 4. Tento model bol schopný detegovať reč s mierou F1 84,39% a presnosťou 81,47%.

Posledný vytvorený model, ktorý bol trénovaný na zmiešanom dataseze zloženom z EEG signálov všetkých 4 subjektov, rozdelený na 70% trénovacích dát, 15% validačných dát a 15% testovacích dát. Podľa očakávania mal najlepší výsledok spomedzi všetkých vytvorených medzi-subjektových

klasifikácií. Pre tento model bol výsledok miery F1 87,83% a presnosti 86,90%.

TABLE III
VÝSLEDKY KRÍŽOVÝCH MODELOV CNN DETEKcie REČI

Číslo subjektov pre tréovanie modelu	Číslo subjektu pre testovanie modelu	Presnosť%	F1%
1, 2, 3	4	81.47	84.39
2, 3, 4	1	83.32	80.85
1, 3, 4	2	55.81	71.65
1, 2, 4	3	76.67	75.48
Priemer		74.31	78.09
1, 2, 3, 4	15% datasetu	86.90	87.83

D. Porovnanie výsledkov detekcie dosiahnutých pomocou doprednej a konvolučnej neurónovej siete

Parametre modelov neurónových sietí vytvorených v tejto práci sú nasledujúce: celkový počet váh v CNN bol 137 794, zatiaľčo celkový počet váh FFNN, ktorá obsahovala 100 skrytých neurónov bol 29 102. Výsledky jednotlivých modelov sú porovnané na základe miery F1 v tabuľke IV, ktorá uvádza absolútne hodnoty rozdielov miery F1. Z porovnania výsledkov v tabuľke vyplýva že konvolučná sieť detegovala reč v priemere o 4,80% lepšie než dopredná neurónová sieť v pre modely s krížovou evaluáciou. Pri posledných modeloch, v ktorých bol celý dataset zložený z dát 4 subjektov a rozdelený náhodne na tréovaciu, validačnú a testovaciu množinu, bola CNN úspešnejšia o 4,02%.

TABLE IV
ABSOLÚTNY ROZDIEL VÝSLEDKOV TESTOVANIA MODELOV FFNN A CNN

Číslo subjektov pre tréovanie modelu	Číslo subjektu pre testovanie modelu	Absolútny rozdiel F1% v prospech CNN
1, 2, 3	4	4.89
2, 3, 4	1	6.98
1, 3, 4	2	9.4
1, 2, 4	3	-2.08
Priemer		4.80
1, 2, 3, 4	15% datasetu	4.02

V. ZÁVER

Výskumná práca preukázala možnosť detegovať reč pomocou mobilného EEG zariadenia. EEG signály boli pre výskumné účely nahrávané na základe zostaveného protokolu tak, aby sa v EEG signáloch objavila mozgová aktivita počas produkcie reči vyvolanej vizuálnou stimuláciou. EEG signály boli klasifikované doprednou neurónovou sieťou (FFNN) a konvolučnou neurónovou sieťou (CNN). Klasifikácia bola realizovaná na rôznych kombináciách dát EEG signálov. Pre každú kombináciu dát bolo vygenerovaných 100 modelov detekcie reči a z nich bol vybratý jeden s najlepším výsledkom miery F1. Navrhnuté klasifikačné metódy boli v poslednej časti porovnané.

Krížová evalvácia v navrhutej FFNN dosiahla lepšie výsledky, ako bolo pôvodne predpokladané. Na základe

výsledkov klasifikácie pomocou FFNN bola navrhnutá klasifikácia EEG signálov pomocou CNN. Z výsledkov uvedených v tabuľkách II a III možno odčítať, že najlepší výsledok detekcie reči bol pri oboch navrhnutých metódach klasifikácie dosiahnutý pri tréovaní modelov na datasete s konfiguráciou EEG dát subjektov 1, 2 a, 3, a boli testované na EEG dátach subjektu 4. Modely vytvorené na tejto konfigurácii detegovali reč s výsledkom miery F1 pre klasifikáciu FFNN 79,5% a pre klasifikáciu CNN 84,39%.

Pre ucelenie výskumu boli v navrhnutých sieťach vytvorené aj modely natréované na datasete, ktorý bol zložený z EEG signálov všetkých 4 subjektov, tento dataset bol náhodným algoritmom rozdelený na 70% tréovacích 15% validačných 15% testovacích dát. Výsledky miery F1 pre klasifikáciu reči na tomto datasete boli lepšie použitím CNN o 4%. Výsledok detekcie pre CNN bol 87,83% a pre FFNN bol 83,81%.

V práci boli navrhnuté metódy spracovania EEG signálov a dve metódy klasifikácie pomocou neurónových sietí. Výsledky klasifikácií poukazujú na to, že reč je možné detegovať pomocou EEG signálov. Dosiahnuté výsledky môžu byť použité pri ďalšom skúmaní súvislosti EEG signálov a reči, napríklad pri tvorbe systému rozpoznania reči priamo z EEG signálov alebo na zlepšenie rozpoznania reči v hlučnom prostredí.

ACKNOWLEDGMENT

Táto 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 1/0753/20 a the Cultural and Educational Grant Agency of the Slovak Republic project number KEGA 009TUKE-4-2019.

REFERENCES

- [1] M. Villena-González, "The train of thought: How our brain responds to the environment whilst we are thinking in terms of mental images or an inner voice," *Ciencia Cognitiva*, vol. 10, no. 1, pp. 23–26, 2016.
- [2] "www.datwyler.com," 2019.
- [3] V. Jurcak, D. Suzuki, and I. Dan, "10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: their validity as relative head-surface-based positioning systems," *Neuroimage*, vol. 34, no. 4, pp. 1600–1611, 2007.
- [4] M. Kocúrová and J. Juhár, "Speech activity detection from eeg using a feed-forward neural network," in *10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*, p. 147, 2019.
- [5] M. P. Lamoureux, P. C. Gibson, and G. F. Margrave, "Minimum phase and attenuation models in continuous time,"
- [6] A. D. Smith and R. J. Ferguson, "Minimum-phase signal calculation using the real cepstrum," *CREWES Res. Report*, vol. 26, no. 72, 2014.
- [7] K. Bhakta, N. Sikder, A. Al Nahid, and M. M. Islam, "Fault diagnosis of induction motor bearing using cepstrum-based preprocessing and ensemble learning algorithm," in *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [8] P. Agarwal, R. K. Kale, M. Kumar, and S. Kumar, "Silent speech classification based upon various feature extraction methods," in *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 16–20, IEEE, 2020.
- [9] F. Alías, J. C. Socoró, and X. Sevillano, "A review of physical and perceptual feature extraction techniques for speech, music and environmental sounds," *Applied Sciences*, vol. 6, no. 5, p. 143, 2016.
- [10] L. Boubchir, B. Daachi, and V. Pangracious, "A review of feature extraction for eeg epileptic seizure detection and classification," in *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 456–460, IEEE, 2017.

- [11] M. Koctúrová and J. Juhár, "A novel approach to eeg speech activity detection with visual stimuli and mobile bci," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 674, 2021.
- [12] B. B. Das, P. Kumar, D. Kar, S. K. Ram, K. S. Babu, and R. K. Mohapatra, "A spatio-temporal model for eeg-based person identification," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 19, pp. 28157–28177, 2019.

Tracing Relations Between Tests and Production Source Code

Matej Madeja

Department of Computers and Informatics
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
Email: mate.madeja@tuke.sk

Jaroslav Porubán

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

Abstract—One of the most common questions of developers in an unknown source code is: “What does this code do?”. This question is closely related to the program comprehension, which is crucial during the creation of reliable software. Because tests are part of modern agile iterative development, they contain up-to-date information about the expected functionality of the production code. In this work we solve problems of Unit Under Test (UUT) and test case identification and localization in an unknown source code. Through investigation of multiple open-source repositories we measure accuracy of existing methods of UUT identification and propose a new method of test case identification and localization. Our results show, that the body of test case and the body of UUT method use very similar vocabulary and use of Natural Language Processing (NLP) techniques could be used only as support during UUT identification, due to low accuracy reached of 33%. The most significant result is script for test case identification and localization in an unknown code proposal, with 97% accuracy and speed of 3.32ms per kilo lines of code.

Keywords—Program comprehension, unit under test identification, test case identification, testing frameworks, GitHub mining.

Abstrakt—Jednou z najbežnejších otázok vývojárov v neznámom zdrojovom kóde je: „Čo robí tento kód?“. Táto otázka úzko súvisí s pochopením programu, ktoré je rozhodujúcim faktorom pri tvorbe spoľahlivého softvéru. Testy sú súčasťou moderného agilného iteratívneho vývoja a obsahujú aktuálne informácie o očakávanej funkcionalite produkčného kódu. V tejto práci riešime problémy identifikácie testovanej jednotky a lokalizácie testov v neznámom zdrojovom kóde. Skúmaním viacerých repozitárov s otvoreným zdrojovým kódom sme zmerali presnosť existujúcich metód identifikácie testovanej jednotky a navrhli sme novú metódu identifikácie a lokalizácie testovacích prípadov. Naše výsledky ukazujú, že telo testovacej a testovanej metódy používajú veľmi podobnú slovnú zásobu a použitie techník spracovania prirodzeného jazyka je možné použiť iba ako podporu pri identifikácii testovanej jednotky, kvôli dosiahnutej nízkej presnosti 33%. Najvýznamnejším výsledkom je vytvorenie skriptu na identifikáciu a lokalizáciu testovacích prípadov v neznámom zdrojovom kóde s presnosťou 97% a rýchlosťou 3,32 ms na tisíc riadkov kódu.

KLúčové slová—Pochopenie programov, identifikácia testovanej jednotky, identifikácia testov, testovacie frameworky, določenie informácií z GitHub-u.

I. INTRODUCTION

The world is increasingly automated, either in industry or everyday life. Software engineering is a critical part of this

automation because the software controls how this automation works, thus directly affects people’s lives. Software deals with many issues from the perspective of reliability. It is difficult to develop and maintain because it is managed by dozens of people, during years or decades in the range of millions of lines of code. This means that developers are replaced during this time period and the source code has huge dimensions. A serious problem is that developers take over strange code which they do not comprehend. It is also beyond human power for man to fully comprehend such a large-scale project.

According to LaToza and Myers [9], developers often ask questions about the code that are difficult to answer. The most common questions are: “What does this code do?”, “What is it intended to do?” and “Why was it done this way?”. Obviously, these questions are directly related to program comprehension. If a developer does not comprehend the code, new changes cannot be reliable. There are ways that try to increase the reliability of programs, e.g. using code review or testing. However, the provision of such practices is also related to the program comprehension of another developer, either during code review or test creation. Therefore, the role of program comprehension is a very important part of software engineering.

To answer developers’ questions about the code meaning research seeks out appropriate forms, tools and methods that would make it easier to find answers to these questions. The program can be comprehended from several sources, either directly from it or from external sources which describe the functionality of the program, such as comments, documentation or specification. Source code projections, annotations, and many other techniques can be used to facilitate comprehension directly from the code. In most cases, these techniques require extra work from the developer, such as creating annotations. The advantage of source code mining is that it is directly linked to the code functionality, i.e. the information in it 100% express what the code does. In case of external sources, there is no guarantee that the information in them is certainly related to the execution of the program. For example, the documentation should be updated together with the code, but there is no guarantee of such consistency, which represents a higher risk of outdated information in it.

In this paper we summarize results of our dissertation thesis, in which we focused on external sources that support comprehension, specifically on tests, which are currently a common part of iterative development, such as agile. Because the tests are massively used in such development process they can be expected as part of the project. Today, the tests are mostly automated and are formally described. Our assumption is that we get more information about the production code from the formal description than from the informal one. When considering automated tests, they are linked to the production code and are periodically launched, therefore, the consistency with the production code should be very high. Tests are also a unique source of information, as they contain many use cases, i.e. examples of how different production code pieces work together in particular use cases. The information extracted from the tests can enrich the production code and facilitate comprehension.

Since there are many testing types, we consider their suitability for source code enrichment and focus on how strong the links between them are. There are many recommendations on how to write tests, but it is not clear how developers write tests in practice, where important information are placed as well as how to identify tests in a project, or how to find out which unit they are testing. Therefore, we addressed the following objectives:

O 1: Identify existing methods and evaluate the accuracy of automatic link creation between test case and UUT.

O 2: Identify and locate test cases in an unknown source code.

The listed objectives are crucial for meeting our long-term one of *improving program comprehension using knowledge of the structure and semantics of tests*. To use information from tests, primarily it is necessary to be able to find particular test cases in the project and identify artifacts of production code it works with.

II. POTENTIAL OF TESTS TO FACILITATE PROGRAM COMPREHENSION

This section¹ overviews use of tests as metadata source for facilitating program comprehension. Tests are used in software development to ensure software reliability. There are cases when implementation changes in one part of the code will affect other parts which can cause a breakdown in functionality. Regression tests are used for these cases and failure of such tests occurs when the developer does not understand or forget about the relations between individual parts of the code, which is a consequence of the quality of understanding of the overall application. Because tests are a common part of the Continuous Integration/Continuous Delivery (CI/CD) pipeline and contain information about the correct behavior of the program (otherwise they would be irrelevant), they could have the potential to facilitate program comprehension.

Demeyer et al. [5] suggest that the best reflection of the production code are tests that must remain consistent with

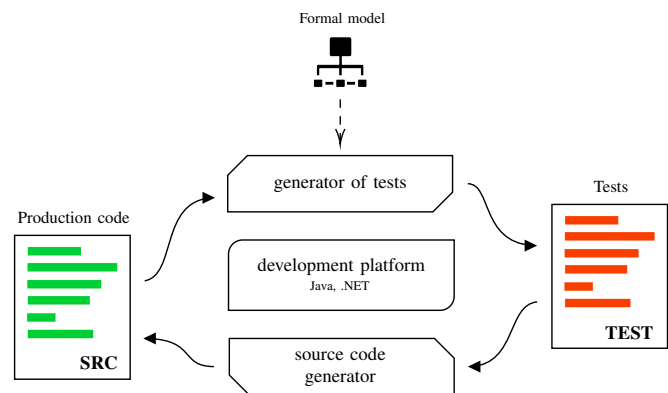


Fig. 1: Links between tests and production code. The solid lines with arrows indicate the direction of the source code's impact on the test and vice versa; dashed line — the formal model can be a source for a generator of tests.

the System Under Test's (SUT) source code throughout the maintenance. We can consider it as up-to-date documentation of the production code. As there exists many testing types, we observed in our previous work [15] that functional unit tests are most closely linked to the source code, i.e. they directly verify the functionality of the production code. The information contained in the tests is therefore much more reliable and consistent with the production code than other software artifacts, e.g. common documentation, comments, or product specification.

The fact that tests contain metadata about the production code and vice versa is evidenced, e.g., by test generators, production code generators, and platform level relations (see Figure 1). However, it is much more complicated to create a link between 2 artifacts, in our case UUT and a test case, created by a developer. Since the implementation of code by the developer is always dependent on mental model created in his/her head, it is often not possible to expect a specific code format that could automatically link these 2 artifacts. We revealed 6 existing methods of UUT identification from a test case mentioned by Rompaey and Demeyer [26], using:

- 1) Naming Conventions,
- 2) Fixtures,
- 3) Static Call Graphs,
- 4) Last Call Before `assert`,
- 5) Lexical Analysis,
- 6) Coevolution.

Simultaneously, we also take into account the negative effects on the test code in our work — test smells, which also worsen the program comprehension.

III. NAMING SEMANTICS OF UNIT TESTS

According to [22, 1], when following the writing conventions the name of the test class should be the same as UUT and should end with or contain the word `Test`. For example, when testing `Foo` class, the testing class will be titled `FooTest`. McGlauffin [21] claims that in Java one production class, i.e.

¹This section contains material from our previous research [14] and [12] © 2018 IEEE.

Class Under Test (CUT) should be tested by only one test class and the developer is led to this convention also using Integrated Development Environment (IDE). Beck and Gamma [1] also recommend to include the word `test` as first in the test case title to distinguish a test method from UUT, regardless of the use of annotations or not. Searching for “test” is often used to find testing directory in a project. E.g. Leitner et al. [10] searched for tests only in `src/test` directory and test classes identified manually. Or Kochhar et al. [8] searched for “test” string in filenames. Therefore, there is assumption that described conventions will be used in practice also for the method and class naming level. This section² analyzes popular Android projects and compares vocabulary used in UUT and corresponding test case.

A. Method

The study was executed using *comparative method* of 5 very popular Android Projects at GitHub³, selected from multiple sources⁴. Top 5 projects with the highest number of watchers were selected for analysis. Firstly a manual semantic analysis has been carried out, to create correct links between test cases/classes and UUTs/CUTs. For each project we tried to comprehend the test, identify the UUT and create a relation between them. In total, 617 tests has been analyzed. Analysis of a test case included the following steps:

- 1) Comprehension of the test and production code functionality to exactly identify the UUT.
- 2) Saving the test method body content, its name and the class name in which it is located.
- 3) Saving the UUT method body, its name and the class name in which it is located.
- 4) Creation of link between UUT and test case.

After collecting the base data, we analyzed all classes using automated script, which divided the identifiers used in the code using camel case and snake case conventions and compared the use of these words in different parts of the code:

- in UUT’s method name,
- in UUT’s body,
- in test case’s method name,
- in test case’s body.

Simultaneously, we analyzed frequently occurred words in test case title to determine their semantics.

B. Results

In total 617 tests in 131 test classes and 238 production methods in 125 classes were analyzed. There was examined the consistency of the words used in the title of the test and the target UUT. Words were identified based on the Java camel case and snake case naming conventions. It was found out that 76% of the tests contain at least the partial UUT name in the test title. At the same time, we tried to identify whether the UUT is tested by only one test class and if not why the

developer creates multiple test classes for the same UUT. From the study we claim that developers test an UUT with different test classes rarely and mostly use multiple test classes to distinguish way of working with objects in the test.

According to the best practices the word “test” should be found in the test name for its clear identification. It was found out that only 61% of the test cases included word “test” in its name. JUnit is mostly used for unit testing in Java projects which use `@Test` annotation to denote test. This annotation practice influenced results of performed case study in way of the “test” word occurrence in the test title. Developers in addition to the `assert` statement also use `verify`, `try-catch` and `throw exception` to evaluate the success or failure of the test. In the tests a high incidence of `assert` roulette test smell has been found which negatively influences the clear identification of UUT. Control flow statements in the test bodies make test difficult to comprehend and complicates creation of relations to the production code.

When creating tests developers use keywords and patterns which can help us to identify the UUT or use case of the test. This work created a summary of all observed keywords used by test cases. Importance of individual keywords may depend on their position against other keywords. There was also observed that despite the Java camel case writing convention testers use the “_” character to separate semantically related data groups in the test title.

In the test title words coverage analysis in the UUT or test body we found out that 57% of the tests had a coverage of more than 60% which means that a short description of the test functionality can be mostly found directly in the test title, i.e. particular use case. When comparing the words from test title to UUT, the coverage is smaller, but 64% of UUT bodies covers more than 20% words of test title. From the above is possible to claim that the body of test case and the body of UUT method uses similar vocabulary.

From the results is possible to claim that **the body of test case and the body of UUT method use similar vocabulary** and can be useful for creating links between test case and UUT.

IV. CLASS UNDER TEST IDENTIFICATION USING NATURAL LANGUAGE PROCESSING

Natural Language Processing (NLP) approaches [20] seek to reduce the barrier in computer-to-human communication. Although the programmer is often constrained by the strict syntax of the programming language and the source code is a non-natural text, the best practices lead him or her to use parts of natural language conventions. A suitable preprocessing of the source code could be beneficial in using NLP techniques on the source code to identify related parts of the code, and in such way identify correct UUT.

Maletic et al. [18, 19] used Latent Semantic Analysis (LSA) model to assist in supporting some of the activities of the program’s comprehension process. They created code clusters of similar files trying to make it easier for the programmer to find related parts of the program. In our case, we assume

²This section contains material from our article [16].

³<https://github.com/>

⁴Sources of projects: DZone, Aritra’s Musings and MyBridge.

that the CUT test will have more common vocabulary as 2 different classes. NLP models were also used by Thomas et al. [30, 29] who mined software repositories using topic models to simplify the understanding of software changes during software evolution. We see, that usage of NLP techniques are used also for processing source code files, therefore, in this section⁵ we measure the accuracy of such models used of UUT identification.

A. Method

For the experiment 5 NLP models were selected:

- Latent Semantic Analysis (LSA),
- Latent Dirichlet Allocation (LDA),
- Term Frequency-Inverse Document Frequency (tf-idf),
- Random Projections (RP),
- Hierarchical Dirichlet Process (HDP).

The experiment was conducted on the same projects as in Section III, due to need of establishing links between the tests and the production classes, in order to measure the success rate of particular NLP models in identifying correct UUT. Source codes were reverted to February 2019 to preserve the consistency of the original study and NLP identification.

The python's *gensim*⁶ [25] library was used due to its popularity [24]. We also examined different source code preprocessings to measure influence on results:

- 1) *Full version* - original file version, removed only `\n` chars.
- 2) *Word split* - all camelCase or snake_case words has been split. Words out of base conventions, such as `ORMLite`, remained unsplit.
- 3) *Removed Java keywords* - all Java keywords have been discarded.
- 4) *Removed comments* - multi- and one-line comments discarded.
- 5) *Removed imports* - all Java imports removed.

The particular iteration where processed incrementally. Incremental preprocessing means that, for example, in the 4th iteration both *Word split* and *Removed Java keywords* have been included. For all iterations frequently used English words were removed using *nlk*⁷ library and stemming was used.

B. Results

Altogether we analyzed 2221 production and 168 test classes in five projects. In five iterations of document preprocessing a total of 2,742,100 similarity results between the tests and the production source code have been obtained. During experimenting the best topic numbers were obtained for the LSA and LDA models. For LSA it was possible to identify recommended topics number in range 7–10, for LDA it was not possible. The fastest average training time of 8ms was achieved by the tf-idf model and the second fastest time was achieved by the LSA model. Also identified was the

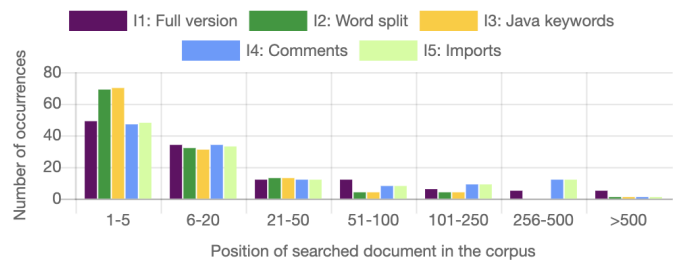


Fig. 2: Position frequency compared to manually identified CUT for tf-idf model.

complexity of the dirichlet distribution calculation in LDA and HDP, where the training times were mostly in seconds.

The most accurate results were achieved by the normalized tf-idf model with a 22% average accuracy of determining the correct CUT regardless of document preprocessing (distribution of results in Figure 2). Taking into account also the preprocessing of input documents the tf-idf model achieved the best results in the 3rd iteration, i.e. after *word splitting* and *removing Java keywords*. Accuracy of the I3 was up to 33% which is a very significant result compared to other models (the second best result of 16%). Accepting a small deviation tolerance tf-idf model found 57% of CUTs in the I3 with accuracy up to first 5 places. The model has proven the most reliable in terms of accuracy, search and training speed.

At the same time, the experiment focused on methods of suitable preprocessing of documents to achieve the best results. Words split (I2) had the greatest impact on the accuracy of all methods but the best results were achieved after removing Java keywords (I3) in general. This shows the negative impact of frequently occurred words in NLP methods that don't use normalization and only take into account the frequency of words, and of course, the occurrence of Java keywords was high in the source code files. On the other hand, it was observed that removing the comments slightly worsened the results. Initially the higher impact of comments removal was expected, as the comments contain the most natural part of the code. It turned out that comments do not have as much impact on accuracy as originally expected. Taking into account the time needed to preprocess the data, it seems 3rd iteration is most suitable for use with the tf-idf model with an average preprocessing time of 0.31s per project.

The results show that the **use of NLP techniques** is not accurate enough, but **could be used as support during identification** of shady CUT or UUT. However, **only the tf-idf model is practically usable** because other models have achieved an accuracy of 16% or less, so they are not usable for such purpose.

V. AUTOMATION OF TEST CASE IDENTIFICATION

Many researchers examine software testing but man still know little about the structure and semantics of test code. Butler et al. [4] claim that developers mostly follow naming conventions. As reported by recent studies [23, 27], test smell

⁵This chapter contains material from our articles [17] © IEEE and [13].

⁶<https://radimrehurek.com/gensim/>

⁷<https://www.nltk.org>

presence might not only negatively affect the comprehension of test suites but can also lead to test cases being less effective in finding bugs in the production code. Many researchers have tried to clarify the motivation of writing tests [11, 2, 8], the impact of Test-driven development (TDD) on code quality [6, 3] or the popularity of testing frameworks [31]. To the best of our knowledge, there is no research that deals with the analysis of tests in independent projects.

Another problem with examining tests is how to identify in an unknown code a test case. There are many configuration files and build tools, that can be helpful, but mostly require manual investigation. To count the number of test cases we should simply run the tests and we will see the final result, but without location of test. As pointed out in our study of buildability of open-source projects, this use is not so straightforward due to frequently build fails of open-source projects [28]. When we would like to create links between a test case and the corresponding UUT, we need to know exact location of the test case. Therefore, we fight with test case localisation in an unknown code.

A. Method

To propose a script for automated test case localisation in a project, we need to understand how developers write the code. As potential projects for manual analysis were considered all publicly available GitHub Projects from May 2019⁸ with a majority Java language. This set was represented by 4.3M projects available using GitHub API⁹.

Using GitHub Code Search API¹⁰ we searched for the word “test” or testing framework import (imports of 50 java testing frameworks) in each project. There were created 3 datasets:

- java files content,
- java filenames,
- frameworks’ imports in all files content.

Set of 50 testing frameworks was selected to ensure diversity and to make the script as general as possible. First four relevant and top projects (highest *test* or framework’s import string occurrence) were manually investigated from each set in order to find out the test writing practices. The projects were cloned¹¹ and to keep the consistency between the GitHub API fetch and the manual analysis, the project was reverted to the timestamp of GitHub API download. In total 38 repositories, 803 classes and 20,340 test methods were manually investigated.

B. Results

Based on the manual analysis of more than 20k tests, final implementation of the script was proposed and is available at GitHub¹². Based on manual analysis, regardless of the

⁸Project names downloaded from GHTorrent [7] project, mirror of all GitHub Project’s metadata.

⁹<https://docs.github.com/en/rest>

¹⁰<https://docs.github.com/en/rest/reference/search>

¹¹`git clone`

¹²<https://github.com/madeja/unit-testing-practices-in-java/blob/master/AnalyzeProjectCommand.php>

framework it is advisable to investigate the count of multiple attributes of a source file containing the word “test”, therefore, the script collects the following counts:

- 1) *Annotations @Test* — very popular mostly thanks to *JUnit* and *TestNG*.
- 2) *Methods containing test in the beginning of the name* — best practices leads developers to use this convention (also for historical purposes).
- 3) *Methods containing Test in the end of the name* — an alternative of previous one.
- 4) *Public methods* — possibly all public methods of a test class can be considered as tests.
- 5) *Occurrence of main* — customized testing solutions are often executed via `main()`.
- 6) *File path containing test* — should relate to testing.
- 7) *Classes containing \$ in the name* — the character \$ in a class name mostly denotes a generated code¹³ that should not be analyzed.
- 8) *Total number of “test” string occurrence in file content* — to reveal the relation between executable test cases and the word *test* presence in the content.

All listed metrics (counts of occurrence in a file) were saved for each analyzed file. The pseudocode for collecting mentioned metrics can be seen in Listing 1. The prerequisite for correct identification of the script is that it must be used on a java or kotlin file that contains at least one occurrence of the word “test”. We observed that “test” is required by most of frameworks to denote a test case.

The script is based on static analysis of the source code, therefore, **it is very fast with reached speed of 3.32ms per KLOC**. To evaluate the precision of the proposed algorithm, results were compared to manual test identification of 20,340 test cases across all three datasets. Accuracy of 95.72% for test cases detection was achieved by automated identification considering only test methods, i.e. 95.72% of all test cases were correctly identified. Considering all 28,975 methods of manually analyzed files (with non-testing ones) **a total accuracy of 96.97% was achieved**. Significance was evaluated using *Mann-Whitney-Wilcoxon (MWW) test* with sensitivity of

$$\begin{aligned} \text{Sensitivity} &= \frac{\text{true positives}}{\text{true positives} + \text{false negatives}} = \\ &= \frac{19600}{19600 + 62} = 0.9968 \end{aligned} \quad (1)$$

and specificity of

$$\begin{aligned} \text{Specificity} &= \frac{\text{true negatives}}{\text{true negatives} + \text{false positives}} = \\ &= \frac{8498}{8498 + 815} = 0.9125 \end{aligned} \quad (2)$$

¹³<https://docs.oracle.com/javase/specs/jls/se11/html/jls-3.html#jls-3.8>


```

1 Algorithm predictTests(filePath)
2   Input: File path to analyze.
3   Output: List of statistical data
4
5   content := load filePath content and
6   ↪ remove comments
7   nonClassContent := remove all class
8   ↪ content, keep only content outside
9   ↪ of it such as imports or class
10  ↪ annotations
11  classContent := remove all content
12  ↪ outside of the class block and keep
13  ↪ only first-level methods without
14  ↪ body using /\{([\^\{\}]++|(?R))*\}/
15
16  annotations := matches count of regex
17  ↪ /@Test/ in classContent
18  startsWithTest := matches count of regex
19  ↪ /public +.*void *.*
20  ↪ +[Tt]est[a-zA-Z\d$_]* *\(/ in
21  ↪ classContent
22  endsWithTest := matches count of regex
23  ↪ /public +.*void *.*
24  ↪ +[a-zA-Z$_]{1}[a-zA-Z\d$_]*Test
25  ↪ *\(/ in classContent
26  publicMethods := matches count of regex
27  ↪ /public +.*void +.*\(/ in
28  ↪ classContent
29  includesMain := matches count of /public
30  ↪ +static +void +main.*\(/ in
31  ↪ classContent
32
33  hasDollar := if $ in filename, then
34  ↪ true, else false
35  testInPath := if "/test" in filePath,
36  ↪ then true, else false
37
38  if TestNG import found in content, then
39    if @Test found in nonClassContent,
40      ↪ then
41        testCaseCount := publicMethods
42      else
43        testCaseCount := annotations
44    else if JUnit4 import found in content,
45      ↪ then
46        testCaseCount := annotations
47    else if JUnit3 import found in content,
48      ↪ then
49        testCaseCount := startsWithTest
50    else if startsWithTest > 0, then
51      testCaseCount := startsWithTest
52    else if annotations > 0, then
53      testCaseCount := annotations
54    else
55      testCaseCount := 0
56
57  return annotations, startsWithTest,
58  ↪ endsWithTest, publicMethods
59  ↪ includesMain, hasDollar,
60  ↪ testInPath, testCaseCount

```

Listing 1: Pseudocode of the algorithm for gathering metadata and identified number of tests in a Java source file.

Most of false positives and false negatives occurrences were caused by customized testing solutions, e.g. when tests were performed directly from the `main()` function by calling methods of the class. If the naming conventions of the called (testing) methods were not governed by the principles of frameworks (e.g. prepending method name with “*test*” or using public methods), not all test cases were detected in an automated way. To identify also all customized testing solutions, an in-depth analysis of such solutions in the future is needed.

VI. CONTRIBUTIONS OF THIS WORK

Contributions of this work are mainly focused on using them for facilitating program comprehension, but can be applicable to software testing practices in general. We conclude the following contributions of our dissertation thesis:

- **Overview of relation types between test case and production code to open new research directions.** The different relationship levels between source code artifacts may be beneficial for the further direction of research in the field of enriching production or testing code, documentation and other documents, and facilitate the program comprehension. Existing tools can be further explored, e.g. production code generators, from which it is possible to obtain information about the production code, which are used to generate the code.
- **Finding level of vocabulary similarity between testing and production code at different levels.** Results of Section III claims that there is approximately 50% probability of finding the full and 75% of finding partial UUT’s name in the corresponding test case title. The words included in test case title are partially used also in the UUT’s body. By combining this information, it is possible to more accurately identify the correct UUT.
- **Unrevealed habits of developers expressing semantics of the code identifiers.** Observed writing patterns of tests that affect code reading and comprehension have been described. Use of “_” character in a camel-case based language may be used to separate semantically related data groups, e.g. in a test case name. By finding the statements used to evaluate the tests, it is possible to detect what is accurately verified by the test. Also the identification of keywords explaining behavior of a test case can be used for automation of test explanation process.
- **Accuracy of using NLP techniques over source code for CUT identification.** Our results showed (Section IV) that the exclusive use of NLP techniques to identify CUT is not reliable, with a maximum reached accuracy of 33%. However, the method may be useful to support the identification of UUT by other methods, especially for cases where multiple UUTs are identified at once.
- **Comparison of source files preprocessing for NLP use.** As for better NLP results is very important the quality of input data, we experimented with multiple document preprocessing. Using *word splitting* and *removing Java*

keywords proved to be the best solution. At the same time, we provide useful information for using such techniques for a real tool development, i.e. training and preprocessing times.

- **Proposed algorithm for fast and accurate identification of test cases in Java projects.** The algorithm is based on static analysis of the code and searching of prescribed patterns, with accuracy up to 97% (Section V). It is based on exhausting analysis of the word “test” in 109 languages, deep analysis of 50 Java testing frameworks and manual investigation of 38 open-source projects from GitHub. The proposed script reached processing speed of 3.32ms per KLOC, also focusing on usability for IDE tools.

VII. THREATS TO VALIDITY

In performed studies a limited sets of projects were used, that do not include all projects in the world. Therefore, it is possible that the results and claims may not be accurate and adaptable for other projects, mostly non-Java ones. The studies was focused on open-source projects that may have a different nature and quality compared to proprietary projects that we did not have access to. The source of the projects was the GitHub platform. Other collaborative tools can have a different impact on the motivation to write quality code which could also affect the results.

Because creation of relations between tests and production code have been done manually (Section III) some faults could occur while comprehending the source code and during creation of relations between UUT and test case. For more accurate relations between the analyzed data it would be necessary to increase the number of observers in the study.

The preprocessing of documents (the *garbage in, garbage out* idiom, Section IV) has also a huge impact on the results. How to prepare source codes for such analysis was also one of the research questions. There exists a threat to validity because not all possible document preprocessing variants could be tried out. Despite finding the best value for topics number for LSA and LDA models, a search range of 7 to 50 may not be sufficient. Also the computation of coherence value may not be reliable at all times and there is no general recommendation on how to accurately determine topic number, so there is no guarantee that the best values have been chosen with respect to the input data.

Study in Section V relied on GHTorrent databank and GitHub API search algorithm to identify relevant projects (containing the word “test”). Because only projects with a majority of Java language were selected, testing practices in projects, where Java was not a major language could have been lost. Test classes that did not use the word *test* to indicate a test case were also lost. Some results are limited to the selection of projects with the highest occurrence of the word “test” in file content. A random set of projects would need to be selected to generalize the results.

VIII. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This work was focused on revealing testing practices in open source projects with the long-term goal of mining information from them to enrich production source code to facilitate program comprehension. The focus was exclusively on unit tests, as they are expected to have the largest share in projects and need to be examined before moving to higher levels of testing. This paper summarizes the two main research objectives: 1) how to identify UUT from a test case and; 2) how to identify and locate test cases in an unknown project’s source code. At the same time, we provided an overall analysis of vocabulary used in test cases, what statements are used to evaluate tests and the strength between test case and UUT.

The presented results were obtained studying of existing open-source projects and frameworks to reveal *how developer write tests* and *how to create links between testing and production code*. Without this information, it would not be possible to develop practical tools in the future that directly influence the program comprehension. Therefore, the future research in this field should be focused on creation of tools and methods to enrich the production code, documentation and other software artifacts with potential of facilitating the program comprehension.

The first important step is to create an *automated tool that can identify UUT from a test case* using the collected approaches of UUT identification, mostly through those verified in our thesis, i.e. using *naming conventions* and *lexical analysis* as supporting method. We believe that combining different approaches can achieve satisfactory results and the creation of links between production and testing code will be possible.

Collected data within the thesis, especially those collected manually, could be used to train a machine learning model. Because testing frameworks are changing and such a model could also adapt to a change in test frameworks. In general, machine learning can be very beneficial for software engineering because it would reduce the cognitive burden on the developer and could also prevent code errors that are most often caused by developer intervention.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by project VEGA No. 1/0762/19: Interactive pattern-driven language development.

REFERENCES

- [1] Kent Beck and Erich Gamma. “Test infected: Programmers love writing tests”. In: *Java Report 3.7* (1998), pp. 37–50.
- [2] Moritz Beller et al. “When, How, and Why Developers (Do Not) Test in Their IDEs”. In: *Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering*. ESEC/FSE 2015. Bergamo, Italy: Association for Computing Machinery, 2015, 179–190. ISBN: 9781450336758. DOI: 10.1145/2786805.2786843. URL: <https://doi.org/10.1145/2786805.2786843>.

- [3] Wilson Bissi, Adolfo Gustavo Serra Seca Neto, and Maria Claudia Figueiredo Pereira Emer. “The effects of test driven development on internal quality, external quality and productivity: A systematic review”. In: *Information and Software Technology* 74 (2016), pp. 45–54. ISSN: 0950-5849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2016.02.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584916300222>.
- [4] S. Butler, M. Wermelinger, and Y. Yu. “Investigating naming convention adherence in Java references”. In: *2015 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*. 2015, pp. 41–50.
- [5] Serge Demeyer, Stéphane Ducasse, and Oscar Nierstrasz. *Object-oriented reengineering patterns*. Elsevier, 2002.
- [6] D. Fucci et al. “A Dissection of the Test-Driven Development Process: Does It Really Matter to Test-First or to Test-Last?” In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 43.7 (2017), pp. 597–614.
- [7] Georgios Gousios. “The GHTorrent dataset and tool suite”. In: *Proceedings of the 10th Working Conference on Mining Software Repositories*. MSR ’13. San Francisco, CA, USA: IEEE Press, 2013, pp. 233–236. ISBN: 978-1-4673-2936-1. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2487085.2487132>.
- [8] P. S. Kochhar et al. “Understanding the Test Automation Culture of App Developers”. In: *2015 IEEE 8th International Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST)*. 2015, pp. 1–10.
- [9] Thomas D. LaToza and Brad A. Myers. “Hard-to-Answer Questions about Code”. In: *Evaluation and Usability of Programming Languages and Tools*. PLATEAU ’10. Reno, Nevada: Association for Computing Machinery, 2010. ISBN: 9781450305471. DOI: 10.1145/1937117.1937125. URL: <https://doi.org/10.1145/1937117.1937125>.
- [10] Philipp Leitner and Cor-Paul Bezemer. “An Exploratory Study of the State of Practice of Performance Testing in Java-Based Open Source Projects”. In: *Proceedings of the 8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering*. ICPE ’17. L’Aquila, Italy: Association for Computing Machinery, 2017, 373–384. ISBN: 9781450344043. DOI: 10.1145/3030207.3030213. URL: <https://doi.org/10.1145/3030207.3030213>.
- [11] M. Linares-Vásquez et al. “How do Developers Test Android Applications?” In: *2017 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*. 2017, pp. 613–622.
- [12] M. Madeja and J. Porubän. “Automatic assessment of assignments for Android application programming courses”. In: *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics*. Nov. 2017, pp. 232–237. DOI: 10.1109/INFORMATICS.2017.8327252.
- [13] M. Madeja and J. Porubän. “Accuracy of Unit Under Test Identification Using Latent Semantic Analysis and Latent Dirichlet Allocation”. In: *2019 IEEE 15th International Scientific Conference on Informatics*. 2019, pp. 000161–000166. DOI: 10.1109/Informatics47936.2019.9119262.
- [14] Matej Madeja. “Program comprehension from the perspective of testing”. In: *SCYR 2018*. Faculty of Electrical Engineering and Informatics. 2018, pp. 202–205. ISBN: 978-80-553-2972-7.
- [15] Matej Madeja and Jaroslav Porubän. “Automated testing environment and assessment of assignments for Android MOOC”. In: *Open Computer Science* 8.1 (2018), pp. 80–92.
- [16] Matej Madeja and Jaroslav Porubän. “Tracing Naming Semantics in Unit Tests of Popular Github Android Projects”. In: *8th Symposium on Languages, Applications and Technologies (SLATE 2019)*. Ed. by Ricardo Rodrigues et al. Vol. 74. OpenAccess Series in Informatics (OASICs). Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2019, 3:1–3:13. ISBN: 978-3-95977-114-6. DOI: 10.4230/OASICs.SLATE.2019.3. URL: <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2019/10870>.
- [17] Matej Madeja and Jaroslav Porubän. “Unit Under Test Identification Using Natural Language Processing Techniques”. In: *Open Computer Science* 11.1 (1Jan. 2021), pp. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0150>. URL: <https://www.degruyter.com/view/journals/comp/11/1/article-p22.xml>.
- [18] J. I. Maletic and A. Marcus. “Using latent semantic analysis to identify similarities in source code to support program understanding”. In: *Proceedings 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. ICTAI 2000. Nov. 2000, pp. 46–53. DOI: 10.1109/TAI.2000.889845.
- [19] Jonathan I Maletic and Naveen Valluri. “Automatic software clustering via latent semantic analysis”. In: *14th IEEE International Conference on Automated Software Engineering*. IEEE. 1999, pp. 251–254.
- [20] Christopher D Manning, Christopher D Manning, and Hinrich Schütze. *Foundations of statistical natural language processing*. MIT press, 1999.
- [21] Brian McGlaufflin. *Java Unit Testing Best Practices: How to Get the Most Out of Your Test Automation*. DZone Technical Library, May 2019. URL: <https://dzone.com/articles/java-unit-testing-best-practices-how-to-get-the-mo>.
- [22] Gerard Meszaros. *xUnit test patterns: Refactoring test code*. Pearson Education, 2007.
- [23] Anthony Peruma et al. “On the distribution of test smells in open source Android applications: an exploratory study.” In: *CASCON*. 2019, pp. 193–202.
- [24] Radim Řehůřek. *About Gensim*. July 2019. URL: <https://radimrehurek.com/gensim/about.html>.
- [25] Radim Řehůřek and Petr Sojka. “Software Framework for Topic Modelling with Large Corpora”. English. In: *Proceedings of the LREC 2010 Workshop on New*

- Challenges for NLP Frameworks*. <http://is.muni.cz/publication/884893/en>. Valletta, Malta: ELRA, May 2010, pp. 45–50.
- [26] B. V. Rompaey and S. Demeyer. “Establishing Traceability Links between Unit Test Cases and Units under Test”. In: *2009 13th European Conference on Software Maintenance and Reengineering*. Mar. 2009, pp. 209–218. DOI: 10.1109/CSMR.2009.39.
- [27] D. Spadini et al. “On the Relation of Test Smells to Software Code Quality”. In: *2018 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*. 2018, pp. 1–12.
- [28] Matúš Sulír et al. “Large-Scale Dataset of Local Java Software Build Results”. In: *Data* 5.3 (2020), p. 86.
- [29] Stephen W Thomas. “Mining software repositories using topic models”. In: *Proceedings of the 33rd International Conference on Software Engineering*. ACM. 2011, pp. 1138–1139.
- [30] Stephen W Thomas et al. “Studying software evolution using topic models”. In: *Science of Computer Programming* 80 (2014), pp. 457–479.
- [31] A. Zerouali and T. Mens. “Analyzing the evolution of testing library usage in open source Java projects”. In: *2017 IEEE 24th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)*. 2017, pp. 417–421.

Klasifikácia 3D obrazov pomocou generatívnych modelov

Michal Varga

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita, Košice
michal.varga@tuke.sk

Ján Jadlovský

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita, Košice
jan.jadlovsky@tuke.sk

Abstrakt—Tento článok predstavuje zhrnutie nášho výskumu a jeho výsledkov v oblasti klasifikácie 3D obrazu s využitím generatívneho modelovania. Jeho hlavným prínosom je návrh metodiky generatívneho posilnenia klasifikátorov 3D obrazov, ktorá predstavuje postup syntézy nových generatívnych klasifikátorov transformáciou existujúcich negeneratívnych klasifikátorov. Vyhodnotenie prínosov aplikácie tejto metodiky je vykonané prostredníctvom viacerých experimentov s využitím nami navrhnutého konvolučného klasifikátora a existujúceho klasifikátora VoxNet. Vlastnosti rôznych variantov klasifikátorov sú overené aj na reálnych dátach získaných pomocou nami zostrojeného rotačného 3D skenera. Výsledky týchto experimentov ukazujú signifikantné zvýšenie presnosti klasifikácie, a taktiež posilnenie schopnosti generalizácie. Analýza výsledkov napovedá aj tomu, že podstatou týchto vylepšení nie je výlučne augmentácia dát generátorom, ale pravdepodobný prenos znalostí medzi generátorom a klasifikátorom počas učenia. Tieto výsledky boli dosiahnuté v rámci riešenia dizertačnej práce s názvom *Klasifikácia 3D obrazov pomocou generatívnych modelov*.

KLúčové slová—Generatívne modelovanie, Klasifikácia obrazov, Konvolučné neurónové siete, Deep learning, 3D obrazy

Abstract—This paper presents a summary of our research in the area of 3D image classification using generative modeling. Its main contribution is the methodology for generative enhancement of 3D image classifiers, which represents a process of synthesis of novel generative classifiers via transformation of existing non-generative classifiers. Evaluation of the benefits of the methodology is performed via several experiments employing a simple convolutional classifier and an existing classifier called VoxNet. Properties of the various resulting classifier variants are also evaluated on real data collected using a rotary 3D scanner designed and built as a part of this research. The results of these experiments show a significant increase in classification accuracy and also some improvement in generalization. Further analysis of the results suggests that the source of these improvements is not only the augmentative effect of the generator but a likely transmission of feature knowledge between the generator and the classifier during training. These are the results of the dissertation thesis named *3D Image Classification Using Generative Models*.

Index Terms—Generative modeling, Image classification, Convolutional neural network, Deep learning, 3D imaging

I. ÚVOD

Problematika rozpoznávania obrazu je v súčasnosti vysoko aktuálna, čo dokazuje aj rýchly rozvoj spektra jeho aplikácií v mnohých oblastiach, pričom vo väčšine z nich nachádza uplatnenie práve 3D formát. Význačnosť 3D dát a ich prínos pri klasifikácii objektov sa nám potvrdili pri výskume

klasifikácie RGB-D obrazov, kedy sa ukázalo, že dostupnosť hĺbkovej mapy môže spôsobiť relatívne zvýšenie presnosti klasifikácie objektov až o 10% [1]. Generatívne modelovanie už niekoľko rokov priťahuje pozornosť výskumu v oblasti umelej inteligencie, vrátane jeho aplikácie v klasifikácii obrazov. Generatívne modely slúžia na modelovanie rozdelenia pravdepodobnosti skúmaného systému a dokážu následne generovať nové vzorky. Ukázalo sa, že pri tréňovaní takýchto modelov vzniká kompaktná reprezentácia mnohorozmerných vzoriek v podobe latentného vektora príznakov, ktorý je veľmi vhodný práve na riešenie úlohy klasifikácie. Hoci štandardné generatívne modely transformujú tento príznakový vektor na mnohorozmernú reprezentáciu vzorky, existujú modifikácie, ktoré umožňujú tieto znalosti o význačných príznakoch využívať na ďalšie účely. Náš výskum sa zameriava na možnosti využitia generatívneho modelovania pri použití existujúcich negeneratívnych klasifikátorov 3D obrazov a jeho hlavným cieľom je návrh všeobecného postupu na kombináciu generatívneho a negeneratívneho prístupu v klasifikácii 3D obrazov.

Navrhnutá metodika generatívneho posilnenia klasifikátorov 3D obrazov a časť nasledujúcich experimentov a ich výsledkov bola publikovaná v časopise *MDPI Applied Sciences* [2].

II. GENERATÍVNE MODELOVANIE

Generatívne modely predstavujú množinu matematických modelov a architektúr, ktoré riešia úlohu maximalizácie vierohodnosti (maximum likelihood estimation), teda ktorých úlohou je modelovať rozloženie pravdepodobnosti reálneho systému reprezentovaného tréňovacou množinou. Odhad maximálnej vierohodnosti predstavuje hľadanie takých parametrov modelu θ , pri ktorých je pravdepodobnosť tréňovacích vzoriek najvyššia. Pravdepodobnosť, ktorú model priradí tréňovaciemu súboru, obsahujúcemu m vzoriek $\mathbf{x}^{(i)}$, môžeme vyjadriť nasledovne (1). [3]

$$\prod_{i=1}^m p_{\text{model}}(\mathbf{x}^{(i)}; \theta) \quad (1)$$

Logaritmovaním dostávame logaritmickú vierohodnosť, ktorá má vďaka nahradeniu súčinu sumou výhodu vyššej numerickej stability a jednoduchšej derivácie. Logaritmus funkcie nemení pozíciu jej maxima, preto maximalizácia logaritmickej vierohodnosti je ekvivalentná s pôvodným znením

úlohy. Úlohou je teda nájsť taký odhad parametrov θ^* , pre ktorý platí (2). [3]

$$\begin{aligned}\theta^* &= \arg \max_{\theta} \prod_{i=1}^m p_{model}(\mathbf{x}^{(i)}; \theta) \\ &= \arg \max_{\theta} \log \prod_{i=1}^m p_{model}(\mathbf{x}^{(i)}; \theta) \\ &= \arg \max_{\theta} \sum_{i=1}^m \log p_{model}(\mathbf{x}^{(i)}; \theta)\end{aligned}\quad (2)$$

Príkladom implicitného generatívneho modelu sú známe neurónové siete typu GAN (Generative Adversarial Network). [3]

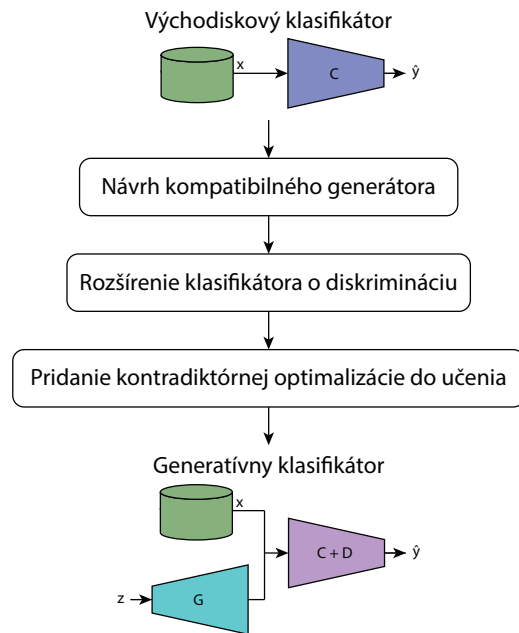
Generatívne modely boli úspešne aplikované na riešenie širokého spektra úloh vrátane generovania realistických dát, super-rozlíšenia (škálovania obrazu nad rámec originálnych rozmerov), dopĺňania obrazu a videa (inpainting), a mnoho ďalších. Klasifikácia dát, ktorej sa venujeme v našom výskume, je taktiež jednou z nich, avšak zvyčajne nebýva hlavným cieľom návrhu generatívnej neurónovej siete.

State-of-the-art generatívne a negeneratívne klasifikátory si v rámci presnosti klasifikácie 3D obrazov konkurujú veľmi tesne, čo je možné vidieť aj vo výsledkoch rôznych benchmarkov (napr. ModelNet [4]). Hoci sa modely využívajúce tieto dva prístupy v štruktúre značne líšia, vidíme potenciál na ich kombináciu v zmysle posilnenia negeneratívnych klasifikátorov pomocou prvkov generatívneho modelovania. Popri zvýšení presnosti klasifikácie by tento prístup mohol pomôcť pri problémoch špecifických pre oblasť 3D obrazov, akými sú napríklad malé datasety, málo špecifické a syntetické tréningové dáta a pod.

Táto myšlienka je sčasti podporená v [5], kde autori pozorujú výskyt priaznivej interakcie v rámci modelu pri kombinovaní supervízneho a nekontrolovaného učenia pri tréningu GAN klasifikátora, založenom na hľadaní zhody príznakov (feature matching). Toto naznačuje potenciál pre existenciu takýchto interakcií aj v rámci generatívnych klasifikátorov, čo by umožnilo ďalšie možnosti vylepšenia existujúcich negeneratívnych klasifikátorov. To by bolo možné dosiahnuť vložением týchto modelov do vhodnej generatívnej architektúry. Z týchto dôvodov sme navrhli všeobecnú metodiku generatívneho posilnenia, ktorej cieľom je umožniť ľubovoľnému kompatibilnému klasifikátoru využiť prístup generatívneho modelovania na zvýšenie jeho klasifikačnej presnosti a schopnosti učiť sa z malého množstva dát.

III. METODIKA GENERATÍVNEHO POSILNENIA KLASIFIKÁTOROV

Hlavným prínosom tohto výskumu je návrh metodiky generatívneho posilnenia klasifikátorov 3D obrazov, ktorej cieľom je syntéza nových generatívnych klasifikátorov pomocou vloženia existujúcich výkonných neurónových klasifikátorov do kompatibilnej generatívnej sieťovej architektúry. Týmto spôsobom je možné zvýšiť presnosť klasifikácie pôvodného



Obr. 1. Vývojový diagram metodiky generatívneho posilnenia klasifikátorov. Východiskom je klasifikátor, ktorý priradzuje tréningovým a testovacím vzorkám x predikované označenie \hat{y} . Aplikáciou navrhnujetej metodiky je sieť rozšírená o generátor G , ktorý produkuje nové tréningové vzorky zo vstupného vektora z , obsahujúceho Gaussov šum

klasifikátora spolu s jeho toleranciou na málopočetné tréningové datasety. Postup tejto modifikácie znázornený na obrázku 1 pozostáva z nasledujúcich krokov:

- Prvým krokom metodiky je návrh vhodného generátora dát pre existujúci klasifikátor, pričom je nutné, aby bol schopný generovať vzorky vo formáte kompatibilnom s typom klasifikovaných dát (rovnaký počet rozmerov, zhodná veľkosť, počet kanálov a pod.). Zároveň musí byť tento generátor podmienený, teda jeho výstupy musia patriť do požadovanej triedy určenej vstupom generátora, čo sa dosiahne privedením informácie o požadovanej triede na jeho vstup. Toto je nevyhnutné, nakoľko počas tréningu je výstup generátora pripojený na vstup modifikovaného klasifikátora.
- V druhom kroku je klasifikátor rozšírený na vykonávanie diskriminačnej úlohy, tj. rozlišovanie medzi skutočnými a falošnými (vygenerovanými) vzorkami. Táto konfigurácia umožňuje tréning generátora kontradiktórnym učením, aké sa využíva pri sieťach typu GAN. Podstatné je to, aby diskriminačnú úlohu plnil samotný klasifikátor, čo je predpokladom prenosu generatívnych príznakov natréningovaných kontradiktórnou optimalizáciou do parametrov klasifikátora.
- V poslednom kroku je do tréningovej slučky pridaná kontradiktórna optimalizácia (tj. súperiace učenie generátora a diskriminátora). Ako bolo uvedené v predchádzajúcom kroku, pri kontradiktórnej optimalizácii plní úlohu diskriminátora modifikovaný klasifikátor.

Hoci sa uvedený postup teoreticky neobmedzuje na konkrétny typ dát, táto metodika vyžaduje vytvorenie plne diferencovateľného a trénovateľného generátora. Táto podmienka plnej diferencovateľnosti generátora vyplýva z potreby výpočtov gradientov a trénovania jeho jednotlivých vrstiev počas kontradiktórnej optimalizácie generátora a diskriminátora.

IV. EXPERIMENTÁLNE VYHODNOTENIE

Na vyhodnotenie prínosov metodiky generatívneho posilnenia klasifikátorov bolo navrhnutých niekoľko experimentov. V prvých dvoch bola metodika aplikovaná na nami navrhnutý jednoduchý 3D konvolučný klasifikátor voxelových mriežok a v druhom na existujúci klasifikátor VoxNet [6]. V treťom experimente boli vyhodnotené prínosy tejto metodiky pri aplikácii v reálnych podmienkach prostredníctvom návrhu a konštrukcie 3D skenovacieho zariadenia, získaním modelov reálnych objektov a ich následnou klasifikáciou pomocou klasifikátorov a ich modifikácií navrhnutých v ostatných experimentoch.

Navrhnuté experimenty boli realizované s využitím datasetu ModelNet [4].

A. Aplikácia na jednoduchom 3D konvolučnom klasifikátore

V prvom experimente sme skúmali aplikáciu navrhovanej metodiky na jednoduchý 3D konvolučný klasifikátor za účelom zistenia jej dopadu na presnosť klasifikácie a generalizačnú schopnosť klasifikátorov. Aplikáciu metodiky na takýto klasifikátor dosiahneme jeho transformáciou na klasifikátor založený na podmienenej (conditional) GAN sieti, skratkou CGAN. Na vyhodnotenie tejto transformácie sme navrhli 3 samostatné modely. Prvým je pôvodný konvolučný (CNN) klasifikátor, ktorý je trénovaný výhradne na príkladoch z trénovacieho datasetu a slúži ako kontrolný model v tomto experimente. Druhý model je štruktúrou totožný s prvým, avšak je trénovaný na zmesi príkladov z datasetu a vzoriek vytvorených natrénovaným generátorom z vytvorenej GAN siete a slúži na vyhodnotenie augmentačného potenciálu generátora (augCNN). Tretím modelom je metodikou vytvorený klasifikátor založený na podmienenej GAN sieti (CGAN). Diagram na obrázku 2 znázorňuje konceptuálnu štruktúru troch navrhnutých modelov.

Prvé dva modely (CNN a augCNN) sú identické hlboké 3D konvolučné klasifikátory pozostávajúce z 3 konvolučných vrstiev. Na redukcii dimenzionality medzi týmito vrstvami bola použitá vyššia strieda konvolučného okna. Po každej z vrstiev nasleduje dávková normalizácia (batch normalization) a aktivačná funkcia typu Leaky ReLU. Po konvolučných vrstvách nasleduje jedna plne prepojená vrstva a po nej taktiež plne prepojená výstupná vrstva s počtom neurónov rovným počtu tried C . Na výstupe je použitá aktivačná funkcia *softmax*. Stratová funkcia použitá pri trénovaní konvolučných klasifikátorov je kategorická krížová entropia (categorical cross-entropy) v tvare (3).

$$L_C = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \mathbf{y}_j^{(i)} \log(\hat{\mathbf{y}}_j^{(i)}) \quad (3)$$

V tomto vzťahu M označuje počet vzoriek (v dávke alebo celkovo), C je počet tried v datasete, \mathbf{y} je vektor triedy trénovacej vzorky (kódovanie 1 z n , angl. one-hot) a $\hat{\mathbf{y}}$ je výstup klasifikátora, teda predikcia triedy. Označenie $\mathbf{y}_j^{(i)}$ predstavuje j -tý prvok z vektora patriaceho i -tej vzorke v rámci dávky.

Tretím modelom je 3D podmienená GAN sieť (CGAN), pozostávajúca z páru generátor–diskriminátor spojených za sebou a trénovaných v opozícii kontradiktórnym učením. Podmienená GAN sieť akceptuje podmienku pre generátor, ktorá špecifikuje požadovaný výstup pomocou kódovaného vektora triedy na vstupe. Tento model sa od štandardnej architektúry GAN siete odlišuje v diskriminátore, ktorý sa štruktúrou zhoduje s už spomínaným jednoduchým (CNN) a augmentovaným (augCNN) konvolučným klasifikátorom. Rozdiel medzi týmto diskriminátorom a konvolučnými klasifikátormi spočíva vo výstupnej vrstve, ktorá spolu s vektorom triedy obsahuje jeden ďalší výstup, ktorý hovorí o tom, či je klasifikovaná vzorka reálna alebo falošná.

Generatívna časť klasifikátora CGAN – generátor – pozostáva z 3 dekonvolučných vrstiev s postupne klesajúcim počtom objemových konvolučných filtrov. Štruktúra tejto časti siete je zobrazená na obrázku 3. Nadvzorkovanie (upsampling), teda navýšenie dimenzionality je zabezpečené pomocou striedy filtrov, ktorá je rovná 2 v každej vrstve. Po každej vrstve nasleduje Leaky ReLU aktivačná funkcia a dávková normalizácia. Výstupná vrstva naopak používa aktivačnú funkciu *tanh*, ktorá zabezpečí normalizáciu výstupných hodnôt v intervale $(-1, 1)$. Kompletná neuronová sieť CGAN je zobrazená na obrázku 4.

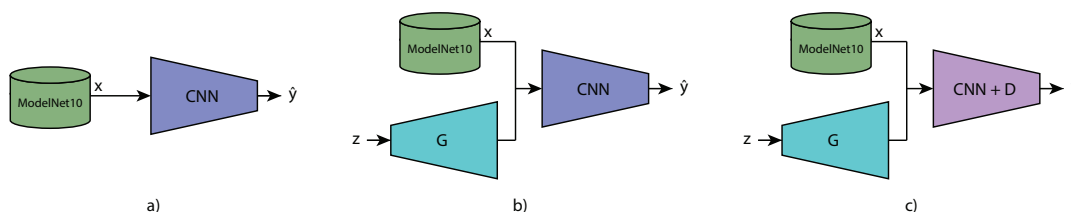
Stratová funkcia pre trénovanie diskriminátora je štandardná kategorická krížová entropia v tvare (4).

$$L_D = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{C+1} \mathbf{y}_j^{*(i)} \log(\hat{\mathbf{y}}_j^{*(i)}) \quad (4)$$

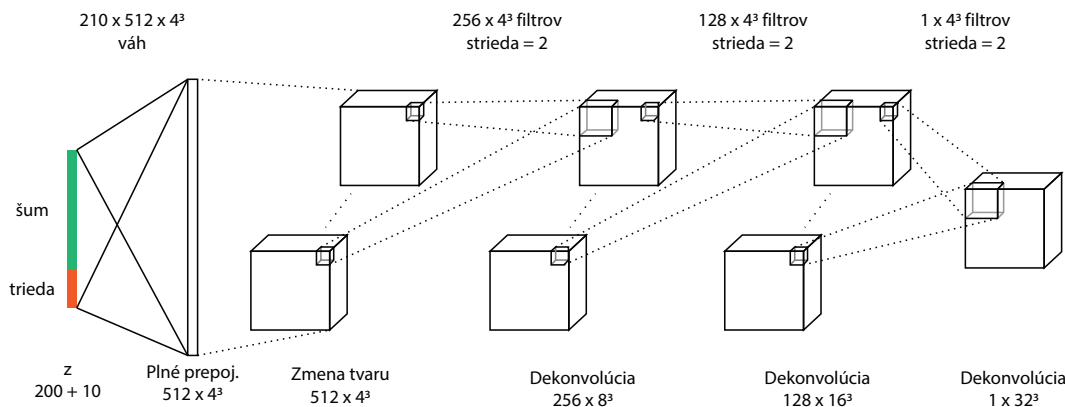
Na kombináciu diskriminačnej (reálne–falošné vzorky) a klasifikačnej chyby je zostrojený rozšírený cieľový vektor \mathbf{y}^* v tvare (5). Toto rozšírenie je potrebné pre kontradiktórne učenie ako generátora, tak aj diskriminátora, a jeho cieľom je umožniť učenie sa generátora produkovať realistické vzorky.

$$\mathbf{y}^{*(i)} = \begin{cases} [0, \mathbf{y}^{(i)}] & \text{reálne} \\ [1, 0, 0, \dots, 0] & \text{falošné} \end{cases} \quad (5)$$

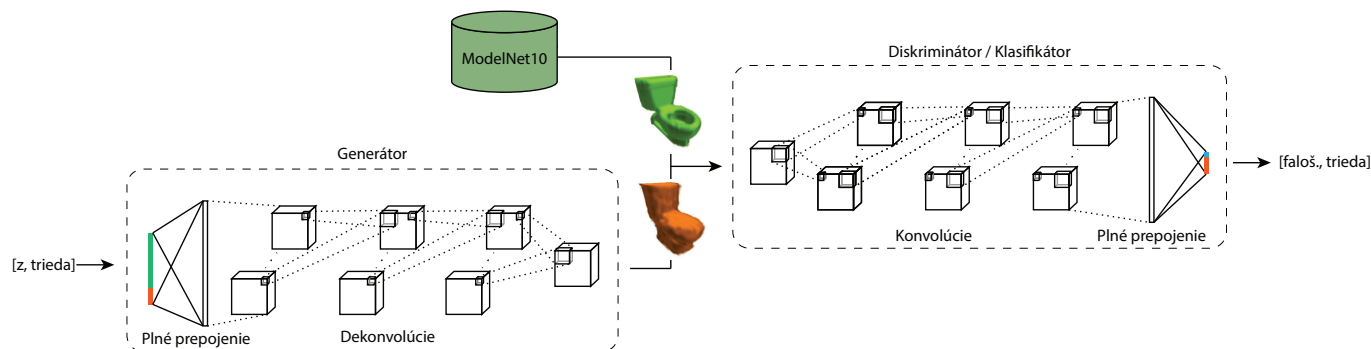
Pre generátor je stratová funkcia zvolená tak, aby minimalizovala výstup prislúchajúci „falošnej“ triede v diskriminátore, a zároveň dosiahla rovnaký výstupný vektor triedy ako podmienkový vektor triedy na vstupe generátora. Tvar tejto funkcie je v zásade identický so stratovou funkciou diskriminátora pre reálne vzorky, podľa vzťahov (4) a (5). Jediným rozdielom je vektor triedy, ktorý je generovaný náhodne, namiesto výberu z datasetu, a použitý zároveň ako vstup generátora (spojený so vektorom šumu) a ako cieľový klasifikačný vektor porovnávaný s výstupom diskriminátora. Na trénovanie generátora aj diskriminátora bol použitý optimalizačný algoritmus Adam [7].



Obr. 2. Architektúra modelov vytvorených na navrhovaný experiment na vyhodnotenie dopadov aplikácie metodiky. Prvým modelom (a) je jednoduchý 3D konvolučný klasifikátor (CNN) tréňovaný priamo na tréningovom datasete ModelNet10. Ďalším (b) je konvolučný klasifikátor (augCNN), tréňovaný na augmentovanom datasete vytvorenom kombináciou príkladov z ModelNet10 a výstupov podmieneného generátora G . Výstup generátora je označený podľa jeho vstupného podmieňujúceho vektora. Tretím modelom (c) je klasifikátor založený na podmienenej GAN sieti (CGAN), kde diskriminátor D je použitý ako klasifikátor počas testovacej fázy.



Obr. 3. Architektúra generátora. Vstupný vektor z pozostávajúci z vektora Gaussovho šumu a podmieňujúceho vektora triedy je rozšírený na plne prepojenej vstupnej vrstve a následne prechádza tromi etapami dekonvolúcie preštruktúrovanými dávkovou normalizáciou a aktivačnou funkciou Leaky ReLU.



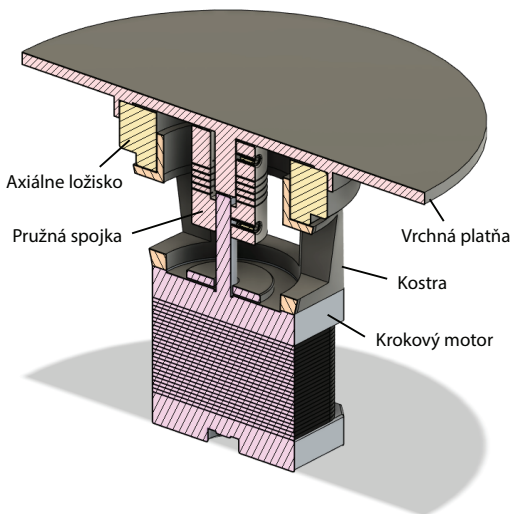
Obr. 4. Výsledná architektúra klasifikátora CGAN založeného na podmienenej GAN sieti. Generátor a diskriminátor sú zapojené sekvenčne. Počas učenia dostáva diskriminátor reálne (zelené) aj falošné (oranžové) vzorky.

B. Aplikácia na klasifikátore VoxNet

V tomto experimente sú rovnakým spôsobom vyhodnotené dopady aplikácie metodiky na existujúcom klasifikátore VoxNet [6]. Rovnako aj pri tomto klasifikátore sú porovnané 3 varianty – pôvodný, nezmenený klasifikátor VoxNet, jeho augmentovaná verzia (augVoxNet) a napokon jeho modifikácia, ktorá vznikne aplikovaním navrhutej metodiky generatívneho posilnenia (genVoxNet).

Klasifikátor VoxNet [6] je model založený na konvulčnej neurónovej sieti a určený na klasifikáciu 3D objektov v

rôznych reprezentáciách. Jeho účinnosť bola experimentálne preukázaná na LiDAR a RGBD bodových oblakoch a tiež na 3D CAD sieťových modeloch. Klasifikácia prebieha pomocou dvoch konvulčných vrstiev nasledovaných maximalizačnou zhromažďovacou vrstvou, jednou plne prepojenou skrytou vrstvou a na konci plne prepojenou výstupnou vrstvou. Pri tréňovaní je použitý algoritmus SGD (Stochastic Gradient Descent) so zotrvačnosťou spolu s L_2 a Dropout normalizáciou váh. Rovnako aj v tomto experimente sú pôvodný a augmentovaný variant klasifikátora VoxNet štruktúrne zhodné, avšak



Obr. 5. Priečny rez návrhu rotačného stola pre 3D skener.

augmentovaný klasifikátor je učný aj na výstupe natrénovaného generátora.

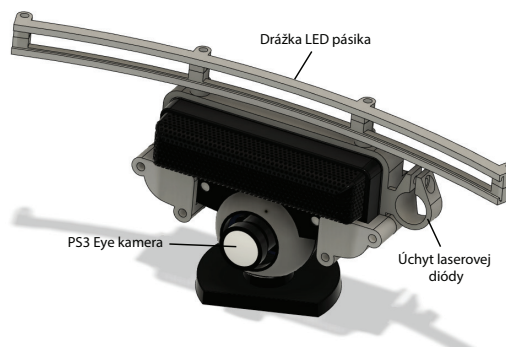
Pri aplikácii metodiky generatívneho posilnenia sme pri klasifikátore VoxNet postupovali obdobne, ako pri predchádzajúcom experimente. Vzhľadom na podobnú štruktúru s nami navrhnutým konvolučným klasifikátorom v predchádzajúcom experimente, navrhnutý generátor, zobrazený na obrázku 3, sme použili aj pre klasifikátor VoxNet. Stratové funkcie, optimalizačné algoritmy aj postup tréningu sú v zásade zhodné s predchádzajúcim experimentom.

C. Experimentálne overenie na reálnych dátach

Za účelom overenia možnosti využitia a prínosov navrhutej metodiky v reálnych podmienkach sme navrhli experiment, ktorý pozostáva z niekoľkých podúloh. Sú nimi návrh a zostrojenie 3D skenera, skenovanie niekoľkých reálnych objektov, ich transformácia do voxelovej mriežky a napokon klasifikácia takto vzniknutého datasetu reálnych dát všetkými klasifikátormi z predchádzajúcich experimentov.

Navrhnutý skener sa skladá z niekoľkých častí. Prvou je rotačný stôl poháňaný krokovým motorom, ktorý umožňuje presné natočenie skenovaného predmetu okolo zvislej osi. Tým umožní získanie snímok z viacerých, presne určených uhlov. Tento stôl sa skladá z krokového motora, ktorého hriadel je prepojený s vrchnou platňou pomocou pružnej spojky. Platňa je axiálnym ložiskom spojená s kostrou stola, ktorá je pevne pripevnená ku krokovému motoru. Náčrt rotačného stola je znázornený na obrázku 5.

Ďalšou časťou skenera je 2D kamera PS3 Eye, ktorá je vybavená úchytom pre osvetlenie vo forme bieleho LED pásika, a taktiež objímkou pre riadkový laser. Tento úchyt je navrhnutý s ohľadom na existujúci tvar tela kamery a s možnosťou nastavenia uhla laserovej diódy pomocou utiahnutia skrutky v zadnej časti tejto súčiastky. CAD model kamery s adaptérom je na obrázku 6. Osvetlenie a pohyb krokového motora sú riadené mikropočítačom Arduino Nano pripojeným k počítaču.



Obr. 6. Model kamery PS3 Eye s adaptérom na prichytenie LED pásika a riadkového lasera.

Získavanie 3D profilov skenovaných objektov je realizované trianguláciou snímaného laserového riadku. Vstupom tohto algoritmu je okrem získanej 2D snímky aj niekoľko parametrov, vrátane vzájomných uhlov a vzdialeností kamery, lasera a rotačného stola a taktiež viaceré parametre kamery a objektívu. Získané dáta sú dodatočne filtrované a spracované do 3D voxelovej mriežky. Proces spracovania a filtrovania získaných dát začína už pri získavaní snímok z kamery, ktoré sú filtrované a orezané tak, aby sa do úvahy brali iba relevantné body z laserového riadku. Po kombinácii do kompletného oblaku bodov sú eliminované všetky body pod úrovňou vodorovnej roviny XY s malou dodatočnou toleranciou. Takto získané oblaky bodov sa následne prevedú do voxelovej mriežky. Postup zodpovedá modelovaniu binárnej okupačnej mriežky, teda každý voxel má hodnotu 1, ak obsahuje aspoň 1 bod z oblaku, inak má hodnotu 0. Výsledná veľkosť mriežky je 32^3 .

Vyhodnotenie navrhutej metodiky v reálnych podmienkach spočíva vo vyhodnotení klasifikačnej presnosti pôvodných a modifikovaných klasifikátorov na získanej testovacej sade reálnych dát. Z datasetu ModelNet10 bolo vybraných 10 objektov (z každej triedy jeden), ktoré boli vytlačené na 3D tlačiarňi, zoskenované a následne klasifikované každým z navrhnutých klasifikátorov.

V. VÝSLEDKY

Hlavnými vyhodnocovacími kritériami navrhnutých modelov je presnosť klasifikácie na datasete ModelNet10 a nami vytvorenom datasete reálnych dát, a tiež závislosť tejto presnosti od množstva tréningových dát. Vyhodnotené boli aj schopnosť generovania rôznorodých reálne vyzerajúcich objektov, dopady na výpočtovú náročnosť, a taktiež získavanie 3D snímok reálnych objektov pomocou navrhnutého skenera.

A. Presnosť klasifikácie

V prvých dvoch experimentoch boli všetky tri varianty klasifikátorov (východiskový klasifikátor, augmentovaný variant a generatívny variant) vyhodnotené pomocou testovacej sady dát z datasetu ModelNet10. Vyrátná je presnosť klasifikácie a tiež stredná priemerná presnosť (angl. mean average precision, mAP). Výsledky sú zobrazené v tabuľke I,

Tabuľka I

PRESNOSŤ A PRECÍZNOSŤ KLASIFIKÁTOROV NA DATASETE MODELNET10

	Presnosť [%]	mAP [%]	Rel. presnosť [%]
CNN	83.04	83.75	100.00
augCNN	84.58	86.31	101.85
CGAN	89.21	89.18	107.43
VoxNet	85.79	89.10	100.00
augVoxNet	87.00	89.53	101.41
genVoxNet	87.67	90.21	102.19

v ktorej relatívna presnosť udáva zmenu presnosti klasifikácie vzhľadom na východiskový klasifikátor.

Ďalšie porovnanie presnosti klasifikácie ukazujú grafy ROC kriviek (receiver operating characteristic) na obrázku 7 pre prvý a na obrázku 8 pre druhý experiment. Pre klasifikátor CGAN z prvého experimentu bola vyrátaná konfúzna matica na obrázku 9.

Hoci presnosť navrhnutých modelov neprekonáva state-of-the-art, výsledky ukazujú, že tréovanie identického klasifikátora v rámci generatívnej architektúry dokáže oproti štandardnému učeniu, využívajúcemu výlučne vzorky z datasetu, signifikantne zvýšiť presnosť klasifikácie. V oboch prípadoch—CNN aj VoxNet—je možné vidieť nárast presnosti medzi východiskovým klasifikátorom a jeho generatívnym variantom. Rovnako je možné pozorovať o čosi menší, no stále relevantný nárast medzi východiskovým klasifikátorom a augmentovaným variantom. Relatívne nárasty presností sú uvedené v spomínanej tabuľke I.

Jedným z možných vysvetlení týchto konzistentných rozdielov v presnosti je to, že pripojenie generátora spôsobí zavedenie šumu do tréovacieho procesu diskriminátora / klasifikátora a tým aj posilnenie ich robustnosti. Toto vysvetlenie však nie je celkom postačujúce, nakoľko rovnaký jav prebieha aj v prípade augmentovaných variantov klasifikátorov (augCNN, augVoxNet), ktoré však nedosahujú úroveň presnosti porovnateľnú s generatívnymi variantmi (CGAN, genVoxNet). Podobne je to aj pri ďalšom možnom vysvetlení, ktoré vylepšenie presnosti klasifikácie pripisuje výlučne augmentačnému efektu generátora, ktorý generuje realistické a zároveň originálne tréovacie vzorky a tým taktiež zvyšuje robustnosť klasifikátora. Tento proces by sa mal teda v plnej sile prejavovať aj v augmentovanej konfigurácii (augCNN, augVoxNet), ktorá však, ako už bolo spomenuté, nepreukazuje rovnaké posilnenie klasifikácie ako tá generatívna (CGAN, genVoxNet). Tieto výsledky podporujú východiskový predpoklad, že medzi generatívnou a klasifikačnou časťou tejto architektúry existuje istá forma interakcie, resp. prenosu znalostí o príznakoch, ktorá prispieva k tomuto zvýšeniu klasifikačnej presnosti modelu. Konkrétny mechanizmus týchto interakcií nie je jasný a mohol by byť predmetom ďalšieho teoretického výskumu.

B. Závislosť presnosti klasifikácie od množstva tréov. dát

Vyhodnotenie vplyvu metodiky na schopnosť generalizácie, teda učenia sa z menšieho množstva dát bolo vykonané tréovaním východiskových klasifikátorov a ich generatívnych variantov na niekoľkých podmnožinách tréovacej sady Mo-

delNet10, obsahujúcich rôzne množstvo tréovacích dát. Následne bola vyhodnotená presnosť klasifikácie týchto modelov, ktorej výsledky sú zobrazené v grafe na obrázku 10. Validácia modelov bola vykonaná na kompletnej testovacej sade.

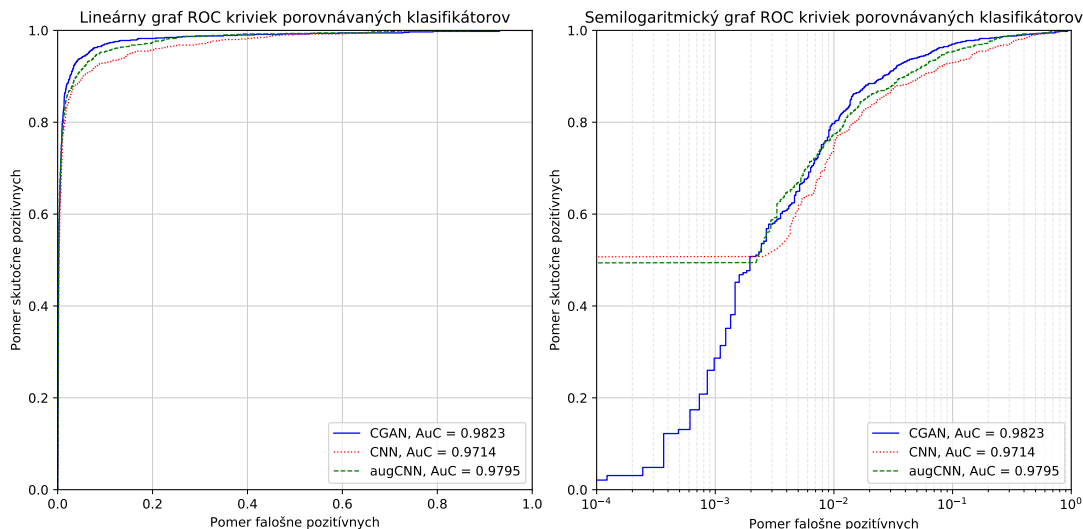
Vo výsledkoch tohto experimentu možno vidieť, že v prípade klasifikátora CNN jeho generatívny variant dosiahol lepšie výsledky pri všetkých podmnožinách tréovacej sady a pokles presnosti pri znižovaní množstva dát bol o čosi miernejší, než pri východiskovej sieti. Rozdiel vo vplyve množstva tréovacích dát na presnosť klasifikácie nie je až taký signifikantný, ako sme čakali, avšak pozitívom je, že nárast presnosti je každopádne možné dosiahnuť aj pri značne obmedzenom datasete.

V prípade modelu VoxNet sú závery podobné, avšak s jednou výnimkou. Vo všeobecnosti je pri tomto klasifikátore rozdiel v trendoch presnosti pri úbytku dát ešte výraznejší, než to bolo pri klasifikátore CNN v predchádzajúcom experimente. Výrazný rozdiel je možné vidieť najmä pri 25% podmnožine, kedy generatívny variant dosahuje o vyše 50% lepšiu presnosť klasifikácie. Výnimkou je situácia pri tréovaní na 50% podmnožine, kedy generatívny variant dosiahol horší výsledok, než pôvodný model. Zároveň vtedy pôvodný model dosiahol vyššiu presnosť ako pri tréovaní na 75% podmnožine a generatívny variant si počínal horšie ako pri 25% podmnožine. Túto anomáliu sme pozorovali pri viacerých nastaveniach hyperparametrov siete, a preto sa nazdávame, že je spôsobená konkrétnym výberom dát do tejto podmnožiny. Vzhľadom na nižšiu komplexitu architektúry ako v predchádzajúcom experimente sa domnievame, že v týchto 50% sa ocitla sada dát s takou varietou, pri ktorej bolo navýšenie množstva príznakov generátorom skôr kontraproduktívne. Taktiež je pravdepodobné, že v prípade pôvodnej siete VoxNet sa oproti 75% podmnožine vynechalo niekoľko príkladov, ktorých charakter nebol v testovacej množine až natoľko zastúpený, a teda zhodou okolností sa tým napomohlo tréovaniu menej komplexného klasifikátora. Výsledky tejto analýzy teda ukazujú, že napriek tomu, že vo väčšine prípadov aplikácia metodiky generatívneho posilnenia zvyšuje generalizačnú schopnosť klasifikátorov, nie je to pravidlom, a existujú situácie, kedy môže mať opačný efekt.

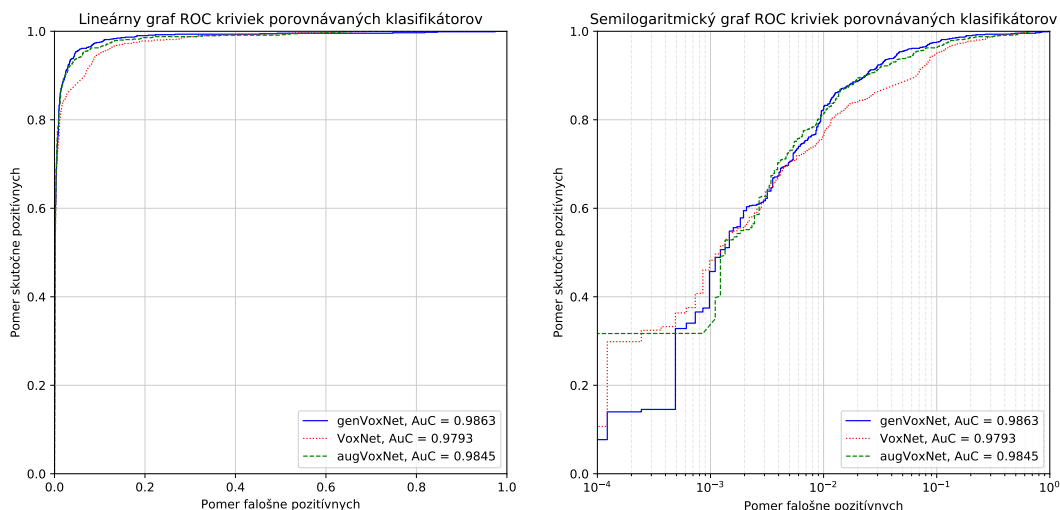
Tieto výsledky prispievajú k predpokladu, že využitím generatívneho modelovania je v klasifikátoroch možné posilniť schopnosť generalizácie, teda schopnosť učiť sa na menšom množstve dát. Pri experimentoch s postupne sa znižujúcou tréovacou sadou je možné vidieť, že generatívne varianty takmer vždy dosahujú lepšiu presnosť klasifikácie. Zároveň sa ukazuje, že úbytok tréovacích dát má na generatívne varianty o čosi menší vplyv ako na pôvodné klasifikátory, čo potvrdzuje spomínaný predpoklad.

C. Generovanie objektov

Pre overenie správnosti modelu bol taktiež vyhodnotený výstup generátora. Kvalita generovaných dát nebola primárnym cieľom návrhu tohto modelu, avšak môže slúžiť ako indikátor výskytu chýb v návrhu architektúry či v jej implementácii. Kolaps režimu (angl. mode collapse), teda situácia, kedy sa



Obr. 7. Lineárny a semilogaritmický graf ROC kriviek pre jednoduchý 3D konvolučný klasifikátor a jeho navrhnuté varianty—augmentovanú (augCNN) a generatívnu (CGAN). Tieto krivky sú vyrátané makro-priemerovaním kriviek z jednotlivých tried.

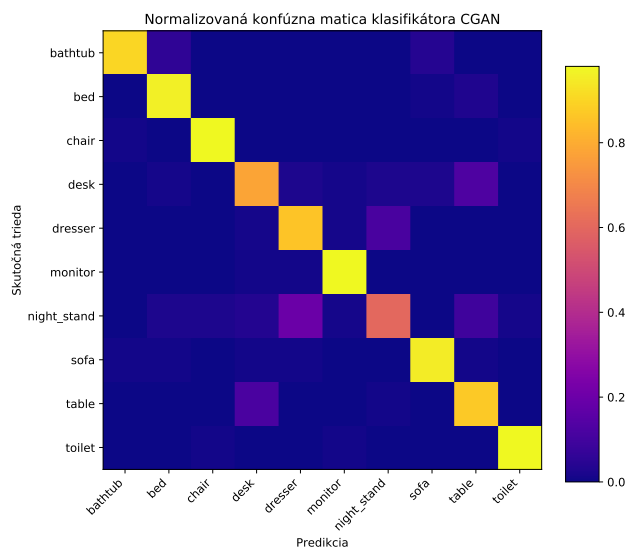


Obr. 8. Lineárny a semilogaritmický graf ROC kriviek pre každý z troch variantov modelu VoxNet. Tieto krivky sú vyrátané makro-priemerovaním kriviek z jednotlivých tried.

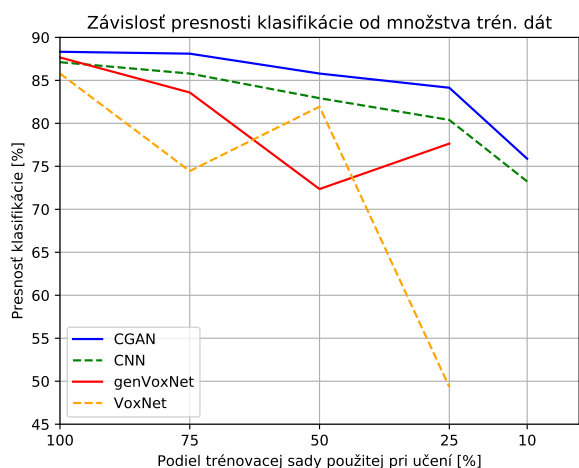
generátor naučí produkovať iba malú sadu vzoriek z ich celkovej reálnej distribúcie, je často vyskytujúcim sa problémom pri tréňovaní generatívnych modelov. Prejavuje sa ako nízka diverzita generovaných vzoriek, pri ktorej zmeny vo vstupnom vektore z nemajú takmer žiaden efekt na výstup generátora. Najvýraznejší prínos pre elimináciu kolapsu režimu a tiež pre celkové zlepšenie konvergencie siete spôsobila inicializácia optimalizačného algoritmu Adam s veľmi malou rýchlosťou učenia $\alpha \approx 10^{-4}$. Na obrázku 11 je ukázaných niekoľko vygenerovaných objektov, medzi ktorými je viditeľná variácia vo vnútri jednotlivých tried. Vo výstupe generátora je možné badať aj viditeľnú úroveň šumu a taktiež rôzne artefakty, ktoré však okrem nižšej vizuálnej kvality nemali žiaden negatívny dopad na klasifikáciu.

D. Výpočtová náročnosť

Vyhodnotený bol tiež dopad metodiky na výpočtovú efektívnosť modelu CNN a jeho augmentovaného a generatívneho variantu. Vzhľadom na to, že ich učenie prebiehalo paralelne, vieme porovnať vývoj presnosti klasifikácie vzhľadom na počet krokov. Na našom hardvéri (Intel i7 6700K CPU, 16GB RAM, Nvidia GeForce GTX 1080) dosiahol konvolučný klasifikátor (CNN) maximálnu presnosť okolo kroku 15 000. Augmentovaný klasifikátor (augCNN) ju dosiahol po 40 000 krokoch. Klasifikátor CGAN dosiahol svoje maximum až okolo kroku 88 000. Toto by sa pravdepodobne nepremietlo proporcionálne na celkový tréňovací čas v prípade, že by boli tréňované samostatne, avšak ukazuje to, že zvýšenie komplexity spôsobené generatívnym posilnením zapríčiňuje významný nárast v dĺžke tréňovania modelu.

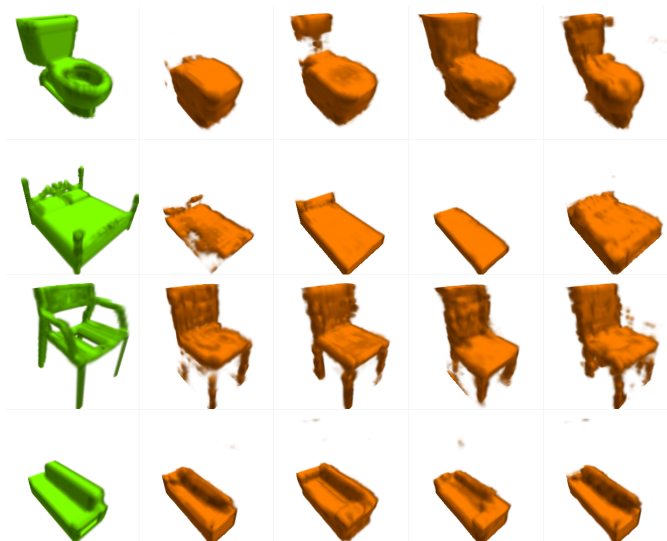


Obr. 9. Konfúzna matica vyhodnocujúca navrhnutý CGAN klasifikátor na testovacej sade z datasetu ModelNet10. Hodnoty sú normalizované v intervale (0, 1) pre každú cieľovú triedu. Z matice je zjavné, že najviac zámen sa udialo pri klasifikácii objektov z tried desk, table a nightstand. To je najpravdepodobnejšie možné pripísať nízkemu rozlíšeniu a rôznej mierke objektov, spôsobenej použitým voxelizačným nástrojom, ktorý škáluje modely tak, aby zabrali čo najviac miesta vo voxelovej mriežke.

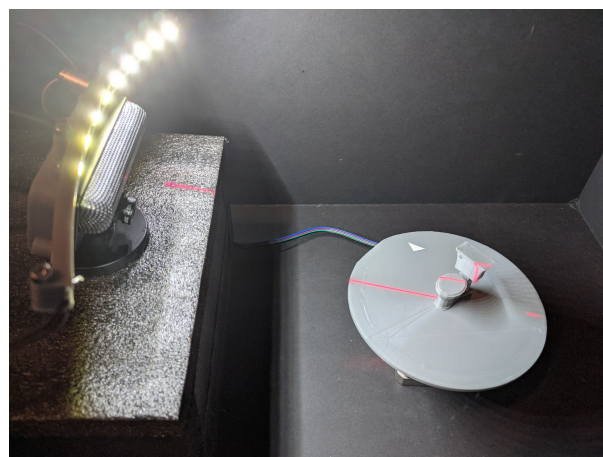


Obr. 10. Vplyv množstva trénovacích dát na presnosť klasifikátorov CNN a VoxNet a ich generatívnych variantov.

Rýchlosť inferencie bola meraná samostatne a výsledky potvrdzujú očakávaný jav: generatívne posilnenie signifikatne nemení štruktúru klasifikátora a jeho zložitosť sa tým nezvyší natoľko, aby to spôsobilo merateľný nárast výpočtovej náročnosti inferencie. Testovacia sada s 908 vzorkami bola klasifikovaná za 830ms (CNN), 826ms (augCNN), a 786ms (CGAN). To zodpovedá rýchlosti inferencie 1092, 1098, resp. 1153 vzoriek za sekundu.



Obr. 11. Výstup generátora CGAN klasifikátora pri náhodnom vstupnom šume. Podmieňovací vektor triedy bol zosťorený tak, aby každý riadok obsahoval vzorku z rovnakej triedy datasetu ModelNet10, zhora nadol v tomto poradí: toilet, bed, chair a sofa. Prvý stĺpec obsahuje náhodnú vzorku z trénovacej sady pre danú triedu.



Obr. 12. Fotografia zosťoreného rotačného 3D skenera. V ľavej časti je možné vidieť 2D kameru PS3 Eye s adaptérom na riadkový laser a nasvetľovací LED pásik. V pravej časti pod úrovňou kamery sa nachádza rotačný stôl poháňaný krokovým motorom.

E. Overenie na reálnych dátach

Experimentálne overenie metodiky na reálnych dátach pozostáva z návrhu a realizácie 3D skenera, nasnímania reálnych objektov a následnom vyhodnotení presnosti klasifikátorov a ich generatívnych variantov na takto získanom datasete. Rotačný skener bol zosťorený podľa uvedeného popisu a prezentovaných CAD modelov. Fotografia oživeného systému je na obrázku 12.

Pred samotným snímaním boli najprv kalibrované vnútorné parametre kamery, teda parametre deformácie obrazu spôsobenej použitým objektívom. Na kalibráciu vonkajších parametrov, teda priestorových vzťahov medzi kamerou, laserom a rotačným stolom sme vyvinuli nástroj, ktorý v reálnom čase

Tabuľka II

VÝSLEDKY KLASIFIKÁCIE REÁLNYCH OBJEKTOV Z ICH 3D SKENOV.

	Správne klasifikovaných z 10
CNN	9
augCNN	9
CGAN	10
VoxNet	9
augVoxNet	9
genVoxNet	10

na obraze z kamery zobrazuje viacero indikátorov, ktoré používateľ a navedú k správne manuálnemu nastaveniu systému. Proces kalibrácie sústavy pozostáva z nastavenia natočenia riadkového lasera okolo osi diódy a zabezpečenia spoločného prieniku priemetu laserového lúča, stredú rotačného stola a optickej osi kamery. Medzi parametre triangulácie patria aj vzdialenosť a uhol laserovej diódy vzhľadom na optickú os kamery a elevácia kamery (uhol s vodorovnou rovinou), ktoré je možné odčítať ručne, prípadne odvodiť spätne po nasnímaní kalibračného predmetu so známymi rozmermi.

Triangulácia nasleduje po detekcii laserového riadku pomocou hľadania maximálnej hodnoty v jednotlivých riadkoch červeného kanálu 2D obrazu. Triangulovaný profil je následne rotovaný podľa vodorovnej osi X (priechnej z pohľadu kamery), čím sa kompenzuje elevácia kamery a nakoniec podľa zvislej osi Z, čím sa aplikuje otočenie objektu na rotačnom stole. Po zozbieraní 90 trojrozmerných profilov so vzájomným otočením 4° do bodového oblaku je výsledok filtrovaný a voxelizovaný do mriežky o veľkosti 32^3 . Jednotlivé etapy snímání sú znázornené na obrázku 13.

Týmto spôsobom bolo nasnímaných 10 objektov z datasetu ModelNet10 vytlačených na 3D tlačiarňi, ktorých pôvodné a naskenované voxelové mriežky sú porovnané na obrázku 14. Tieto modely boli následne použité ako testovacia sada pre vyhodnotenie presnosti použitých klasifikátorov a ich variantov.

Získaný testovací dataset skenov reálnych objektov bol vyhodnotený pomocou klasifikátorov CNN a VoxNet a ich augmentovaných a generatívnych variantov. Z výsledkov v tabuľke II vyplýva, že aplikácia metodiky generatívneho posilnenia bola prínosom aj v týchto reálnych podmienkach, keďže generatívne varianty klasifikátorov (CGAN a genVoxNet) dosiahli 100% úspešnosť, pričom ostatné sa zmýlili v 1 z 10 klasifikácií. Predpokladáme, že tento prínos je spôsobený podobnosťou rôznych artefaktov a nedokonalostí v skenovaných modeloch a vo vzorkách vytvorených generátorom počas kontradiktórneho učenia. Dalo by sa predpokladať, že je to následok augmentácie pôvodného tréningového datasetu generátorom, avšak vidíme, že aj v prípade použitia augmentovaných variantov klasifikátorov došlo k omylom. Vzhľadom na malý počet vyhodnotených vzoriek nie je možné vyviesť všeobecné závery, avšak domnievame sa, že v tomto prípade stojí za zvýšením presnosti generatívnych variantov aj predpokladaný mechanizmus prenosu generatívnych príznakov do klasifikátora počas spoločného kontradiktórneho učenia.

VI. ZÁVER

Tento výskum mal za úlohu analyzovať súčasné poznatky v aplikácii generatívneho modelovania v klasifikácii 3D obrazov a hľadať možné vylepšenia v existujúcich prístupoch v tejto oblasti. Pri analýze stavu tejto problematiky sa ukázalo, že popri súčasnej konkurencii generatívnych a negeneratívnych prístupov existuje potenciál na ich kombináciu, teda na spojenie silných stránok z oboch strán a vytvorenie ešte silnejšieho celku. Výsledkom tohto výskumu je nami navrhnutá metodika generatívneho posilnenia klasifikátorov 3D obrazov, ktorá formalizuje postup vylepšenia existujúcich negeneratívnych klasifikátorov. Cieľom tejto metodiky je zvýšenie presnosti klasifikácie existujúcich architektúr, a zároveň posilnenie ich schopnosti generalizácie.

Vyhodnotenie dopadov navrhutej metodiky bolo realizované na nami navrhnutom konvolučnom klasifikátore a existujúcom klasifikátore VoxNet. Experimenty na vytvorených generatívnych variantoch týchto klasifikátorov boli navrhnuté za účelom vyhodnotenia vplyvu metodiky na spomínané vlastnosti klasifikátorov, tj. presnosť klasifikácie a schopnosť generalizácie.

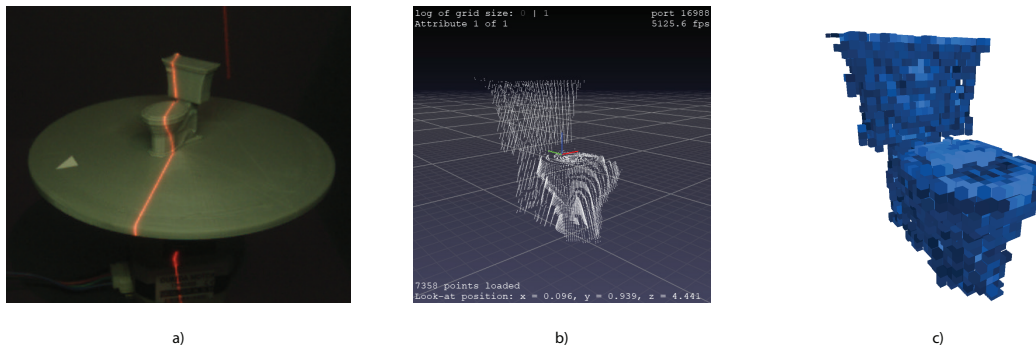
Ukázalo sa, že aplikáciou tejto metodiky je skutočne možné nezanedbateľne zvýšiť presnosť klasifikácie, a takisto týmto spôsobom modifikované klasifikátory dosahujú lepšie výsledky aj pri nižšom množstve tréningových dát. Nakoľko táto metodika prakticky nezvyšuje komplexitu samotného klasifikátora, tieto prínosy sú dostupné bez zvýšených výpočtových nárokov na inferenciu. Súčasťou experimentov bolo aj overenie prínosov tejto metodiky pri klasifikácii reálnych dát, pri ktorom sa potvrdilo, že prínosy navrhutej metodiky sú prenositeľné aj do reálnych podmienok.

POĎAKOVANIE

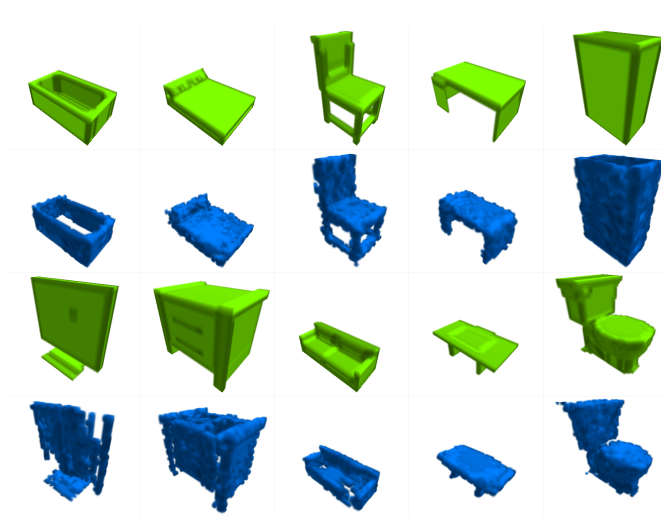
Dizertačná práca bola riešená s pomocou projektu „Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií – II. fáza“, kód ITMS: 313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] M. Varga a J. Jadlovský, „Evaluation of Depth Modality in Convolutional Neural Network Classification of RGB-D Images,“ *Acta Electrotechnica et Informatica*, roč. 18, s. 26–31, 2018. DOI: 10.15546/aei-2018-0029.
- [2] M. Varga, J. Jadlovský a S. Jadlovská, „Generative Enhancement of 3D Image Classifiers,“ *Applied Sciences*, roč. 10, č. 21, s. 7433, okt. 2020, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app10217433.
- [3] I. Goodfellow, „NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks,“ *arXiv preprint arXiv:1701.00160*, 2016. arXiv: 1701.00160.
- [4] Z. Wu, S. Song, A. Khosla, F. Yu, L. Zhang, X. Tang a J. Xiao, „3d Shapenets: A Deep Representation for Volumetric Shapes,“ in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, s. 1912–1920.



Obr. 13. Jednotlivé etapy získavania 3D skenu reálneho objektu a jeho spracovania. V prvom kroku sú získané 2D snímky objektu osvetleného riadkovým laserom (a). Následne je detegovaný laserový riadok triangulovaný, čím vznikne bodový 3D profil a ich akumuláciou z viacerých snímkov vzniká 3D bodový oblak (b). Nakoniec je bodový oblak voxelizovaný do mriežky (c).



Obr. 14. Porovnanie pôvodných objektov (zelená) z datasetu ModelNet10 a ich skenov (modrá). Modely z datasetu ModelNet10 boli vytlačené na 3D tlačiarňu a následne zosnímané zostrojeným 3D skenerom. Získaný 3D bodový oblak bol následne transformovaný na voxelovú mriežku zobrazenú na obrázku.

- [5] T. Salimans, I. Goodfellow, W. Zaremba, V. Cheung, A. Radford a X. Chen, „Improved Techniques for Training GANs,“ in *Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems*, ed. NIPS'16, Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc., 2016, s. 2234–2242, ISBN: 978-1-5108-3881-9. arXiv: 1606.03498.
- [6] D. Maturana a S. Scherer, „Voxnet: A 3d Convolutional Neural Network for Real-Time Object Recognition,“ in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference On*, IEEE, 2015, s. 922–928.
- [7] D. P. Kingma a J. Ba, „Adam: A Method for Stochastic Optimization,“ in *3rd International Conference for Learning Representations*, San Diego, 2015.

Polovodičové technológie, návrh a finalizácia UWB ASIC obvodov

Miroslav Sokol

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická Univerzita v Košiciach
Email: miroslav.sokol@tuke.sk

Pavol Galajda

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

Abstrakt—Prezentovaný článok opisuje základné polovodičové technológie použité pri návrhu UWB senzorov využívajúcich princíp kontinuálne vysielanej elektromagnetickej vlny, takzvanej M-postupnosti. Je tiež uvedená problematika návrhu týchto systémov z pohľadu návrhových prostriedkov a technologických riešení. Konkrétne spôsob merania a verifikácie navrhnutých UWB obvodov, možnosti ich zapuzdrenia a návrhu DPS nosičov, pre samotné meranie alebo vrámci implementácie do senzorového systému. Článok sa tiež venuje základným informáciám a súčasnému stavu ako sú realizované UWB senzory. V kontexte problematiky UWB radarových senzorov je spomenutá realizácia základného UWB systému pre rôzne nové aplikácie týchto systémov v moderných senzorových sieťach.

Kľúčové slová — UWB, ASIC, M-postupnosť, senzorová sieť, radar

I. ÚVOD

S príchodom miniaturizácie v posledných desaťročiach je pomerne veľký dopyt po vývoji špeciálne určených elektronických obvodov realizovaných v polovodičovej štruktúre nazývaných aj ASIC (angl. Application Specific Integrated Circuit). Termín integrovaný obvod pre špecifické aplikácie ASIC, má širokú škálu aplikácií definovaných užívateľom. Presne povedané, odkazuje sa jednoducho na integrovaný systém, ktorý je možné navrhnuť presne pre konkrétnu aplikáciu [1]. Miniaturizácia elektroniky a vývoj polovodičových technológií, v ktorých sú ASIC obvody vyrábané, otvára dvere k vývoju malých a kompaktných vysokofrekvenčných a širokopásmových senzorových (angl. Ultra-WideBand) systémov. Ide o systémy od rádii a televízií [2], cez mobilné telefóny [3], až po satelitné [4], senzorové, radarové [5] a inteligentné sieťové systémy [6]. Širokopásmové zariadenia sa však nevyskytujú len v komerčnej sfére. V laboratóriách, kde sú vyvíjané takéto širokopásmové zariadenia sú potrebné ďalšie veľmi presné meracie a diagnostické širokopásmové zariadenia a takisto zariadenia, zostrojené priamo na vedecké účely.

Vzhľadom nato, že UWB senzorové systémy majú široký záber nových a inovatívnych hardvérových aj softvérových riešení, sa v našej výskumnej skupine venujeme hlavne UWB sensorike krátkého dosahu, založenej na princípe používajúcom M-postupnosti [7],[8] a to najmä návrhu a realizácii zákazníckych integrovaných obvodov a dosiek plošných spojov DPS (angl. Printed Circuit Board, PCB) pre tieto

UWB senzorové systémy. Pomocou týchto návrhov sú potom vytvárané komplexnejšie štruktúry pre UWB senzorové systémy.

Tieto systémy nachádzajú uplatnenie v rôznych oblastiach nedeštruktívneho testovania v rôznych priemyselných oblastiach [9], [10] [11], [12]. V konkrétnych aplikáciách sú UWB senzorové systémy používané pre georadary (angl. Ground Penetrating Radar, GPR) [13] [14], lokalizácia a hľadanie osôb za prekážkami a stenami [15], [16], lokalizácia všeobecných predmetov alebo robotov [17], v oblasti neinvazívnej diagnostiky a detekcie stavu v medicíne [18], [19], [20] a tiež aj v automobilovom priemysle [21], [22]. Prvá časť článku je venovaná úvodu do problematiky polovodičových technológií použitých pri návrhu UWB systémov založených na M-postupnosti. Ďalej sa článok venuje technologickej, návrhovej a realizačnej stránke integrovaných obvodov pre UWB senzorové systémy založené na M-postupnosti. Cieľom je preukázať použiteľnosť, poukázať na dobré parametre a hlavne nižšiu cenu a tým lepšiu aplikovateľnosť UWB senzorových systémov v rôznych oblastiach.

II. VÝBER POLOVODIČOVEJ TECHNOLOGIE

Na prelome osemdesiatych a deväťdesiatych rokov nastala revolúcia v technológii, vývojom a masovým aplikovaním kremíkovo-germániových (SiGe) tranzistorov. BiCMOS technológia na báze SiGe tak umožnila vývoj globálnych komunikácií, internetu, GPS, veľmi rýchlych AD prevodníkov, radarov a pod. [23]. Dnes existuje veľké množstvo výrobcov, ktorý ponúkajú SiGe BiCMOS technológiu, no väčšinou vyrábajú vlastné produkty vo veľkých sériách. Preto by bola výroba prototypov v rámci externej zákazky veľmi nákladná. Túto bariéru redukujú projekty ako EURO PRACTICE [24] a Circuits Multi Projets (CMP) [25], v ktorých je možné podieľať sa na vývoji prototypov integrovaných obvodov. Tieto projekty spájajú rôzne prototypové série a výrobcov polovodičov za účelom lacnejšej prototypovej výroby pre vzdelávacie a výskumné inštitúcie. EURO PRACTICE a CMP poskytujú popredných výrobcov polovodičových technológií ako sú TSMC [26], STmicroelectronics [27], IHP [28], AMS [29] a ďalšie. Pre UWB senzorové systémy sú používané dve polovodičové technológie a to 0,35 μm BiCMOS SiGe technológia od rakúskeho výrobcu AMS a 0,25 μm SiGe BiCMOS technológia od

nemeckého výrobcu IHP. Pre návrh senzorových systémov a overovanie nových funkčných prototypov predstavujú zvolené technológie dobrý kompromis ceny prototypu a poskytnutých parametrov, najmä vtedy ak je potrebné overiť funkčné bloky systému samostatne. V prípade návrhu celého systému ako jedného čipu vo vyššej integrácii a drahšej ceny polovodičovej technológii, predstavuje pre návrhára určitý risk. V prípade potreby vyšších frekvencií rádovo desiatky GHz je možné použiť drahšiu 0,13 μm BiCMOS SiGe technológiu a podobné technológie z ponuky firmy IHP [28]. Ďalšie vlastnosti a možnosti v rámci oboch použitých technológií sú zhrnuté v nasledujúcom texte.

Charakteristika 0,35 μm BiCMOS SiGe S35D4M5 technológie od výrobcu AMS [30]:

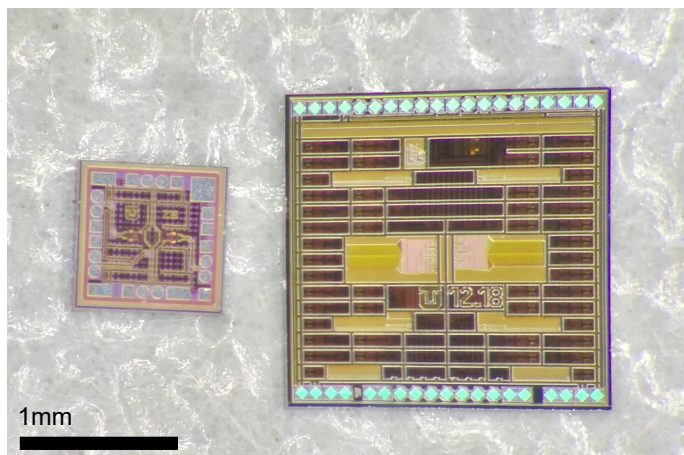
- Počet metalických vrstiev: 4, z toho 1x hrubá vrstva
- Maximálna veľkosť čipu: 2x2 cm
- Minimálna veľkosť čipu: 4 mm² (2x2 mm)
- Teplotné rozpätie: -40°C. až +125°C.
- Maximálne napájacie napätia: od 2.5 V až 12 V
- Nominálne napájacie napätia CMOS logiky: 3,3 V
- Oblasť aplikácií: zmiešané analógovo-digitálne obvody, RF aplikácie, veľké digitálne návrhy, systémy na čipe.
- Podporované vývojové prostriedky: Cadence IC 6.1.5
- Počet kusov dodaných v rámci MPW prototypovej výroby: 40

Charakteristika a vlastnosti 0,25 μm BiCMOS SiGe SG25H3 technológie od výrobcu IHP [30]:

- Počet metalických vrstiev: 5, z toho 2x hrubá vrstva
- Minimálna veľkosť čipu: 0,8 mm²
- Teplotné rozpätie: -40°C. až +125°C.
- Maximálne napájacie napätia: od 2.5 V až 7 V
- Nominálne napájacie napätia CMOS logiky: 2,5 V
- Podpora návrhu cievok
- Oblasť aplikácií: zmiešané analógovo-digitálne obvody, RF aplikácie, veľké digitálne návrhy, systémy na čipe.
- Podporované vývojové prostriedky: Cadence IC 6.1.5
- Počet kusov dodaných v rámci MPW prototypovej výroby: 40

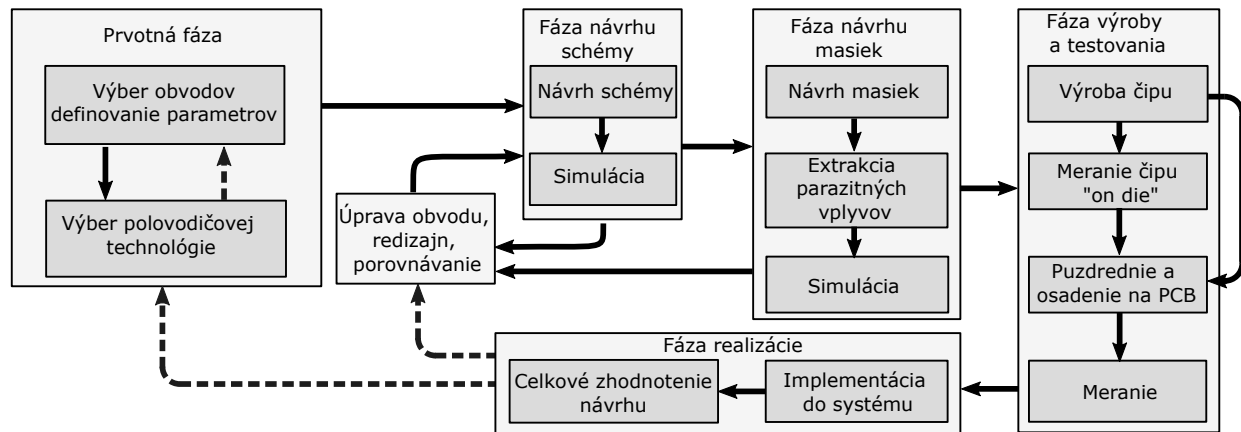
III. VÝVOJOVÉ PROSTRIEDKY, NÁVRH A FINALIZÁCIA ČIPOV

Automatizácia návrhových prác v elektronike (angl. Electronic design automation, EDA) a počítačové návrhové prostriedky (angl. Computer aided design, CAD) sa začali používať vo väčšej miere začiatkom deväťdesiatych rokov. Tieto automatizované nástroje sa používajú na vývoj a výrobu moderných elektronických obvodov ako sú ASIC, FPGA, CPLD, analógové, digitálne, analógovo-digitálne zmiešané integrované obvody a DPS. Celé spektrum dnešného elektronického hardvéru je navrhované pomocou počítačov a programov EDA. Zatiaľ čo analógové a vysokofrekvenčné obvody tvoria omnoho menšiu časť dizajnu než ich digitálny náprotivok, sú najťažšie na návrh a vyžadujú podstatne viac času a odbornosti. V skutočnosti sa zhruba 75% času návrhu vynaloží na návrh analógových častí. V rámci návrhu sa veľa času



Obr. 1: Porovnanie veľkosti čipov technológií SG25H3 a S35D4M5.

vynaloží aj na projektové práce v otázkach rozhrania, knižníc a integrácie [31]. V procese návrhu analógových čipov je potrebné vykonať súbor procedúr na dosiahnutie konkrétneho výsledku. Na Obr. 2 je zobrazený vývojový diagram pre jednotlivé fázy návrhu integrovaných obvodov. Existuje veľa EDA vývojových prostriedkov na návrh integrovaných obvodov. Tie najznámejšie sú Cadence, Mentor Graphics, Synopsys Ansoft a pod. Výber EDA nástrojov úzko súvisí s výberom polovodičovej technológie. Vo väčšine prípadov výrobcovia polovodičovej technológie poskytujú podporu len pre vybrané EDA nástroje. Podpora predstavuje balík nástrojov, knižníc, modelov a komponentov pre danú výrobnú technológiu. Po vyšpecifikovaní požiadaviek a určenia integrovaného obvodu je potrebné zvoliť topológiu obvodu. V prípade väčších návrhov je vytvorená bloková schéma, ktorá pozostáva z čiastkových schém. Z výslednej schémy sa syntetizuje textový súbor, známy ako netlist. Typické analógové a vysokofrekvenčné obvody používajú na simulačnej úrovni jazyk SPICE. Súčasťou Cadence Virtuoso je balík pokročilých simulátorov Spectre. Spectre obsahuje simulačné modely pre SPICE, RF, FastSPICE a simulátory zmiešaných signálov [32]. Ďalším krokom procesu návrhu je vykonanie rozloženia prvkov obvodu na čipe. Jednotlivé komponenty schémy obvodu sú fyzicky rozmiestnené a rozhoduje sa o ich umiestnení a prepojení. Kritické analógové bloky sú však spravidla umiestňované manuálne. Manuálne umiestňovanie si však vyžaduje zručnosť návrhára. Cadence obsahuje nástroj, ktorý vykonáva kontrolu návrhových pravidiel DRC (angl. Design Rule Check). Realizuje kontrolu rozmiestnenia, minimálne rozostupy jednotlivých prvkov, upozornenia na pripojenia substrátu, minimálne medzery medzi vodičmi, maximálne šírky vodičov a pod. Ďalej je v balíku Assura implementovaný nástroj LVS (angl. Layout vs Schematic) pre kontrolu zhodnosti schémy s rozmiestnením a zapojením prvkov na čipe. Po kontrole zhodnosti schémy a layoutu je vykonaná extrakcia parazitných vplyvov po rozmiestnení a prepojení jednotlivých navrhovaného systému. Extrakcia parazitných vlastností návrhu je



Obr. 2: Vývojový diagram návrhu integrovaných obvodov

vykonaná pomocou nástroja Quantus QRC. Po vykonanej extrakcii parazit je v rámci simulácie layoutu je vygenerovaný netlist aj s parazitnými prvkami. Na základe simulácie po layoutu (angl. Post Layout Simulation) sa pokračuje ďalej v návrhu, alebo sa prikróči k úprave návrhu schémy aj layoutu. Po dokončení návrhu je potrebné vygenerovať podklady pre výrobcu. Cadence ponúka export layoutu vo formáte GDSII. Tento formát zlučuje obrázky a masky všetkých použitých vrstiev návrhu. Trvanie výroby výsledného prototypu závisí od konkrétneho výrobcu a vyťaženia výrobnéj linky a trvá od 5 do 10 mesiacov.

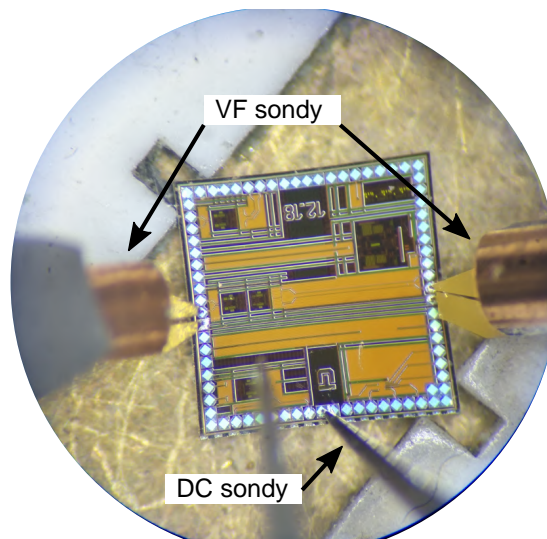
IV. MERANIE ASIC PROTOTYPOV

Po vyrobení prototypov je potrebné reálne overiť návrh. Na relatívne rýchle overenie funkčnosti slúži meracia stanica (angl. Probe-station). Do tejto stanice sa umiestni holý nezapuzdrený prototyp čipu. Stanica disponuje mikroskopom na orientáciu pri malých rozmeroch a na umiestnenie meracích mikrohrotov a mikrosond. Tieto meracie sondy sa umiestňujú rovno na vyvedené kontaktné plošky okolo čipu.

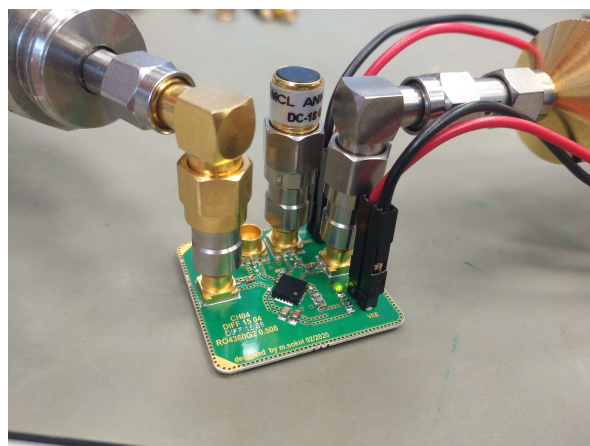
Signál z meracích sond je ďalej distribuovaný pomocou koaxiálneho kábla do meracích prístrojov. Na obr. 3 je zväčšený pohľad na nakontaktované meracie hroty priamo na čip. Meracie sondy sú umiestnené na polohovacích držiakoch, ktoré je možné nastavovať s mikrometrovou presnosťou. To zaručí presnú pozíciu hrotu na kontaktnej ploške čipu. Ak sú parametre postačujúce a vyhovujú požadovanému UWB sensorovému systému, je možné ďalej kontaktovať výrobné čipy do puzdier a implementovať ich do určeného systému. Na Obr.4 je možné vidieť meranie zapuzdreného ASIC obvodu osadeného na DPS.

V. KONTAKTOVANIE A ZAPUZDRENIE ČIPOV

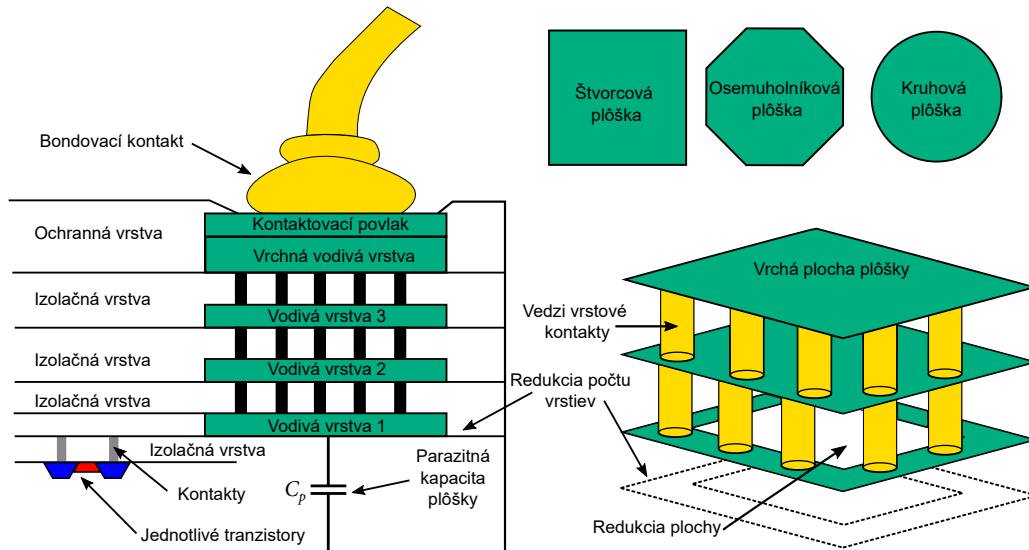
Výsledné vlastnosti navrhnutého polovodičového obvodu nezávisia len na šikovnosti a znalosti návrhára, ale aj na technických a technologických limitoch výrobného procesu, spôsobe bondovania a použitia čipu. Pre vyvedenie signálu von z čipu slúžia kontaktovacie, resp. bondovacie plošky, na ktoré sa kontaktujú bondovacie drôty. Bondovacia ploška vo väčšine



Obr. 3: Zväčšený pohľad na nakontaktované meracie mikrohroty a mikrosondy



Obr. 4: Zapuzdrený čip v puzdre QFM a osadený na DPS, v priebehu merania

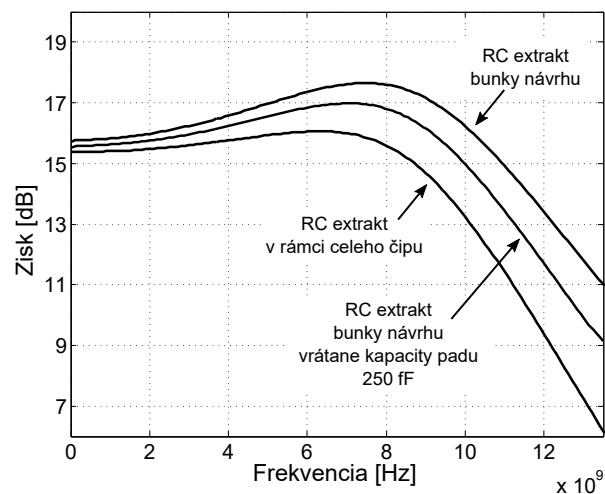


Obr. 5: Prierez a štruktúra bondovacej plôšky

případov pozostáva zo všetkých metalických vrstiev, ktoré daná polovodičová technológia poskytuje a ktoré sú prepojené medzivrstvovými prekovmi. Takáto štruktúra sa vytvára z dôvodu vyššej mechanickej pevnosti pri kontaktovaní, pozri Obr. 5. Pri návrhu vysokofrekvenčných obvodov je veľkosť plochy a štruktúra bondovacej plôšky veľmi dôležitá. Takáto plocha vytvára parazitnú kapacitu, ktorá zhoršuje vysokofrekvenčné vlastnosti a znižuje šírku pásma navrhnutých obvodov. Túto kapacitu je možné redukovať pomocou tvaru bondovacej plôšky. Štvorcové plôšky sa bežne používajú pre pomalé jednosmerné signály a napájanie obvodu. Zmenším štvorcovej plôšky na osemuholníkovú alebo kruhovú plôšku sa zníži parazitná kapacita. Takéto osemuholníkové plôšky sú potom použité pre vysokofrekvenčné signály.

Porovnanie vplyvu kapacity bondovacej plôšky na šírku pásma navrhnutého obvodu zosilňovača je zobrazené na Obr.6. Porovnávaný je zisk v rámci návrhu, teda len simulácia bunky zosilňovača, kde je výsledná šírka pásma najvyššia. Ďalej bola k tejto bunke, na výstup zosilňovača pridaná umelá kapacita 250 fF, ktorú predstavuje bondovacia plôška s veľkostiou 95x95 μm. Je vidieť že šírka frekvenčného pásma klesla takmer o 1 GHz. Posledný porovnávací scenár predstavuje RC extrakt celého čipu, kde je bunka zosilňovača umiestnená, čo zahrňuje prepoje, ostatné parazitné kapacity a tiež kapacity ostatných bondovacích plôšok pripojených k bunke zosilňovača. Je vidieť, že šírka pásma je v tomto prípade najnižšia a to až o 2 GHz.

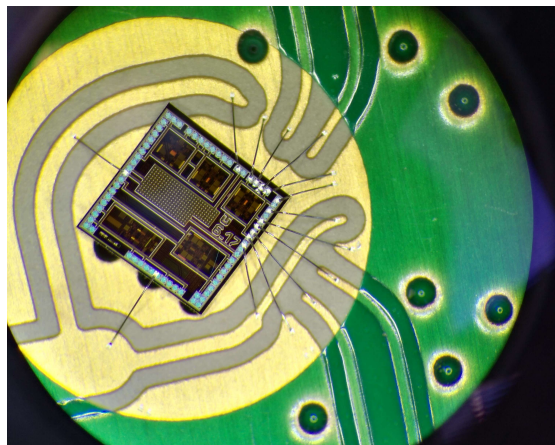
Pre rýchlejšie overenie, prípadné ďalšie testovanie a implementáciu čipu do systému, je možné hotové čipy bondovať priamo na prototypovú DPS, pozri Obr.7. Ďalšou a v podstate najpoužívanejšou metódou je bondovanie čipov do puzdier. Bondovanie prototypov čipov do puzdier umožňuje jednoduchšiu manipuláciu s čipom, jednoduché spájkovanie na DPS a znovu použiteľnosť, keď je možné použitý čip od spájkovať a použiť na inej DPS. Pre zapuzdrenie navrhnutých



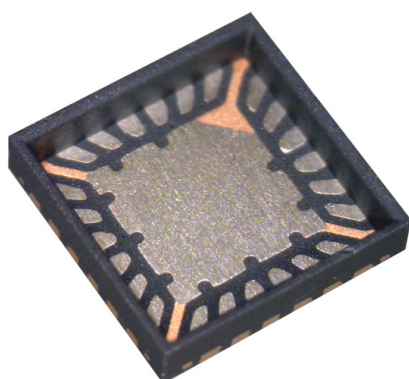
Obr. 6: Porovnanie vplyvu kapacity bondovacej plôšky na navrhnutý obvod

obvodov sú používané plastové alebo keramické vysokofrekvenčne optimalizované QFN (Quad Flat No-leads package) puzdrá so vzduchovou výplňou, pozri Obr.8. Tieto puzdrá zabezpečujú dobré frekvenčné vlastnosti až do frekvencií 20 GHz [33]. Zapuzdrenie konkrétnych komponentov a obvodov pre prototypy UWB senzorového systému, bolo najčastejšie realizované do puzdier QFN24 4x4 mm a QFN32 5x5 mm.

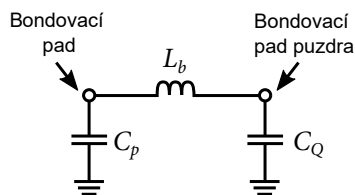
Model bondovania do puzdra QFN zahŕňa, parazitnú kapacitu bondovacej plôšky C_p , indukčnosť bondovacieho drôtu L_b a kapacitu bondovacej plôšky QFN puzdra C_Q . Náhradná schéma obvodu je zobrazená na Obr.9. Takáto schéma predstavuje v podstate dolnopriepustný filter, čo zhoršuje vysokofrekvenčné vlastnosti navrhovaných širokopásmových obvodov. Pri bondovaní do väčších puzdier ako napríklad puzdro QFN32 (5x5 mm), dosahuje dĺžka bondovacích drôtov v priemere 1,5 mm. Boli použité zlaté bondovacie drôty s priemerom



Obr. 7: Nakontaktovaný čip priamo na DPS.

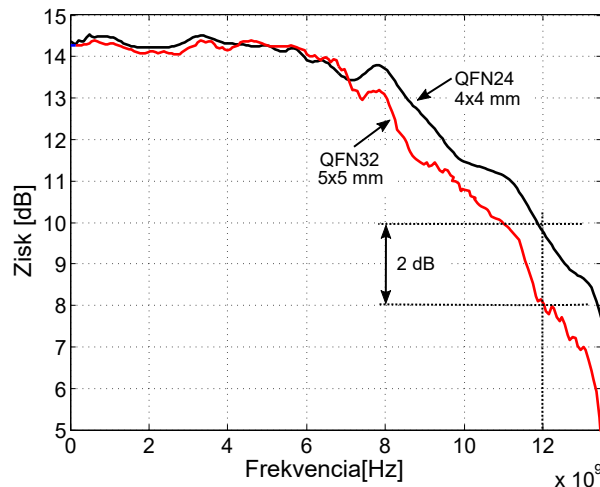


Obr. 8: Príklad osadenia čipu na DPS a príklad puzdra QFN24[34].



Obr. 9: Náhradná schéma bondovacieho obvodu.

25 μm . Výsledná indukčnosť L_b pre bondovací drôt bola vypočítaná na základe vzťahov uvedených v [35]. Indukčnosť bondovacieho drôtu s dĺžkou 1,5 mm dosahuje 1,42 nH. Pridaním indukčnosti bondovacieho drôtu do schémy boli výsledky veľmi podobné reálnym meraniam. Graf na Obr. 10 predstavuje porovnanie zisku a šírky pásma širokopásmového zosilňovača, ktorý bol zapuzdrený v puzdre QFN24 (4x4 mm) a QFN32 (5x5 mm). Pre puzdro QFN24 (4x4 mm) s osadeným zosilňovačom bola približná indukčnosť bondovacieho drôtu 0,6 nH, a pre puzdro QFN32 (5x5 mm) približne 1,4 nH. V tomto prípade je vidieť pokles zisku a šírky pásma rovnakého zosilňovača v puzdre QFN32 (5x5 mm) až o 2 dB pri frekvencii 12 GHz. Z výsledkov vyplýva, že pre dosiahnutie lepších vysokofrekvenčných vlastností je potrebné používať



Obr. 10: Porovnanie meraní širokopásmového zosilňovača v puzdách QFN24 a QFN32

bondovacie plošky s čo najmenšou plochou a tiež čo najkratšie bondovacie drôty. Tiež je nutné prispôsobiť veľkosť používaných puzdiel veľkosti čipu.

VI. NÁVRH A OPTIMALIZÁCIA DPS

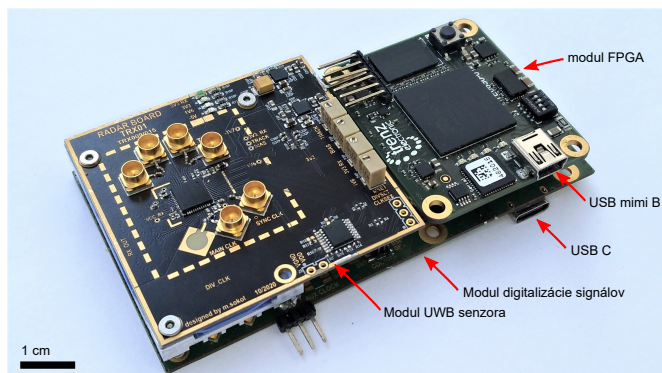
Dôležitou súčasťou návrhu širokopásmových integrovaných obvodov je aj návrh a optimalizácia dosiek plošných spojov DPS. Výsledný zapuzdrený integrovaný obvod je potrebné buď otestovať alebo aplikovať v určitej aplikácii za pomoci DPS. Prezentované UWB systémy pracujú na frekvenciách rádovo jednotky až desiatky GHz preto je potrebná optimalizácia a riadená impedancia vysokofrekvenčných ciest na DPS. Masovo používaný materiál FR4 pre štandardnú elektroniku nie je vhodný pre frekvencie rádovo GHz, kvôli jeho stratovým vlastnostiam a nehomogénnej štruktúre laminátu a sklenených vlákien, čím je ovplyvnená riadená impedancia koplanárnych a mikropásových vedení [36]. Existujú však keramické lamináty určené priamo pre návrh vysokofrekvenčných DPS.

nepájivá maska	
medená fólia	VF signály
keramický lamitát	
medená fólia	Referenčná GND
FR4	
medená fólia	Referenčná GND
keramický lamitát	
medená fólia	VF signály
nepájivá maska	

Obr. 11: Vrstvenie zmiešanej "sendvičovej" DPS

Výhoda týchto vysokofrekvenčných materiálov spočíva v stabilnej dielektrickej konstante ϵ_r naprieč frekvenčným spektrom a tiež až 10 násobne menšími dielektrickými stratami oproti FR4 IS400. Menšie dielektrické straty znamenajú menší útlm koplanárneho alebo mikro-pásovitého vedenia. Zložitejšie návrhy DPS ako napríklad nový uzol UWB sensorového systému vyžadoval štvorvrstvomé DPS s frekvenčnými vlastnosťami keramických substrátov a s mechanic

kou pevnostnou FR4. Za takýmto účelom sa vytvárajú takzvané "sendviče" s jadrom z FR4 a prepregom z keramickým kompozitom. Prierez takýmto sendvičom je zobrazený na Obr.11. Technologickým problémom však bola kompatibilita laminátov s FR4 procesom výroby. RO4350B predstavuje kompatibilný laminát pre laminovanie s FR4 od firmy Rogers Corp., no pre tieto účely bol použitý špeciálny laminát ASTRA MT77 priamo od výrobcu FR4 IS400 laminátu. Výsledné vyhotovenie UWB sensorového systému s 15-bitovým sensorom na báze M-postupnosti je zobrazené na Obr. 12.



Obr. 12: Navrhnutý UWB sensorový systém pracujúci na báze M-postupnosti

VII. ZÁVER

Hardvérovo orientovaný výskum vo všeobecnosti predstavuje výzvu v mnohých oblastiach. Samotné zvládnutie návrhu ASIC obvodov v polovodičových technológiách a implementácia nových ASIC obvodov vyžaduje množstvo času, skúšania, simulácií a nakreslených obvodov. Všetky aplikácie UWB sensorových systémov potrebujú hardvér navrhnutý priamo pre ich konkrétnu aplikáciu. Sensory používajú veľa analógových štruktúr ako sú širokopásmové zosilňovače [37],[38], spínače a odbočnice [39] pre delenie a distribúciu signálu, zmiešavače, generátory hodinového signálu, AD prevodníky [40], [41] a mnohé ďalšie [42]. Tieto obvody tvoria celý rad vstupno-výstupných obvodov (angl. Front-end). Výsledné navrhnuté obvody už boli alebo budú ďalej využité pre existujúce UWB sensorové systémy, ako je napríklad nový UWB sensorový systém (Obr. 12). Taktiež spomínané navrhnuté ASIC obvody prispievajú k vytvoreniu nových aplikácií radarových systémov a UWB sensorových systémov, k zmenšeniu rozmerov, zlepšeniu ich parametrov a zníženiu finančných nákladov na ich výrobu. V celkovej miere prispievajú ku komerčnej využiteľnosti týchto systémov.

Podakovanie

Táto práca vznikla s podporou nasledujúcich projektov: Projekt Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-15-0692, APVV-15-0055 a APVV-18-0373, Vedeckou grantovou agentúrou (VEGA) na základe zmluvy č. 1/0772/17 a 1/0584/20 a kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (KEGA) na základe zmluvy č. 062TUKE-4/2017 a 009TUKE-4/2019.

REFERENCIE

- [1]D. Chinnery a K. Keutzer, *Closing the power gap between ASIC & Custom*. Springer, 2007.
- [2]U. Reimers, "DVB-T: the COFDM-based system for terrestrial television", 1996.
- [3]L. Eastwood, S. Migaldi, Q. Xie a V. Gupta, "Mobility using IEEE 802.21 in a heterogeneous IEEE 802.16/802.11-based, IMT-advanced (4G) network", *IEEE Wireless Communications*, roč. 15, č. 2, s. 26–34, 2008, ISSN: 1536-1284. DOI: 10.1109/MWC.2008.4492975.
- [4]A. Morello a V. Mignone, "DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-Band Services", *Proceedings of the IEEE*, roč. 94, č. 1, s. 210–227, 2006, ISSN: 0018-9219. DOI: 10.1109/JPROC.2005.861013.
- [5]M. Drutarovsky, D. Kocur, M. Svecova a N. M. Garcia, "Real-time wireless UWB sensor network for person monitoring", in *Telecommunications (ConTEL), 2017 14th International Conference on*, IEEE, 2017, s. 19–26.
- [6]R. K. Morrow, *Wireless network coexistence*. McGraw-Hill New York, 2004.
- [7]J. Sachs, *Handbook of Ultra-wideband Short-range Sensing*, 2012.
- [8]P. Galajda, S. Slovak, M. Sokol, M. Pecovsky a M. Kmec, "Integrated M-Sequence Based Transceiver for UWB Sensor Networks", *Radioengineering*, roč. 28, č. 1, s. 175–182, 2019, ISSN: 1805-9600. DOI: 10.13164/re.2019.0175.
- [9]J. Sachs, "Ultra-wideband sensing: The road to new radar applications", in *Radar Symposium (IRS), 2010 11th International*, IEEE, 2010, s. 1–4.
- [10]B. Silva, Z. Pang, J. Åkerberg, J. Neander a G. Hancke, "Experimental study of UWB-based high precision localization for industrial applications", in *Ultra-WideBand (ICUWB), 2014 IEEE International Conference on*, IEEE, 2014, s. 280–285.
- [11]J. Sachs, A. Badstubner, F. Bonitz, M. Eidner, M. Helbig, R. Herrmann, M. Kmec, P. Rauschenbach a H. Solas, "High resolution non-destructive testing in civil engineering by ultra-wideband pseudo-noise approaches", in *Ultra-Wideband, 2008. ICUWB 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, zv. 2, 2008, s. 137–140.
- [12]B. Iyer a N. P. Pathak, *Multiband Non-invasive Microwave Sensor: Design and Analysis*. CRC Press, 2018.
- [13]P. Galajda, M. Pecovsky, J. Gazda a M. Drutarovsky, "Novel M-sequence UWB sensor for ground penetrating radar application", in *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, IEEE, 2018, s. 110–111.
- [14]E. M. Johansson a J. E. Mast, "Three-dimensional ground-penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing", in *Advanced Microwave and Millimeter-Wave Detectors*, International Society for Optics a Photonics, zv. 2275, 1994, s. 205–214.
- [15]M. G. Amin, *Through-the-wall radar imaging*. CRC press, 2017.

- [16]D. Kocur, D. Novák a M. Švecová, “Multiple Person Localization Based on Their Vital Sign Detection Using UWB Sensor”, *Microwave Systems and Applications, SK Goudos, Ed. InTech*, s. 399–422, 2017.
- [17]S. Slovák, P. Galajda, M. Švecová, M. Pečovský a M. Kmec, “Ultra-wideband wireless sensors for robot vision in industrial environments”, in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL)*, IEEE, 2017, s. 1697–1702.
- [18]E. M. Staderini et al., “UWB radars in medicine”, *IEEE aerospace and electronic systems magazine*, roč. 17, č. 1, s. 13–18, 2002.
- [19]K. Higashikaturagi, Y. Nakahata, I. Matsunami a A. Kajiwara, “Non-invasive respiration monitoring sensor using UWB-IR”, in *Ultra-Wideband, 2008. ICUWB 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, zv. 1, 2008, s. 101–104.
- [20]M. S. Ali, N. Shoumy, S. Khatun, L. Kamarudin a V. Vijayarveswari, “Non-invasive blood glucose measurement performance analysis through UWB imaging”, in *Electronic Design (ICED), 2016 3rd International Conference on*, IEEE, 2016, s. 513–516.
- [21]Z. Qian, T. Wang a J. Chen, “Compatibility Studies of IMT System and Automotive Radar in the Frequency Range 24.5-25.5 GHz”, in *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, IEEE, 2018, s. 505–508.
- [22]S. Xu, J. Wang a A. Yarovoy, “Super Resolution DOA for FMCW Automotive Radar Imaging”, in *2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, IEEE, 2018, s. 1–4.
- [23]J. D. Cressler, *Silicon Heterostructure Handbook: Materials, Fabrication, Devices, Circuits and Applications of SiGe and Si Strained-Layer Epitaxy*. CRC press, 2005.
- [24]EUROPRACTICE. “EUROPRACTICE IC Service”. (2019), URL: <http://www.europactice-ic.com/>.
- [25]——, “Circuits Multi Projets”. (2019), URL: <https://mycmp.fr/>.
- [26]“TSMC semiconductor technology”. (2019), URL: <https://www.tsmc.com/english>.
- [27]“STmicroelectronics”. (2019), URL: <https://www.st.com/>.
- [28]IHP. “0.25 μm technology with a set of npn-HBTs ranging from a higher RF performance”. (2021), URL: <https://www.ihp-microelectronics.com/en/services/mpw-prototyping/sigec-bicmos-technologies.html>.
- [29]AMS. “Multi project wafer reference”. (2021), URL: <http://www.austriamicrosystems.com>.
- [30]CMP. “0.35 μm SiGe BiCMOS S35D4M5”. (2019), URL: <https://mycmp.fr/datasheet/ic-0-35mum-s35d4m5>.
- [31]C. Bowick, *RF circuit design*. Elsevier, 2011.
- [32]“Cadence Virtuoso Spectre”. (2019), URL: https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/tools/custom-ic-analog-rf-design/virtuoso-mmsim-ds.pdf.
- [33]K. Kuang, F. Kim a S. S. Cahill, *RF and microwave microelectronics packaging*. Springer, 2010.
- [34]“Mirror Semiconductor”. (2019), URL: <https://www.mirrorsemi.com/OpenChip.html>.
- [35]B. C. Wadell, *Transmission line design handbook*. Artech House, 1991.
- [36]B. Chen, R. Yao, H. Wang, K. Geng a J. Li, “Effect of fiber weave structure in printed circuit boards on signal transmission characteristics”, *Applied Sciences*, roč. 9, č. 2, s. 353, 2019.
- [37]M. Sokol, P. Galajda, S. Slovak a M. Pecovsky, “Modified Cherry-Hooper Amplifier for UWB Applications in 0.35 μm SiGe BiCMOS Technology”, in *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, IEEE, 2018, s. 1–7.
- [38]——, “Improving Parameters of Cherry-Hooper Amplifier Using Parasitic Elements on the Layout”, in *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring)*, IEEE, 2019, s. 451–456.
- [39]M. Sokol, P. Galajda, S. Slovak, M. Pecovsky a M. Drutarovsky, “Design and Implementation of Microwave Circuits in 0.35 μm SiGe BiCMOS Technology for UWB Applications”, in *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring)*, IEEE, 2019, s. 48–52.
- [40]M. Sokol, P. Galajda a M. Pecovsky, “Improving Input Circuits for 7-bit Flash AD Converter”, in *2020 30th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, IEEE, 2020, s. 1–5.
- [41]M. Sokol, P. Galajda, S. Slovak a M. Pecovsky, “Design of 4-bit Flash ADC Cell for UWB Sensor Systems”, in *2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2019, s. 1–5. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733510.
- [42]M. Pecovsky, M. Sokol a P. Galajda, “15 th Order M-sequence SoC Radar for Short-Range Sensing”, in *2020 21st International Radar Symposium (IRS)*, IEEE, 2020, s. 1–5.

Efektívne algoritmy pre viacpohľadové videokódovanie

Peter Šulaj

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

Stanislav Marchevský

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

Abstrakt— V súčasnej dobe rastie využitie dronov, v článku si rozoberieme problematiku streamovania a spracovávania viacpohľadového videostreamu z viacerých dronov. Využijú sa existujúce komunikačné a smerovacie protokoly vrátane ad hoc protokolov. Práca sa sústreďuje na problematiku vytvárania sietí a smerovania video obsahu v sieťach ad-hoc s využitím multicastu a zameriava sa na využívanie dronových systémov a spracovávanie a smerovanie video obsahu z letky dronov, analýzu požiadaviek aplikácii na komunikáciu s dronami a požiadavky pre spracovanie video streamingu. Práca opisuje problematiku využitia týchto technológií pre požiadavky kladené na dohľad a monitorovanie, prírodných katastrof, či streamovanie viacpohľadového videa zo spoločenských podujatí. Práca obsahuje pôvodné prínosy v návrhu realizácie topológie prepojenia systémov virtuálnej reality s mobilnými lietajúcimi uzlami vybavených kamerami s vysokou rozlišovacou schopnosťou pre automatické videosedovanie dynamických a komplexných scén a návrhu riadiaceho systému pre riadenie mobilných uzlov sensorovej lietajúcej siete. Práca obsahuje aj ukážku praktickej realizácie image stitching-u s využitím letky mobilných lietajúcich uzlov a ich grafické spracovanie dát vo VR.

KLúčové slová - UAV, drony, videostreaming, viacpohľadové video, smerovacie protokoly, Ad-hoc, multicast

Abstract - Currently, the use of drones is growing, in this article we will discuss the issue with streaming and processing multi-track video streams from multiple drones. Existing communications and routing protocols, including ad hoc protocols, will be used. Work focuses on networking and video content routing in ad-hoc networks using multicast, focusing on the use of drones and the processing and routing of drones' video content, the analysis of drones communication applications, and the requirements for video streaming processing. The work describes the use of these technologies for the requirements of surveillance and monitoring, natural disasters, or streaming of multi-view video from social events. The work contains the original benefits in the design of the implementation of the topology of interconnection of virtual reality systems with mobile flying nodes equipped with high-resolution cameras for automatic video surveillance of dynamic and complex scenes and design of a control system for controlling mobile nodes of the sensor flying network. Practical implementation of image stitching using a swarm of mobile flying nodes and their graphical data processing in VR. The work also includes a demonstration of the practical implementation of image stitching

using a squadron of mobile flying nodes and their graphical data processing in VR.

Key words - UAV, drones, video streaming, multi-view video, routing protocols, Ad-hoc, multicast **Introduction.**

I. ÚVOD

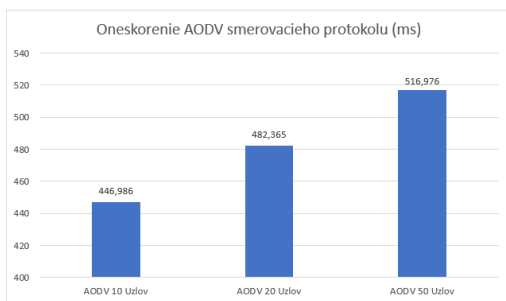
Drony môžu byť používané na civilné aplikácie, vrátane vyhľadávania a záchrany stratených osôb, dočasné pokrytie územia mobilným signálom, popřípade na letecké snímkovanie územia. Svetový trend je vo využívaní dronov pre doručovanie tovaru, pošty. Pre vykonávanie týchto úloh je ale nutná koordinácia využitia letového priestoru. V tejto práci sú zahrnuté požiadavky na komunikáciu dronov a spracovanie videostreamingu z dronov. Využívajú sa existujúce komunikačné technológie, tie sa potom analyzujú, aby sa využili poznatky a požiadavky na komunikáciu dronov na už existujúcich technológiách. Identifikujeme potencionálne požiadavky na budúce technológie a analyzujeme nedostatky existujúcich technológií vo vzťahu k aplikácii na dronoch. Existujúce komunikačné a smerovacie protokoly vrátane ad hoc protokolov môžeme využiť na lokalizáciu vzdialenosti vektora (AODV) a smerovanie podporované lokalizáciou (LAR) alebo využijeme smerovací protokol (GPSR - Greedy Perimeter Stateless Routing), aby sme identifikovali obmedzenia v súvislosti so sieťou dronov. Aplikčný scenár, v ktorom skupina dronov obsluhuje viaceré oblasti, môžeme uvažovať, že drony sledujú známe trajektórie a kontinuálne prenášajú tok dát v podobe obrázkov alebo videa na pozemnú stanicu. Systém na prepínanie trasy (RS), ktorý využíva informácie o polohe aj trajektórii dronov nám dovoľuje naplánovať a aktualizovať trasy tak, aby sme mohli dynamicky zisťovať najideálnejšie trasy a chyby trasy. Aplikácie pre videostreaming z dronov, ako je vyhľadávanie a záchrana osôb, dohľad a katastrofická udalosť, ktoré využívajú štandardný multicastový bezdrôtový videostreaming na prenos rovnakých dát viacerým používateľom pomocou IEEE 802.11 predstavuje výzvu z hľadiska: spoľahlivosti, výkonnosti a kontrolu oneskorenia. Z dôvodu mobility zdrojov videa a vysokú dátovú rýchlosť videí, mala by byť prenosová rýchlosť prispôbená na základe podmienok vytvoreného spojenia. Vysielanie multicastového videa s rýchlosťou, ktorá sa dynamicky prispôbuje v sieti IEEE 802.11 vyžaduje neustálu predikciu bezdrôtového spojenia, ako aj častú spätnú väzbu od viacerých

prijímačov. Hlavnou oblasťou výskumu je aplikačný-vrstvový frekvenčný adaptačný videostreamingový prenos dát pomocou siete ad hoc 802.11, ktorá je použiteľná v oboch prípadoch, aj pre odosielanie, aj pre príjem dát a prijímacie uzly sú mobilné..

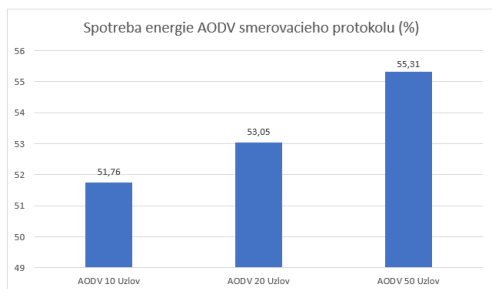
II. SIMULÁCIA SMEROVACÍCH PROTOKOLOV

A. Výsledky smerovacieho protokolu AODV

V tejto kapitole analyzujeme a porovnávame dosiahnuté výsledky simulácií pre navrhnuté scenáre s 10,20 a 50tismi uzlami (dronami) v sieti s vybranými smerovacími protokolmi. AODV protokol, pre ktorý boli vytvorené a simulované siete, boli nadeklarované s údajmi, ktoré sa nemenili pre všetky odsimulované smerovacie protokoly. Každá simulácia, ktorej dĺžka bola 200 sekúnd, kde pri prvých 100 sekundách prebehlo sieťové skonvergovanie, ktorého dôveryhodné výsledky boli nevyhnutné. Prenosový kanál, ktorého rýchlosť sme zvolili na 2Mbps, s povolenou mobilitou pre jednotlivé uzly v sieti o rozlohe 600x600 metrov. Pre video ktoré bolo streamované sme zvolili prenos s bitovým tokom 2048 kb/s. Jediná hodnota, ktorá sa menila v každej simulácii je počet uzlov v sieti, pre každý protokol boli postupne odsimulované siete s 10,20 a 50 uzlami. Pri výstupe každej simulácie súboru XML, flowmon a csv súbor, ktoré boli vytvorené na základe implementovaných modelov. Grafy, ktoré boli vytvorené pomocou týchto súborov sú analyzované výsledky jednotlivých simulácií. Keďže do simulátora bol zavedený energetický model na snímanie spotreby energie a boli odsimulované scenáre s určitým počtom uzlov v sieti pre AODV protokol. Jeden z dôležitých parametrov, ktorý ma priamo vplyv na výkonnosť siete je spotreba energie jednotlivých uzlov v sieti. Mimo toho je priamo ovplyvnené meškanie paketov s narastajúcim počtom uzlov. Všetky tieto hodnoty a počty uzlov sú graficky znázornené na obrázkoch Obr. 1 a Obr. 2.

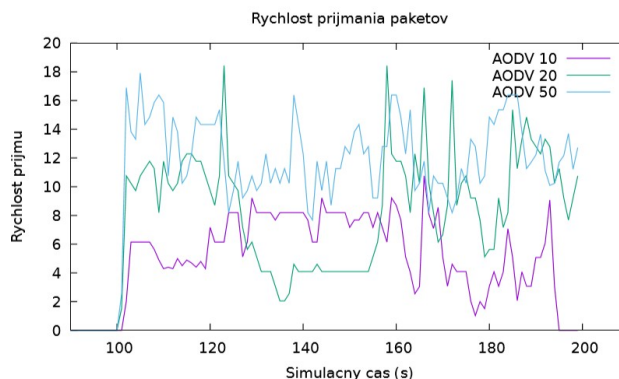


Obr. 1 Oneskorenie AODV smerovacieho protokolu

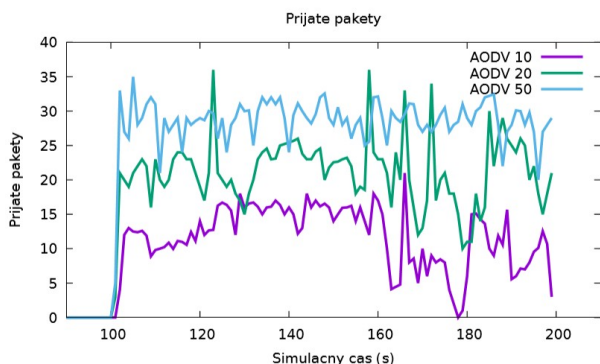


Obr. 2 Spotreba energie AODV smerovacieho protokolu

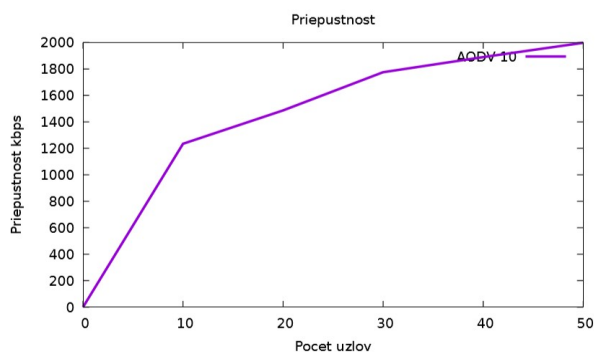
V simulácií s 20 uzlami môžeme pozorovať zníženie spotreby energie v uzloch a zvýšenie oneskorenia pri prenose dátových tokov. Na základe dosiahnutých výsledkov môžeme konštatovať, že sa AODV protokol správa tak ako ho opisuje jeho teória. Tá hovorí o tom, že AODV protokol je stabilnejší a výkonnejší v sieti, ktorá disponuje väčším počtom uzlov a je nimi hustejšie osadená. Simulácia s 50 uzlami potvrdila výsledky predchádzajúcich simulácií. Teda spotreba energie s väčším počtom uzlov je nižšia a oneskorenie vyššie, avšak na základe simulácií s ďalšími smerovacími protokolmi je spotreba energie uzlov v sieti so smerovacím protokolom AODV najväčšia. Je to spôsobené princípom fungovania tohto protokolu, ten pred každým vysielaním vytvára nové trasy, čo nepriaznivo vplyva na spomínanú spotrebu energie a oneskorenie. V priložených grafoch na Obr. 3 a Obr. 4 je znázornený priebeh rýchlosti prijímania paketov a počet prijatých paketov v čase. Pri protokole AODV je vidno na rýchlosti prijímania a prijatých paketoch, že s narastajúcim počtom uzlov v sieti sa zvyšuje aj výkonnosť, stabilita a počet prijatých paketov rovnako ako aj v prípade spomínaného oneskorenia. Výsledky simulácie s počtom uzlov 20 vykazujú nižšiu spotrebu energie v daných uzloch a vyššie oneskorenie prenosu dátových tokov. Z výsledkov je zjavné, že sa protokol AODV správa v súlade s jeho teóriou, ktorá tvrdí, že stabilitu a výkon v sieti protokolu AODV zlepšuje práve väčší počet uzlov, ktorými je aj hustejšie osadenejšia. Výsledok simulácie s počtom uzlov 50 bol rovnaký ako pri predchádzajúcich simuláciách. Konkrétne, ide o nižšiu spotrebu energie a vyššie oneskorenie pri väčšom počte uzlov. Avšak, ak porovnáme spotrebu energie uzlov v sieti s inými smerovacími protokolmi a smerovacím protokolom AODV, zistíme, že so smerovacím protokolom AODV je najväčšia. Príčina zvýšenej spotreby pri tomto protokole je jednoduchá, AODV pred každým vysielaním vytvára nové trasy, čo má za následok zvýšenú energiu a oneskorenie. Obr. 3 a Obr. 4 znázorňujú rýchlosť prijímania a počet prijatých paketov za jednotku času. Na základe tohto znázornenia je jasné, že čím je v sieti viac uzlov, tým je protokol AODV výkonnejší, stabilnejší, prijíma vyšší počet paketov a zvyšuje sa oneskorenie.



Obr. 3 Porovnanie rýchlosti prijímania AODV paketov



Obr. 4 Porovnanie prijatých paketov AODV smerovacieho protokolu

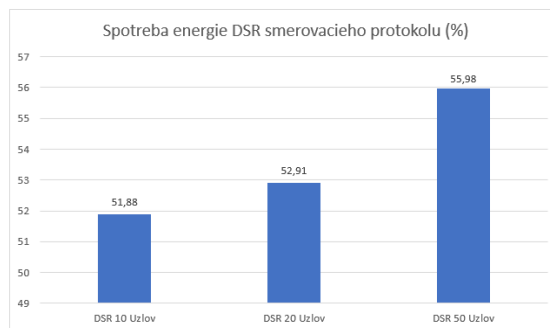


Obr. 5 Priepustnosť s využitím AODV smerovacieho protokolu

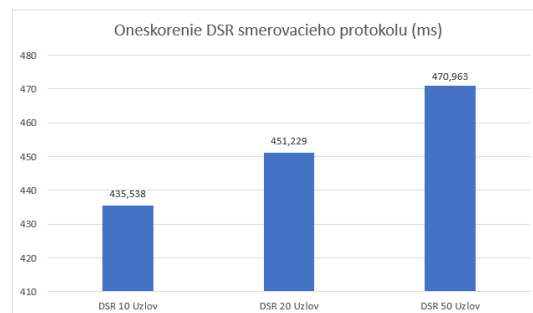
Priepustnosť stúpa s pribúdajúcim počtom uzlov v sieti, tak ako je znázornené na Obr. 5.

B. Výsledky smerovacieho protokolu DSR

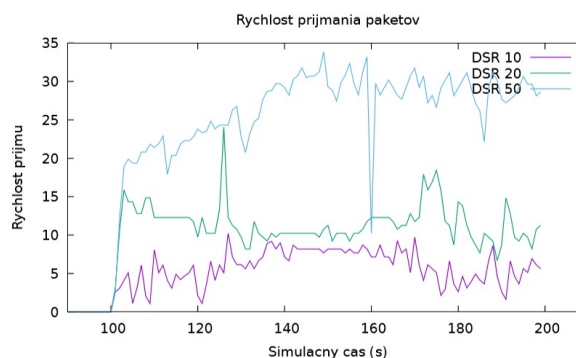
Smerovací protokol DSR bol simulovaný ako ostatné protokoly s danými parametrami a meniacim sa počtom uzlov v sieti. Okrem toho DSR protokol je v rovnakej skupine smerovacích protokolov ako AODV. Jeho vlastnosti a výsledky ktoré sú generované sú podobné ale majú nejaké rozdiely. Ako aj AODV protokol tak aj DSR protokol je vidieť, že ak sa počty uzlov v sieti zväčšujú tak je daný protokol výkonnejší a stabilnejší. Na daných grafoch je znázornené to, že protokol je menej stabilný ak má v sieti 10 uzlov, tým pádom menšiu rýchlosť príjmu paketov a tak je celkový počet prijatých paketov menší a teda viac paketov neprijatých. V simulácií, kde máme 50 uzlov môžeme vidieť oveľa väčšie zlepšenie v rýchlosti príjmu, celkovej stabilite protokolu a počte doručených paketov. Z pohľadu oneskorenia a spotreby energie môžeme na obrázkoch Obr. 6 a Obr. 7 že dosahuje o niečo lepšie hodnoty, ktoré sú takmer rovnaké na rozdiel od protokolu AODV. V celkovom porovnaní dosahoval DSR protokol o niečo lepšie výsledky, ale výsledky boli takmer totožné ako u AODV protokolu.



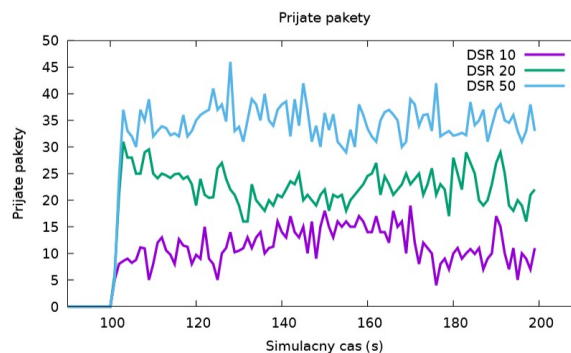
Obr. 6 Spotreba energie DSR smerovacieho protokolu



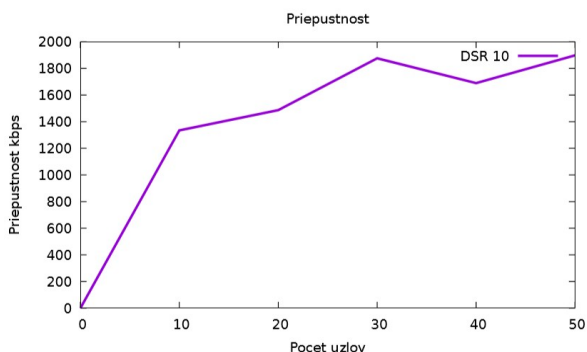
Obr. 7 Oneskorenie DSR smerovacieho protokolu



Obr. 8 Porovnanie prijatých paketov DSR smerovacieho protokolu



Obr. 9 Porovnanie rýchlosti prijímania paketov DSR smerovacieho protokolu



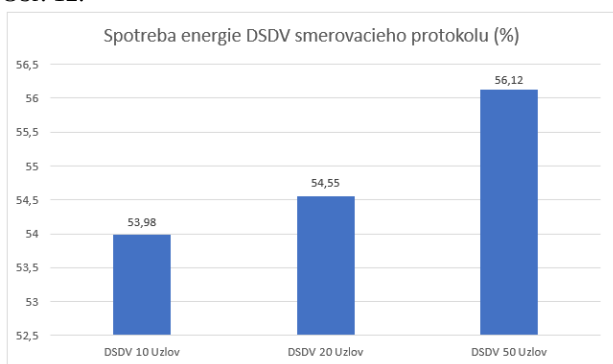
Obr. 10 Priepustnosť s využitím DSR smerovacieho protokolu

DSR smerovací protokol vykazuje oproti AODV protokolu vyššiu stabilitu a výkonnosť siete s ohľadom na rýchlosť prijímania paketov a v počte prijatých paketov, ktoré sú znázornené na Obr. 8 a Obr. 9.

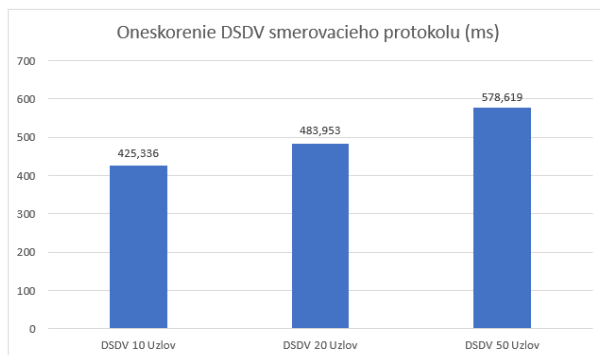
Priepustnosť nemá taký exponenciálny rast ako AODV protokol, dosahuje však takmer identické hodnoty znázornené na Obr. 10.

C. Výsledky smerovacieho protokolu DSDV

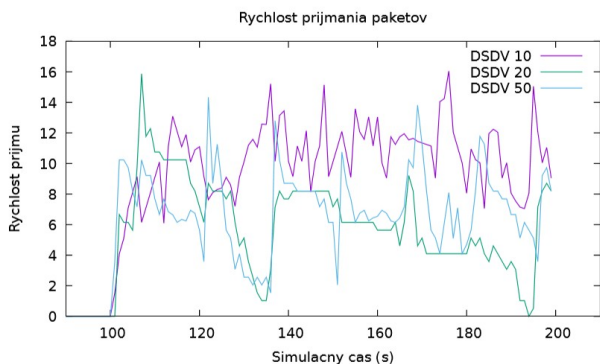
Na základe predchádzajúcich protokolov aj pri protokole DSDV prebehla simulácia s rovnakými scenármi. Tento protokol patrí do skupiny proaktívnych protokolov, môžeme pozorovať výrazne sa líšiace výsledky a aj jeho správanie je odlišné v jednotlivých typoch sietí. Tieto hodnoty sú odlišné z dôvodu, že protokoly DSR a AODV zaradujeme do skupiny reaktívnych protokolov. Počas simulácie pri najmenšom počte uzlov výsledky boli porovnateľné s reaktívnymi protokolmi, avšak výsledky sa začali výrazne odlišovať v závislosti od väčšieho počtu uzlov. Pri protokole DSDV bol pokles kvality výsledkov, funkčnosti a stability najvýraznejší pri simulácii s najväčším počtom uzlov, vtedy bol protokol už nestabilný a nebol schopný spracovať všetky pakety, tento výsledok sa prejavil na výraznej strate paketov. Výsledky spotreby energie a oneskorenia sú znázornené v grafoch na obrázkoch Obr. 11 a Obr. 12.



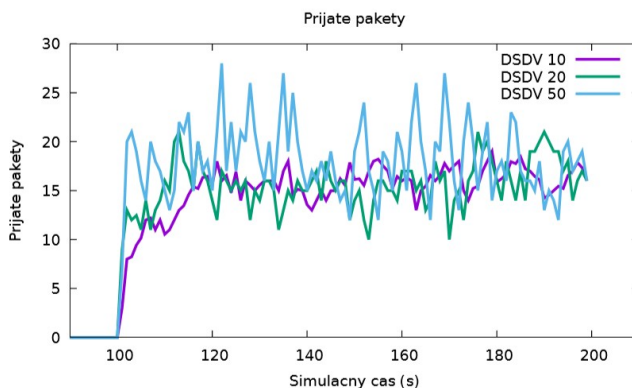
Obr. 11 Spotreba energie DSDV smerovacieho protokolu



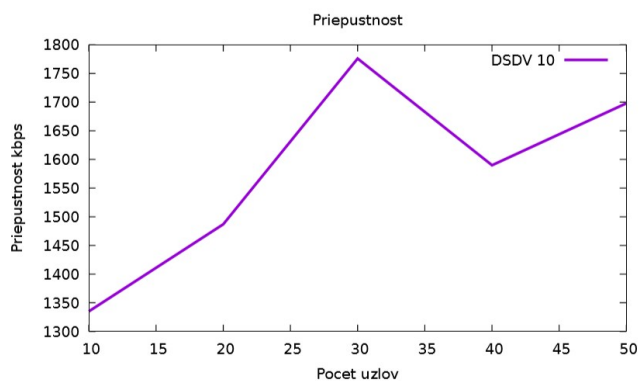
Obr. 12 Oneskorenie DSDV smerovacieho protokolu



Obr. 13 Porovnanie rýchlosti prijímania paketov DSDV smerovacieho protokolu



Obr. 14 Porovnanie prijatých paketov DSDV smerovacieho protokolu

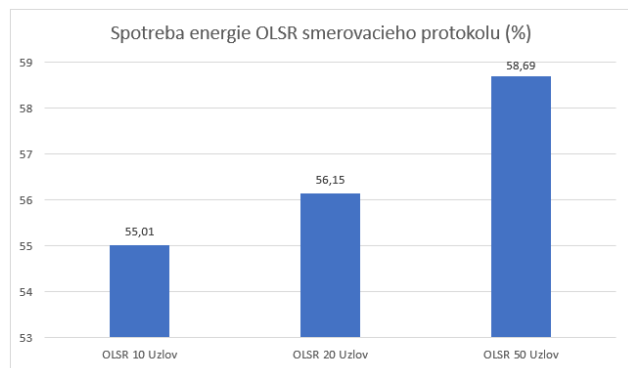


Obr. 15 Priepustnosť s využitím DSDV smerovacieho protokolu

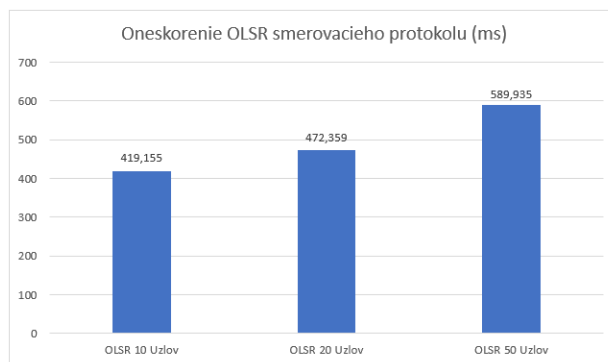
DSDV smerovací protokol je na základe dosiahnutých výsledkov výkonnejší a stabilnejší práve v sieťach, ktoré nie sú zložené z väčšieho počtu uzlov. Z grafov na obrázkoch Obr. 13 a Obr. 14 je možné vidieť, že v sieťach s 10 uzlami je výrazne stabilnejší v prípade prijatých paketov aj rýchlosti prijímania oproti sieťach s 50 uzlami. Priepustnosť na obrázku Obr. 15 dosahuje nižšie hodnoty oproti AODV a DSR smerovacím protokolom.

D. Výsledky OLSR smerovacieho protokolu

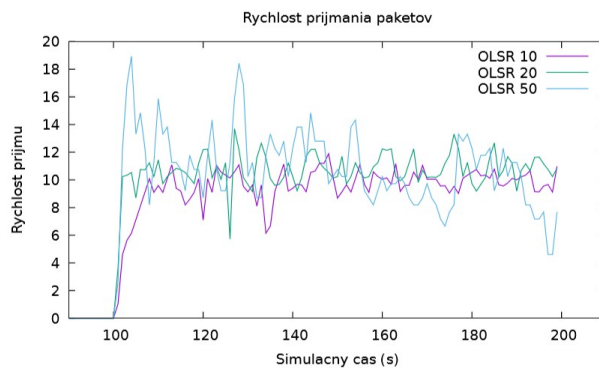
OLSR protokol rovnako ako protokol DSDV patrí do skupiny proaktívnych protokolov. Teda rovnako ako pri protokole DSDV sme pozorovali rovnaké správanie pri jednotlivých simuláciách. Pre smerovací protokol OLSR sú štatistické hodnoty spotreby energie a oneskorenia sú zobrazené na Obr. 16 a Obr. 18. V sieťach s 10 uzlami sa správal najviac stabilne čo podporovali aj merané parametre ako sú rýchlosť prijímania paketov, prijaté pakety, oneskorenie a podobne. Avšak so zväčšujúcim sa počtom uzlov v sieťach dochádzalo k miernemu zhoršeniu jeho vlastností. Tento protokol je teda vhodnejší najmä do menej zahustených sietí. Na základe týchto výsledkov je zrejmé, že sa OLSR protokol správa opačne ako AODV protokol, ktorý s narastajúcim počtom uzlov je stabilnejší a výkonnejší.



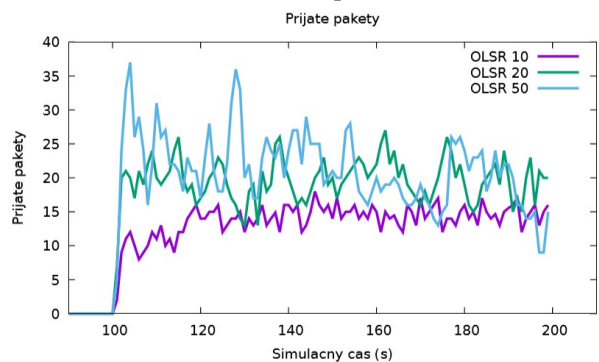
Obr. 16 Spotreba energie OLSR smerovacieho protokolu



Obr. 18 Oneskorenie OLSR smerovacieho protokolu



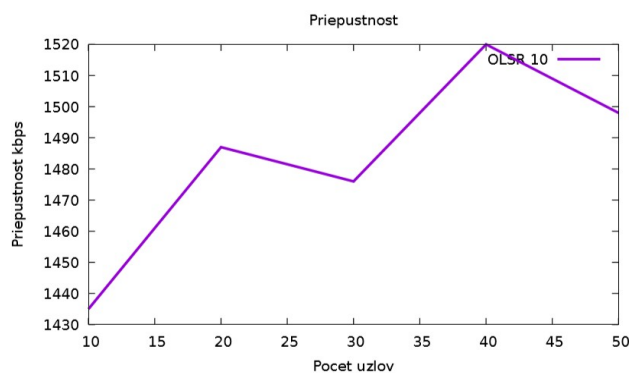
Obr. 17 Porovnanie rýchlosti prijímania paketov OLSR smerovacieho protokolu



Obr. 19 Porovnanie prijatých paketov OLSR smerovacieho protokolu

Na obrázkoch Obr. 17 a Obr. 19 je vidno, že smerovací protokol OLSR sa na základe svojich vlastností, parametrov a dosiahnutých výsledkov v rámci počtu prijatých paketov a rýchlosti prijímania správa rovnako ako protokol DSDV. Dosahuje síce nižšie rýchlosti a počet prijatých paketov v sieťach s 10 uzlami avšak s výrazne vyššou stabilitou oproti sieťach s 50 uzlami.

Priepustnosť siete na obrázku Obr. 20 s OLSR smerovacím protokolom sa spomedzi nami simulovaných protokolov javí ako najnižšia.



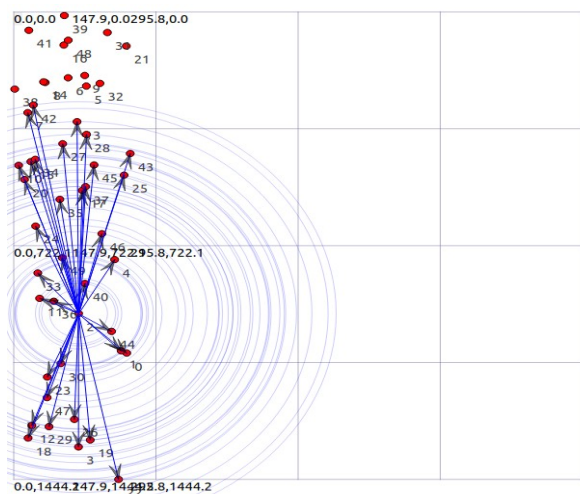
Obr. 20 Priepustnosť s využitím OLSR smerovacieho protokolu

Na základe simulovaných sietí a parametrov smerovacích protokolov je možné konštatovať, že v každom scenári každého smerovacieho protokolu vplývala zmena počtu uzlov najmä na zväčšovanie spotreby energie a oneskorenia prijímaných paketov.

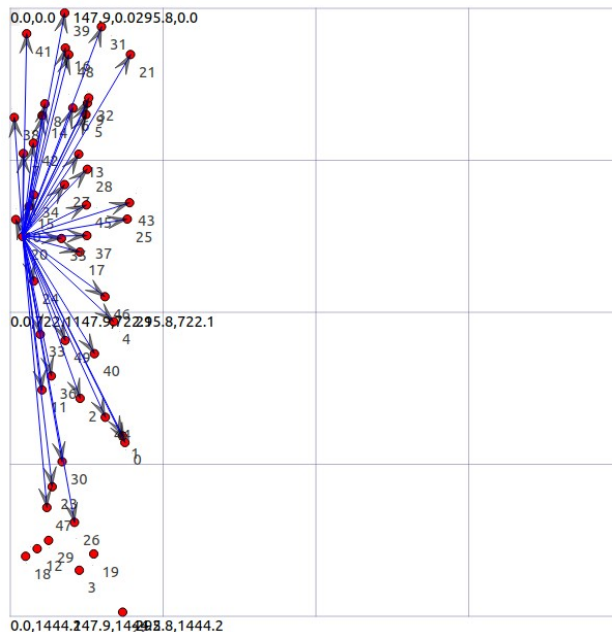
V rámci simulácií boli zahrnuté smerovacie protokoly zo skupiny reaktívnych a proaktívnych protokolov. Táto skutočnosť nám umožnila porovnať tieto dve skupiny protokolov pri rôznych počtoch uzlov v sieti. Vďaka tomu sme mohli pozorovať, že v menej obsadených sieťach s 10 a 20 uzlami boli vhodnejšie, stabilnejšie a lepšie pracovali proaktívne smerovacie protokoly, ktoré vykazovali lepšiu spotrebu energie a menšiu hodnotu oneskorenia.

Avšak pri každom navýšení počtu uzlov sa vlastnosti proaktívnych protokolov začali zhoršovať. Ak porovnáme správanie sa všetkých protokolov v sieťach s 10, 20 a 50 uzlami reaktívne protokoly majú tendenciu aj pri minimálnom navýšení počtu uzlov zlepšovať svoje vlastnosti. Z toho vyplýva, že pre menšie siete sú výhodnejšie proaktívne protokoly a pre rozvinutejšie siete sú vhodnejšie reaktívne protokoly, ktoré nevykazujú takú stabilitu v malých sieťach ako protokoly DSDV a OLSR.

Na obrázkoch Obr. 21 a Obr. 22 je znázornený grafický výstup z modelu NetAnim, ktorý bol implementovaný v rámci simulátora NS3. Obdobné zobrazenie uzlov v sieti a smer komunikácie bolo pri každom simulovanom smerovacom protokole.

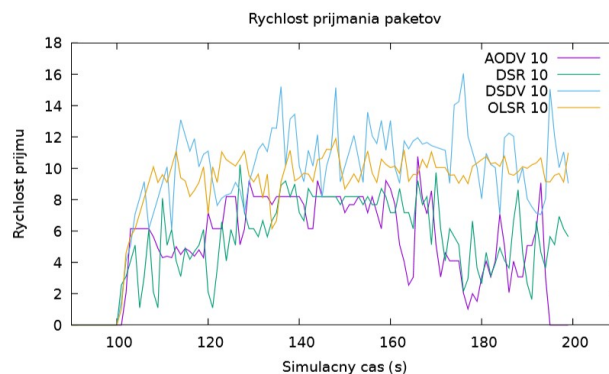


Obr. 21 Zobrazenie rozloženia, komunikácie a dosahu uzlov v simulovanej sieti

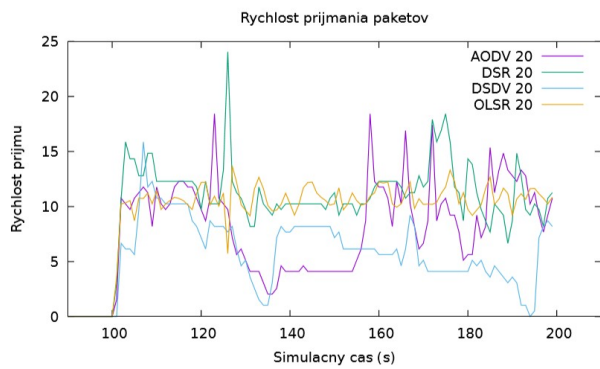


Obr. 22 Príklad siete z modelu NetAnim

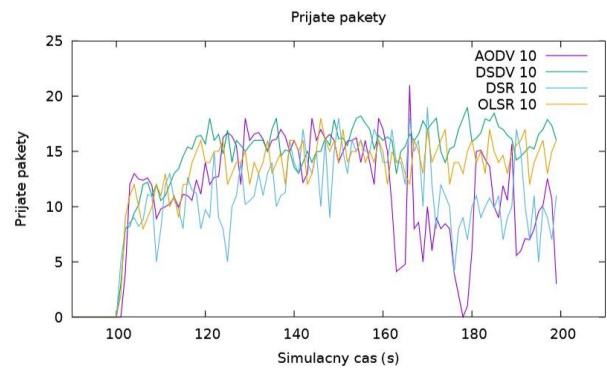
Na nasledujúcich obrázkoch sú graficky znázornené porovnania a rozdiely v počte prijatých paketov, rýchlosti prijímania a priepustnosti siete jednotlivito pre siete s 10, 20 a 50 uzlami pre každý smerovací protokol.



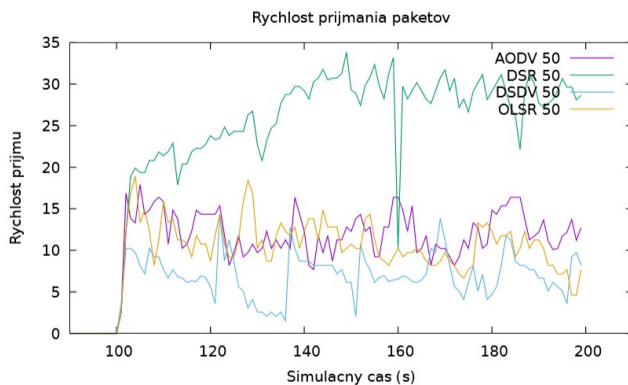
Obr. 23 Rýchlosť prijímania paketov smerovacích protokolov s 10 uzlami



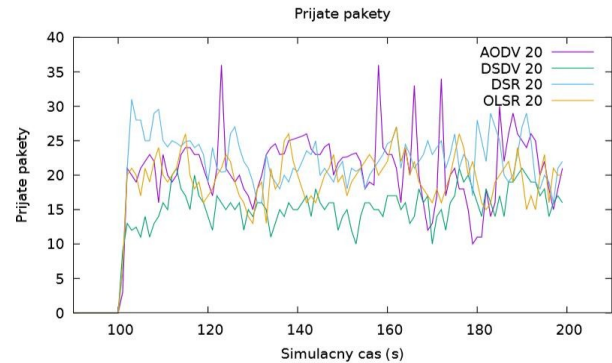
Obr. 24 Rýchlosť prijímania paketov smerovacích protokolov s 20 uzlami



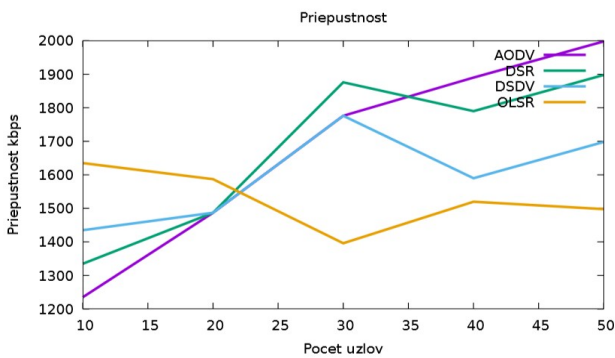
Obr. 27 Porovnanie prijatých paketov v sieti s 10 uzlami



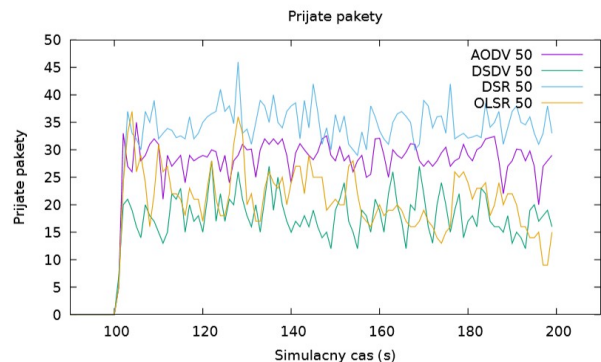
Obr. 25 Rýchlosť prijímania paketov smerovacích protokolov s 50 uzlami



Obr. 28 Porovnanie prijatých paketov v sieti s 20 uzlami



Obr. 26 Porovnanie priepustnosti siete so simulovanými smerovacími protokolmi



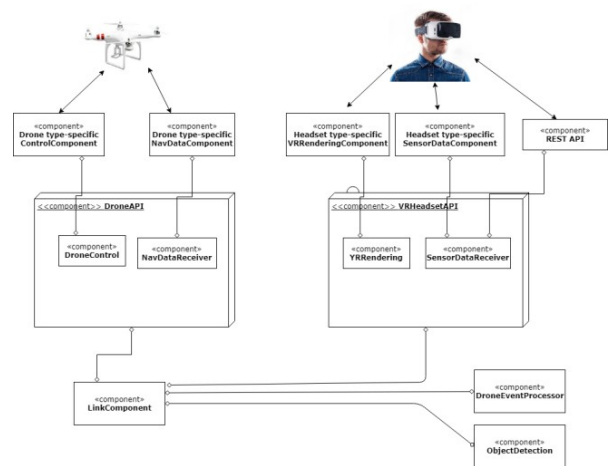
Obr. 29 Porovnanie prijatých paketov v sieti s 50 uzlami

III. VÝVOJ ROZHRANIA DRON - VR

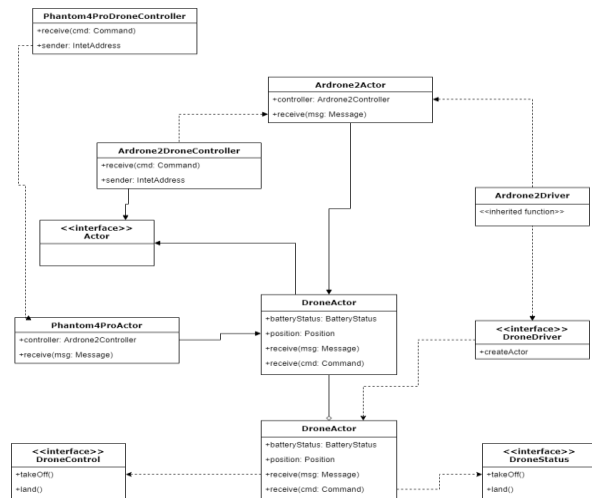
Modulárna architektúra Dron -VR je znázornená na Obr. 38. DroneAPI a VRHeadsetAPI sú dva hlavné stavebné prvky rámca. Tieto generické moduly definujú, ktoré funkcie musia byť implementované pre konkrétne drony a VR headsety. Tieto komponenty neobsahujú žiadne konkrétne funkcie pre konkrétny typ zariadenia. Ich úlohou je definovať a poskytovať všeobecné funkcie, ktoré je možné implementovať pre každé zariadenie. Na základe týchto komponentov budeme vedieť,

aký typ zariadenia je pripojený. Pre drony je DroneAPI rozdelený do 2 podkomponentov. Na jednej strane, tam je komponent DroneControl. Táto zložka definuje potrebné metódy fyzického ovládania dronu, napríklad vzlet a pohyb. Na strane druhej NavDataReceiver ktorý, prijíma informácie zo senzora od konkrétneho dronového modulu. Môže to byť napríklad úroveň nabitia batérie, nadmorská výška alebo videostream. Pre headsety VR pozostáva komponent VRHeadsetAPI z VRRendering a podkomponenty SensorDataReceiver. Prvý poskytuje všetky informácie potrebné na zobrazenie pre náhlavnú súpravu Oculus VR pre VRRenderingsComponent špecifický pre daný typ náhlavnej súpravy. V prípade WebVR poskytuje tento špecifický komponent kamerové záznamy cez pripojenie WebSocket a funguje ako REST API, aby umožnil dopytovanie všetkých informácií zo senzorov. Je to nevyhnutné, pretože v prípade WebVR sa vykreslenie vykonáva v prehliadači. SensorDataReceiver prijíma všetky údaje o náhlavnej súprave VR. Túto informáciu môže poskytnúť typovo špecifická zložka sensordata, ako aj REST API. Príkladom použitia typovo špecifickkej zložky sensordata bude čítanie údajov senzora prostredníctvom dobytov špecifických pre SDK. Príklad použitia rozhrania REST API: aby načítal údaje senzora v prehliadači a odoslal ich do koncového bodu API. Všetka komunikácia medzi komponentmi sa vykonáva výhradne prostredníctvom asynchrónnych správ. DroneAPI teda definuje správy ako DroneNotifications. TakeOffRequestNotification. Keď dron dostane túto správu, tak vykoná metódu takeOff z vybraného dronu. Táto metóda potom vyšle SpecificCommand.TakeOff () v konkrétnej súčasti dronu, ktorá vykoná akcie špecifické pre konkrétne zariadenie. Rovnakú postupnosť príkazov možno vidieť aj v prípade náhlavných súprav VR. VRHeadsetAPI definuje všeobecné správy, ako napríklad EulerAnglesRequestNotification. Ak túto správu dostane náhlavná súprava, vykoná metódu getEulerAngles z pripojeného headsetu VR. LinkComponent je modul, ktorý sa stará o komunikáciu medzi dvoma stavebnými blokmi. Táto súčasť rozhoduje, ktoré akcie bude musieť dron na základe náhlavnej súpravy vykonať, spracováva údaje zo senzorov. Prijíma sensordata z komponentu VRHeadsetAPI a odosiela všeobecné akcie do komponentu DroneAPI. Taktiež spracováva údaje zo senzora, ktoré získava z DroneAPI, do VRHeadsetAPI. Z dôvodu, že všetky dáta zo senzorov spracúva táto jednotka, je ľahko rozšíriteľná o komponenty, ktoré môžu využívať tieto údaje. Napríklad DroneEventProcessor dokáže počúvať stav batérie, informácie a ak je batéria dronu príliš slabá, môže spustiť výstražnú správu. Pretože údaje zo snímača zahŕňajú aj všetky kamerové záznamy, je možné vykonať videozáznamy v reálnom čase. Napríklad komponent ObjectDetection spracováva v reálnom čase snímky z kamery. Vykonáva detekciu objektov s preddefinovaným klasifikátorom a upravuje snímku, ak je objekt zistený zvýraznením obdĺžnikom. Jednou z výhod modulárnej architektúry je vylepšená interoperabilita. Ak framework musí podporovať nové zariadenie, či už dron alebo VR headset, vyžaduje to nový komponent špecifický pre zariadenie. Jedinou zmenou, ktorú je potrebné urobiť v existujúcich komponentov je registrácia nového typu zariadenia. Pri pripájaní nového zariadenia musí byť zadaný typ zariadenia. Na základe týchto dát, hlavné

komponenty vedia, akú úpravu je potrebné spraviť aby zariadenie spoľahlivo fungovalo.



Obr. 30 Hlavná architektúra Dron – VR štruktúry



Obr. 31 Architektúra Drone API

Architektúra pre DroneAPI je znázornená na Obr. 31. DroneControl a Rozhrania DroneStatus určujú funkčnosť konkrétnych doplnkov dronu, ktoré chceme ovládať. Zatiaľ čo DroneControl definuje metódy fyzického ovládania dronu, napríklad takeOff () a move3d (double vx, double vy, double vz, double vr), DroneStatus definuje metódy pre vyžiadanie údajov senzora dronu, napríklad getLocation () a getBatteryPercentage (). Rozhrania sú rozdelené ako bezpečnostné opatrenie. To umožňuje dať určitej skupine povolenie na čítanie dronu bez prístupu k riadiacim rozhraniam. Jedným zo spôsobov asynchrónneho spracovania je použitie metód spätného volania. Ďalším spôsobom je pomocou funkcie futures. Funkcia futures sa používa na označenie toho, že žiadosť bola iniciovaná, ale ešte neukončená. V asynchrónnom programovaní, hlavné vlákno

nečaká na dokončenie akejkolvek úlohy, odovzdá ho nadradenej funkcii a ide sa ďalej. Použitím Future a FutureTask v Jave je možné napísať metódu, ktorá robí dlhé výpočty, ale okamžite sa vracia. Tieto metódy namiesto vrátenia výsledku vrátia objekt Future. To je možné získať výsledok volaním metódy Future.get(), ktorá vráti objekt typu T, kde T je to, čo drží objekt. Trieda DroneCommander je sprostredkovateľom medzi DroneActors, ktorý môže komunikovať iba prostredníctvom správ a volaniami, o ktorých nevie vnútorná implementácia programu. Rozhranie DroneDriver poskytuje jednoduché mechanizmy na vytvorenie DroneActor bez akýchkoľvek znalostí o vnútornom fungovaní oboch protokolov a implementácii. Môže byť zaregistrovaný do triedy singleton, ktorá dokáže vytvoriť viac dronov z jedného volajúceho rozhrania. Ponecháva tiež priestor pre ďalšie typy/implementácie DroneActor. DroneActor je srdcom API Drone. Je sprostredkovateľom odolným voči chybám medzi programom DroneCommander a príslušnými protokolmi. Poskytuje počúvanie a rozhranie pre správy od protokolu aj od externých volajúcich. Ukladá do pamäti všetky údaje senzora a preposiela ich svojim predplatiteľom a volajúcim. DroneActor očakáva RequestNotifications od externých volajúcich a odpovede na tieto volania. Niekedy je potrebné kontaktovať protokol a poslať nový príkaz. Napríklad príkaz drone, odošle ich účastníkovi DroneController pomocou správ. Tieto príkazy môžu byť špecifické pre dron a nie sú súčasťou všeobecnej architektúry. Ardrone2Actor a Phantom3ProActor sú konkrétne doplnky pre drony. Majú možnosť posilať konkrétne správy do radiča dronu, respektíve do Ardrone2DroneController a Phantom3ProDroneController. V tejto dizertačnej práci sú drony ovládané prostredníctvom sieťových správ. Preto triedy DroneController využíva protokol Akka Transmission Control Protocol (TCP) a protokol User Datagram protocol (UDP). Vzhľadom na asynchrónnu povahu sieťovej prevádzky neexistuje blokovanie príjmu alebo odosielania dát. Na podporu nových dronov stačí vytvoriť nového konkrétneho aktéra dronu, ktorý prijíma všeobecné správy API dronu, ako sú TakeOffRequestNotification a prekladá ich v typovo špecifických správach zasielaných novým konkrétnym radičom dronov. Na príjem údajov zo snímača musí byť ovládač schopný prijímať typovo špecifické správy z dronu, ktoré preloží konkrétny aktér dronu do všeobecných stavových správ, ako je napríklad AltitudeChangedNotification.

A. Využitie dronov s VR pre „image stitching“

V tejto kapitole rozoberieme praktické využitie dronov ovládaných cez VR rozhranie pre snímkovanie veľkých oblastí. Snímka obrázkov používa viac obrázkov s prekrývajúcimi sa časťami na vytvorenie jedného panoramatického obrázka alebo obrázka s vysokým rozlíšením. Používa sa v oblasti umeleckej fotografie, lekárskeho zobrazovania, satelitnej fotografie a stáva sa veľmi obľúbeným obrazom s príchodom moderných UAV. Tu si stručne vysvetlíme jednu z techník používaných v procese vytvárania obrázkov a popíšeme použité algoritmy.

Základnou požiadavkou algoritmu je jednoduchosť. Zoberme si jeden obrázok v danom čase, spracujeme ho pre kľúčové body, uskutočňujeme transformácie roviny a pridáme ich do konečného kompozitného obrazu. Uvedené obrázky sú v

kvalite 4K a algoritmus musí skenovať každý obrázok. Tento proces trvá určitý čas.

Ukážeme algoritmus a vysvetlíme, čo budeme robiť. Budeme používať OpenCV a Python. Na začiatok algoritmus načíta súbor zo zložky a spracováva obraz podľa obrázka.

Najprv rozmazáme čiernobiely obraz pomocou Gaussovho rozmazania s veľkosťou [5,5] jadra. Potom vytvoríme detektor SIFT a parametre pre najbližšieho suseda (používame FLANN).

```
base_img =
cv2.GaussianBlur(cv2.cvtColor(base_img_rgb,cv2.COLOR_B
GR2GRAY), (5,5), 0)
```

```
detector = cv2.xfeatures2d.SIFT_create()
```

```
FLANN_INDEX_KDTREE = 1
```

```
flann_params = dict(algorithm =
FLANN_INDEX_KDTREE, trees = 5)
```

```
matcher = cv2.FlannBasedMatcher(flann_params, {})
```

Práve teraz sme pripravili náš základný obrázok, funkčný detektor a komparátor. Čo je potrebné urobiť, je načítať a pripraviť ďalší obrázok v rade.

```
next_img_rgb = cv2.imread(next_img_path)
```

```
next_img =
cv2.GaussianBlur(cv2.cvtColor(next_img_rgb,cv2.COLOR_B
GR2GRAY), (5,5), 0)
```

Obrázky sú zoradené podľa času zachytenia, takže vieme, že ďalší obrázok sa bude vždy prekrývať so základnou približne o 80%.

```
next_features, next_descs =
detector.detectAndCompute(next_img, None)
```

```
matches = matcher.knnMatch(next_descs,
trainDescriptors=base_descs, k=2)
```

Musíme filtrovať snímky s pomerom Lowes, ktorý je nižší ako 0,8. Odtiaľ musíme vytvoriť dve polia s kľúčovými bodmi, od ktorých nájdeme maticu fotografií.

```
for match in matches_subset:
```

```
    kp1.append(base_features[match.trainIdx])
```

```
    kp2.append(next_features[match.queryIdx])
```

```
p1 = np.array([k.pt for k in kp1])
```

```
p2 = np.array([k.pt for k in kp2])
```

```
H, status = cv2.findHomography(p1, p2, cv2.RANSAC, 5.0)
```

```
print '%d / %d inliers/matched' % (np.sum(status),
len(status))
```

Nezabudneme na odľahlé obrázky z predchádzajúcich spracovaní. Niektoré sme odstránili pomocou pomeru Lowes, ale RANSAC ich môže vylúčiť a pokúsime sa o to, aby vyhovoval. Výsledok (stav) nám poskytne príkaz - np.sum (status) a zistíme, že koľko odľahlých miest sa objavilo. Potom, čo sme vypočítali transformačnú maticu, musíme tieto obrázky vyformovať do perspektívy a spojiť ich. Vytvárame základný obrázok, ktorý je dostatočne veľký na to, aby držal oba obrázky a potom pridal základný obrázok a ďalšiu snímku.

```
base_img_warp = cv2.warpPerspective(base_img_rgb,
move_h, (img_w, img_h))

next_img_warp =
cv2.warpPerspective(closestImage['rgb'], mod_inv_h, (img_w,
img_h))

# Put the base image on an enlarged palette

enlarged_base_img = np.zeros((img_h, img_w, 3),
np.uint8)

# Create masked composite

(ret,data_map) =
cv2.threshold(cv2.cvtColor(next_img_warp,
cv2.COLOR_BGR2GRAY),
0, 255, cv2.THRESH_BINARY)

enlarged_base_img = cv2.add(enlarged_base_img,
base_img_warp,
mask=np.bitwise_not(data_map),
dtype=cv2.CV_8U)

# Now add the warped image

final_img = cv2.add(enlarged_base_img, next_img_warp,
dtype=cv2.CV_8U)
```

Pre experimentálne výsledky sme systém prepojili s VR sadou Oculus Rift a využili framework navrhnuté pre drona DJI Phantom 3. Ako experimentálnu mapu sme si zvolili areál Technickej univerzity a dron lietal podľa prednastavenej dráhy, ktorú sme kontrolovali cez VR rozhranie. Výsledným letom



Obr. 32 2D snímka areálu Technickej univerzity v Košiciach

bolo zobierané 248 snímok areálu, ktoré sú zobrazené na Obr. 32. Tieto snímky sme pomocou technológie spájania obrazu prepojili do výsledného zobrazenia areálu TUKE. Po analyzovaní priestoru, sme využili ultrazvukové senzory drona a analyzovali sme meranú presnosť, ktorou je schopný dron merať vzdialenosť pod sebou samým. Pri analyzovaní výsledkov merania sme zistili, že táto presnosť sa pohybuje na úrovni +8 pri letovej výške 60 metrov. Pre aplikovanie výpočtu vzdialenosti aj pre hlavnú budovu TUKE sme zvolili letovú výšku 80 metrov.

Výsledný 3D model je na Obr. 33. Tento model vznikol z modelu 2D snímok, ktoré sú zobrazené na Obr. 32 a následným aplikovaním nameranej výšky na prvky budov. Z dôvodu vysokej nepresnosti ultrazvukových snímačov ide len o experimentálne zobrazenie možnosti využitia dronov, virtuálnej reality a tvorby 3D modelov.



Obr. 33 Areál Technickej univerzity spracovaný do 3D priestoru

IV. ZÁVER

Navrhnutá modulárna architektúra, umožňuje prepojenie dronov od rôznych výrobcov. Aj keď sa spôsoby ovládania dronov mimoriadne líšia v závislosti od výrobcu, vďaka univerzálnemu rozhraniu je možnosť ich prepojiť. Prepojenie uskutočnime doplnkami – teda dopísaním modulov v programovacom jazyku JAVA, ktoré je jednoducho aplikovateľné na rozhranie API drona. Toto rozhranie implementuje potrebné akcie dronov. Po pripojení konkrétnych dronov a náhlavných súprav bol vyrobený prototyp, ktorý mal ukázať, ako je možné využívať navrhnutú platformu v reálnych aplikáciách, ako je napríklad image stitching. Na tento účel bolo v prostredí VR navrhnuté virtuálne riadiace centrum, ktoré zobrazuje napájanie kamery a informácie o senzorech pre každý pripojený dron. Operátor môže za chodu prepínať medzi aktívnymi dronmi a automaticky prispôbiť ich riadiace parametre pre rôzne modely od rôznych výrobcov a dáva operátorovi kontrolu nad ich funkciami. Platforma vykazuje predvídateľné správanie pri rozširovaní zdrojov. Experimentálne využitie platformy bolo aplikované na reálnu aplikáciu na zber snímok, z ktorých som vytvoril 3D areál Technickej univerzity v Košiciach. Pri dronoch som navrhol modulárny algoritmus ovládania kamery pomocou pohybu hlavy a schopnosť spolupráce medzi VR a rozhraním drona.

POĎAKOVANIE

Táto publikácia vznikla za podpory projektu APVV-17-0208 – Odolné mobilné siete na doručovanie obsahu a projektu KEGA 009TUKE4/2019.

LITERATÚRA

- [1] S. Gupte, Paul Infant Teenu Mohandas, and J. M. Conrad. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. In Proc. IEEE SoutheastCon, 2012.
- [2] Adam C Watts, Vincent G Ambrosia, and Everett A Hinkley. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6):1671-1692, 2012.
- [3] K. Wong. Survey of regional developments: Civil applications. In Proc. UAV Australia Conference, 2001.
- [4] Markus Quaritsch, Emil Stojanovski, Christian Bettstetter, Gerhard Friedrich, Hermann Hellwagner, Bernhard Rinner, Michael Hofbauer, and Mubarak Shah. Collaborative microdrones: applications and research challenges. In Proc. Autonomics, 2008.
- [5] Role of deployable aerial communications architecture in emergency communications and recommended next steps. Technical report, Federal Communications Commission (FCC), Sep. 2011.
- [6] Evan Ackerman. Matternet wants to deliver video with a network of quadrotors, Aug. 2011. Last accessed August 2016.
- [7] Hamish Mckenzie. Zookal starts world first delivery-by-drone service in Sydney, 2013. Last accessed August 2016.
- [8] Simon Johnson. Flying donkeys, 2013. Last accessed August 2016.
- [9] Q-V Nguyen, Woei Leong Chan, and Marco Debiasi. Design, fabrication, and performance test of a hovering-based apping-wing micro air vehicle capable of sustained and controlled light. In Proc. IMAV, 2014.
- [10] Muhammad Ridhwan Bin Jumat and Sutthiphong Srigrarom. Design and development of UGS apping wing MAVs. In Proc. IMAV, 2014.
- [11] [RSCH16] A. Ramezani, X. Shi, S. J. Chung, and S. Hutchinson. Bat Bot (B2), a biologically inspired playing machine. In Proc. IEEE ICRA, 2016.
- [12] Ilker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, and Samil Temel. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3):1254-1270, 2013.
- [13] E. Yanmaz, R. Kuschnig, and C. Bettstetter. Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility. In Proc. IEEE INFOCOM, 2013.
- [14] Morten Lindeberg, Stein Kristiansen, Thomas Plagemann, and Vera Goebel. Challenges and techniques for video streaming over mobile ad hoc networks. *Multimedia Systems*, 17(1):51-82, 2011.
- [15] Grzegorz Chmaj and Henry Selvaraj. Distributed processing applications for UAV/drones: A Survey. In Proc. Progress in Systems Engineering, 2015.
- [16] R. Muzaffar, "Routing and video streaming in drone networks", Ph.D. dissertation, 2017.
- [17] Carlos de Morais Cordeiro, Hrishikesh Gossain, and Dbarma P Agrawal. Multicast over wireless mobile ad hoc networks: present and future directions. *Network*, 17(1):52-59, 2003.
- [18] Sungjoon Choi, Nakjung Choi, Yongho Seok, Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi. Leader-based rate adaptive multicasting for wireless LANs. In Proc. of IEEE GLOBECOM, 2007.
- [19] Youngsam Park, Yongho Seok, Nakjung Choi, Yanghee Choi, and J Bonnin. Rate-adaptive multimedia multicasting over IEEE 802.11 wireless LANs. In Proc. of IEEE CCNC, 2006.
- [20] Kandaraj Piamrat, Adlen Ksentini, J Bonnin, and Cesar Viho. Q-DRAM: QoE-based dynamic rate adaptation mechanism for multicast in wireless networks. In Proc. of IEEE GLOBECOM, 2009.
- [21] Stefano Paris, Nicolo Facchi, Francesco Gringoli, and Antonio Capone. An innovative rate adaptation algorithm for multicast transmissions in wireless LANs. In Proc. of IEEE VTC, 2013.
- [22] Guan-Ming Su, Xiao Su, Yan Bai, Mea Wang, Athanasios V Vasilakos, and Haohong Wang. QoE in video streaming over wireless networks: perspectives and research challenges. *Wireless Networks*, 22(5):1571, 2016.
- [23] ŠULAJ, Peter - HALUŠKA, Renát - OVSENÍK, Luboš - MARCHEVSKÝ, Stanislav - PULLI, Petri - KRAMAR, Vadim :UAV management system for the smart city. In: DISA 2018 : IEEE World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines : proceedings. - Danver (USA) : Institute of Electrical and Electronics Engineers s. 119-124 [online]. - ISBN 978-1-5386-5101-8 Spôsob prístupu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8490535>.

Hybridné FSO/RF systémy

Renát Haluška

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

Luboš Ovseník

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

Abstract— Tento článok sa zaoberá problematikou optickej komunikácie voľným prostredím, jej využitím a podmienkami, ktoré ovplyvňujú túto komunikáciu. Z dôvodu náchylnosti optickej komunikácie voľným prostredím na poveternostné podmienky je v práci uvedený spôsob prepínania na záložnú linku. Využívaním záložnej linky vzniká hybridný systém, ktorý je potrebné prepínať pomocou tvrdého prepínania s využitím algoritmov strojového učenia, na základe sily prijatého optického výkonu. Pre zber a monitorovanie dát sú využívané systémy InfluxDB, Prometheus, Grafana. InfluxDB slúži ako databázový systém, systém Prometheus slúži pre zber metrik a časových radov a systém Prometheus slúži ako grafická nadstavba pre Prometheus. Pre automatizáciu a vytvorenie predikčného modelu na báze strojového učenia je využívaný cloudový systém Microsoft Azure a Machine Learning Studio, v ktorom bol najprv vytvorený učiaci sa model. Po následnom testovaní učiaceho sa modelu bol vytvorený prediktívny model, ktorý slúži ako aplikácia v cloude s účelom predikcie parametra sily prijatého optického výkonu. Ako vstup využíva aktuálne hodnoty poveternostných podmienok a výstupom je parameter sily prijatého optického výkonu predikovaného v čase.

Keywords— hybridný systém; FSO; optická komunikácia voľným prostredím; rádiová komunikácia; RSSI; strojové učenie

Abstract— This article deals with the issue of optical communication in the open environment, its use and conditions that affect this communication. Due to the sensitivity of optical communication through the open environment to weather conditions, the work presents a method of switching to a backup line. The use of a backup line creates a hybrid system that needs to be reworked by hard switching using machine learning algorithms, based on the strength of the received optical power. InfluxDB, Prometheus, Grafana systems are used for data collection and monitoring. InfluxDB serves as a database system, the Prometheus system serves for the collection of metrics and time series and the Prometheus system serves as a graphical extension for Prometheus. To automate and create a prediction model based on machine learning, the cloud system Microsoft Azure and Machine Learning Studio are used, where the learning model was first determined. After subsequent testing of the learning model, a predictive model was made, which serves as an application in the cloud using the prediction of the parameter of the strength of the received optical power. The input is the current value of weather conditions and the output is a parameter of the strength of the received optical power predicted in time.

Keywords— hybrid system; FSO; free-space optical communication; radio communication; RSSI; machine learning

I. ÚVOD

Optická komunikácia voľným prostredím označovaná aj ako FSO (z angl. Free-Space Optics) znamená prenos optických signálov cez voľný priestor ako je vzduch. Takéto šírenie dát vzduchom vyžaduje použitie optického signálu (svetla) [1]. Svetelnými zdrojmi pre prenos môžu byť a buď svetlo emitujúce diódy alebo lasery (zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia). FSO je jednoduchý koncept, ktorý je podobný optickému prenosu pomocou káblov s optickými vláknami. Hlavný rozdiel je vo využívanom médiu pričom jednou zo zaujímavostí je, že svetelné lúče sa pohybujú vzduchom rýchlejšie (približne 300 000 km/s) ako cez sklo, ktoré využíva vlákňový prenos s rýchlosťou približne 200 000 km/s [2]. Z toho môžeme usúdiť, že optická komunikácia cez voľný priestor môže byť klasifikovaná ako optická komunikácia pri rýchlosti svetla [3]. FSO komunikačné systémy nevyžadujú prevádzkové licencie. Toto platí nielen na Slovensku, ale na celom svete. Vzhľadom na blízkosť IR spektra, ktoré využíva FSO k viditeľnému spektru, má takmer rovnaké vlastnosti ako viditeľné svetlo.

Hlavnou požiadavkou na prevádzku bezvlákňových optických systémov je bezproblémová vzájomná viditeľnosť medzi dvoma komunikačnými bodmi, keďže FSO systémy využívajú svetlo na komunikáciu a to nemôže prejsť pevnými prekážkami ako sú steny, budovy, stromy a iné (Obr. 1). Hybridná bezdrôtová komunikácia vo voľnom priestore (FSO) a vysokofrekvenčná komunikácia (RF) je spôsob, ako zabezpečiť spoľahlivú komunikáciu pre kritickú vonkajšiu dopravu v reálnom čase, pretože počasie ako hmla ovplyvňuje FSO oveľa viac ako RF spojenia. Hlavnou podmienkou použitia FSO je, že prijímač musí byť v priamej viditeľnosti s vysielateľom.



Obr. 1 Komunikácia FSO systému

Vysielané svetlo sa zozbiera na strane prijímača pomocou šošovky. Následne sa prijaté svetlo zameriava na fotoelektrický detektor. Pre všetky praktické účely je veľkosť premietaného lúča na prijímačom konci oveľa väčšia ako veľkosť prijímačej

optiky. Časť prenášaného svetla sa preto stratí počas prenosového procesu. V závislosti od aktuálnej divergencie lúča môže byť veľkosť premietaného lúča niekoľko metrov, zatiaľ čo typický priemer prijímajúceho teleskopu je asi 8-20 cm. Tento jav sa nazýva strata geometrickej cesty. Úzke lúče však vyžadujú veľmi stabilnú montážnu plošinu alebo sofistikovanejší aktívny systém sledovania lúčov [4].

II. SYSTÉM PRE ZÍSKAVANIE A ZAZNAMENÁVANIE DÁT

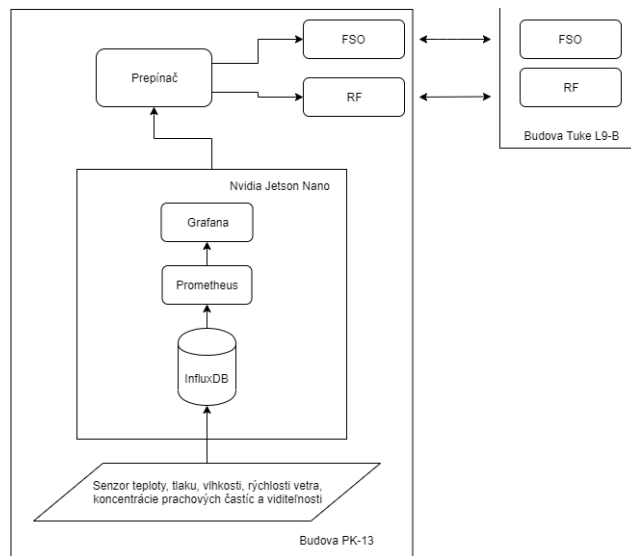
Teplota, vlhkosť, tlak vzduchu, rýchlosť vetra, koncentrácia prachových častíc vo vzduchu a viditeľnosť sú kľúčové pozorovania atmosféry, ktoré pomáhajú predpovedať počasie a prijatý optický výkon RSSI. Typy a kvalita senzorických prístrojov a metódy analýzy pozorovaných dát ovplyvňujú efektívnosť hybridného FSO/RF systému. Medzi základné prístroje na pozorovanie pozdĺžnej cesty medzi FSO hlavicami patria teplomery, barometre, anemometre (merače rýchlosti vetra), merače viditeľnosti a merače koncentrácie pevných častíc v ovzduší. Príklady sofistikovanejšieho vybavenia sú veterné profilovače, meteorologické balóny (rádio sondy), Dopplerov radar a satelity. Aj napriek dostupnému vysoko technickému vybaveniu ľudské pozorovanie stále poskytuje dôležité informácie o podmienkach oblohy, oblakoch a type, veľkosti a množstve zrážok. Rozmiestnenie FSO hlavic v rámci areálu Technickej univerzity v Košiciach znázorňuje Obr. 25. Prvá FSO hlavica spolu so senzorickou stanicou je umiestnená na streche budovy PK13 a druhá FSO hlavica je umiestnená na hlavnej budove L9-A.



Obr. 2 Umiestnenie FSO hlavic v areály TUKE

Systém pre získavanie a zaznamenávanie dát (Obr. 3) potrebných pre predikciu parametra RSSI pozostáva zo senzorov poveternostných podmienok, z ktorých sa dáta ukladajú do databázy. V našom prípade sme využili databázový systém InfluxDB, ktorý je kompatibilný so systémami Prometheus a Grafana, ktoré slúžia na analýzu a zobrazovanie aktuálnych poveternostných podmienok. Systém Prometheus slúži aj pre komunikáciu mobilnej aplikácie, slúžiacej k pohodlnému zobrazovaniu aktuálnych a aj historických poveternostných podmienok. Všetky spomínané systémy pracujú na minipočítači od spoločnosti Nvidia s názvom Jetson

Nano. Prepínač (Switch) slúži pre výber komunikačného kanála medzi FSO linkou a RF linkou. Systém na budove PK-13 zahŕňa FSO hlavicu s Wi-Fi anténou, ktoré komunikujú so svojimi náprotivkami na hlavnej budove Technickej Univerzity v Košiciach L-9B.



Obr. 3 Bloková schéma hybridného FSO/RF systému

Okrem senzorov pre snímanie poveternostných podmienok medzi hardvérové súčasti patria FSO hlavice, RF antény a výpočtová jednotka slúžiaca pre zber a spracovanie vstupných dát. Hlavnou časťou „mozgom“ senzorickej stanice, je mini počítač Nvidia Jetson Nano. Minipočítač ako základnú softvérovú platformu využíva linuxový operačný systém Ubuntu 18.04. Výhoda tohto operačného systému je ľahké vytvorenie serverových služieb pre potreby hybridného FSO/RF systému. Jednou z jeho úloh je cez skripty v jazyku Python zbierať dáta zo senzorov a ukladať ich spolu s hodnotou RSSI do databázy InfluxDB.

Prometheus a Grafana sú dva najprielomovejšie open-source nástroje na monitorovanie a analýzu. Mnohí vývojári začali tieto dva systémy kombinovať. Existuje mnoho rôznych spôsobov, ako je možné nastaviť Prometheus a Grafanu. Prometheus a Grafana môžu slúžiť pre lokálne alebo cloudové riešenia. Niektoré z výhod použitia Prometheus a Grafany lokálne sú:

- Úplná kontrola - ak sú dáta a počítač jedným klastrom je lokálne riešenie so serverom Prometheus a Grafany prijateľné riešenie. Softvér je možné nakonfigurovať podľa svojich vlastných potrieb a je možné vytvoriť vlastné systémy.
- Bezpečnosť - ak sú všetky údaje na serveri lokálne, nie je potrebné otvárať porty, aby došlo k nechcenému kontaktu zvonku. Vhodná možnosť je vyžitie VPN (Virtual Private Network).

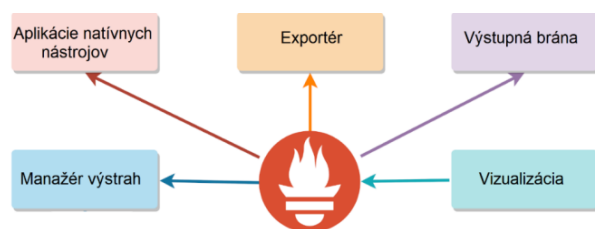
Cloudová technológia je čoraz viac na vzostupe, preto sme sa rozhodli využiť cloudovú službu Microsoft Azure, ktorá slúži k dôležitému uchovávaniu údajov, zálohovaniu, analýze a tvorbe učiaceho sa algoritmu pre hybridný FSO/RF systém.

A. Systém Prometheus

Prometheus je open-source aplikácia používaná na monitorovanie. Zaznamenáva metriky v reálnom čase do databázy časových radov vytvorenej pomocou modelu HTTP. Je licencovaný na základe licencie Apache 2 a zdrojový kód je k dispozícii na serveri GitHub. Využíva modulárnu architektúru a zamestnáva moduly nazývané Exportéri, ktoré umožňujú zaznamenávanie metrick z radu platforiem, IT hardvéru a softvéru. Program Prometheus je napísaný pomocou ľahko distribuovaných binárnych súborov, ktoré mu umožňujú samostatnú prevádzku bez externých závislostí. Prometheus zhromažďuje metriky v pravidelných intervaloch a ukladá ich lokálne. Tieto metriky sa získavajú z uzlov, ktoré prevádzkujú „Exportérov“. Exporter možno definovať ako modul, ktorý extrahuje informácie a preloží ich do formátu Prometheus. Prometheus má manažéra výstrah, ktorý dokáže informovať koncový bod, ak je niečo v neporiadku, a má vizualizačný komponent, ktorý je užitočný na testovanie. Bežne sa však používa v kombinácii s platformou Grafana, ktorá má vhodnejšiu vizualizáciu [5],[6].

Ekosystém Prometheus (Obr. 4) sa skladá z niekoľkých komponentov, z ktorých každý má svoju vlastnú zodpovednosť a jasne definovaný rozsah. Samotný Prometheus je nevyhnutný, ale veľa jeho komponentov je voliteľných, v závislosti od monitorovacích potrieb. Hlavné komponenty ekosystému Prometheus sú tieto:

- Server Prometheus zhromažďuje údaje o časových radoch, ukladá ich, sprístupňuje na vyhľadávanie a na základe nich odosiela výstrahy.
- Manažér výstrah prijíma výstražné spúšťače od Promethea a spracováva smerovanie a odosielanie výstrah.
- Výstupná brána spracováva expozíciu metrick, ktoré boli vytlačené z krátkodobých úloh, ako sú napríklad úlohy cron alebo dávkové úlohy.
- Aplikácie natívnych nástrojov sprístupňujú interný stav prostredníctvom protokolu HTTP.
- Exportér riadi aplikácie, ktoré natívne nepodporuje Prometheus.
- Vizualizácia poskytuje zobrazovanie zhromaždených údajov



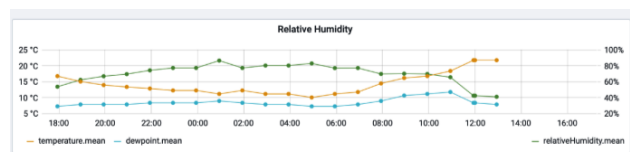
Obr. 4 Prehľad hlavných zložiek ekosystému Prometheus

B. Systém Prometheus

Grafana je open-source vizualizačný nástroj, ktorý pracuje ako webová aplikácia. Podporuje celý rad dátových vstupov, napríklad InfluxDB alebo Prometheus. Umožňuje vizualizovať a upozorňovať na svoje metriky a umožňuje vytvárať dynamické a opakovane použiteľné informačné panely. Tri z hlavných silných stránok Grafany sú:

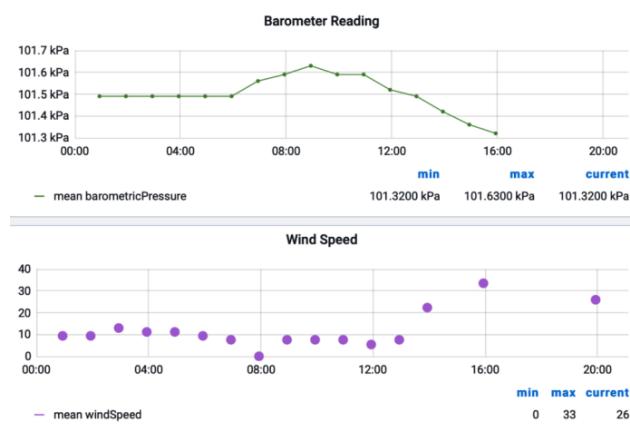
- Výkonný nástroj na vytváranie informačných panelov, ktorý môže obsahovať širokú škálu rôznych vizualizačných techník.
- Schopnosť zobrazovať dynamické údaje z viacerých zdrojov spôsobom, ktorý umožňuje viacrozmernú integráciu.
- Varovný modul, ktorý umožňuje pripojiť pravidlá k panelom. Tieto pravidlá poskytujú možnosť spúšťať výstrahy.

Bežnou možnosťou je zobraziť v rovnakom grafe údaje s rôznymi jednotkami. Často ide o to, ukázať, ako sú dáta korelované alebo súvisiace, pomocou vizualizácie lineárneho vzťahu medzi jedným alebo viacerými radmi údajov ku korelovanému súboru. Zdá sa, že rast alebo pokles hodnôt sa zhoduje s rastom a poklesom (alebo naopak, ak existuje negatívna korelácia) iných hodnôt. Preto sme sa rozhodli vytvoriť dva grafy, ktoré demonštrujú túto vlastnosť: jeden pre teplotu vzduchu a druhý pre relatívnu vlhkosť (Obr. 5).



Obr. 5 Príklad zobrazenia grafu relatívnej vlhkosti s teplotou ovzdušia

Systém Grafana umožňuje samozrejme aj klasické zobrazenie grafov iba s jedným parametrom. Príkladom zobrazenia s jedným parametrom je Obr. 6.



Obr. 6 Príklad zobrazenia atmosférického tlaku a rýchlosti vetra

III. ANALÝZA A PREDSPRACOVANIE DÁT PRE POTREBY STROJOVÉHO UČENIA

Predspracovaním vstupných dát pre potreby strojového učenia, získame skvalitnenie ďalšej práce s nimi. Pre väčšinu algoritmov je vhodná forma vstupných dát nevyhnutná ku správne chodu algoritmu alebo získaniu správneho výsledku. Predikcia parametra RSSI je naviazaná na dáta, ktoré boli získané v minulosti [7],[8]. Na základe dát z reálneho sveta, bude predikčný model, predikovať prijatý optický výkon RSSI. Z dôvodu zabezpečenia hodnovernosti kopírovanie reálneho sveta je nutné zabezpečiť nasledovne:

- získané znalosti je možné objavovať v dátovej množine,
- znalosti sú užitočné a použiteľné,
- vzťahy nachádzajúce sa v získaných dátach by mali opisovať fenomény skutočného sveta,
- získané dáta majú vzťah k miestu, kde boli namerané.

Dátový set môže byť často nekompletný poprípade nekonzistentný a dáta, ktoré zahŕňa, môžu byť zašumené, preto je dáta nutné predspracovať. Predspracovanie vstupného dátového setu môže obsahovať čistenie dát. Keďže dáta môžu byť nekompletné, tzn. že vstupný dátový súbor neobsahuje veličiny alebo celé veličiny [9]. Tento stav môže nastať:

- z dôvodu chyby senzora (výpadok veličiny v danom čase),
- z dôvodu chyby softvéru (výpadok operačného systému minipočítača, poprípade programu pre čítanie hodnoty zo senzora a ukladanie do databázového systému),
- z dôvodu výpadku elektrickej energie.

Jednou z možností, ako vyplniť chýbajúce hodnoty v súbore dát je interpolácia [10],[11]. Hodnoty, ktoré chýbajú v súbore dát budú doplnené striedaním poslednej nameranej s najbližšou nameranou hodnotou. Takto vložené hodnoty do dátového súboru budú s určitou presnosťou zodpovedať skutočným hodnotám, ktoré by boli získane v normálnej prevádzke senzorickej stanice.

Jedným zo spôsobov ako upraviť dátový súbor pre predikciu parametra RSSI je využitie nástroja Grafana. Ak nie je vybraný zdroj dátového súboru, vyberieme ho na karte *Dotaz*. Na karte *Dotaz* budeme na dotazy panela priradzovať zdroj údajov. Náš dátový súbor je nastavený ako predvolený zdroj údajov (default).

Vhodnou analýzou a predspracovaním vstupného dátového súboru je získanie čo najviac presnej predikcie parametra prijatého optického výkonu RSSI. Najvhodnejším spôsobom vytvorenia vstupu pre strojové učenie je zostaviť maticu parametrov vstupu.

$$M = \begin{bmatrix} t & \varphi_1 & p_1 & v_1 & \alpha_1 & \beta_1 & RSSI_1 \\ t_2 & \varphi_2 & p_2 & v_2 & \alpha_2 & \beta_2 & RSSI_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n & \varphi_n & p & v_n & \alpha_n & \beta_n & RSSI_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

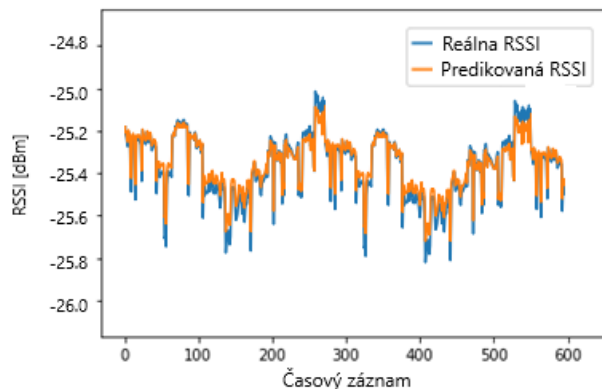
Kde t – predstavuje nameranú teplotu v danom čase, φ – predstavuje relatívnu vlhkosť nameranú v danom čase, p – predstavuje tlak vzduchu nameraný v danom čase, α – predstavuje viditeľnosť nameranú v danom čase, β – predstavuje parameter koncentrácie častíc vo vzduchu nameranú v danom čase a $RSSI$ – predstavuje parametre prijatého optického výkonu nameraného v danom čase. Celý dátový súbor, je rozdelený náhodným spôsobom na tréningu časť o veľkosti 80 % dát a zvyšných 20 % je určených ako testovacia časť.

$$M = \begin{bmatrix} t_1 & \varphi_1 & p_1 & v_1 & \alpha_1 & \beta_1 & RSSI_1 \\ t_2 & \varphi_2 & p_2 & v_2 & \alpha_2 & \beta_2 & RSSI_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n & \varphi_n & p & v_n & \alpha_n & \alpha_n & RSSI_n \\ t_1 & \varphi_1 & p_1 & v_1 & \alpha_1 & \beta_1 & RSSI_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n & \varphi_n & p & v_n & \alpha_n & \alpha_n & RSSI_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

IV. VYBRANÉ KLASIFIKAČNÉ METÓDY STROJOVÉHO UČENIA

A. Two-Class Decision Tree

Algoritmus Two-Class Decision Tree vytvára binárny klasifikátor pomocou algoritmu zosilneného rozhodovacieho stromu [12]. Tento algoritmus je založený na modeli učenia súboru, v ktorom každý strom nadväzuje na predchádzajúci strom opravou svojej chyby [13]. Každý jeden strom bude predpovedať cieľovú triedu závislej premennej (Obr. 7). Konečné predpovede sú založené na celom súbore stromov. Spravidla, keď sú správne nakonfigurované, zosilnené rozhodovacie stromy sú najjednoduchšími metódami, ako dosiahnuť vysoký výkon pri širokej škále úloh strojového učenia. Patria však tiež medzi algoritmy náročnejšie na pamäť a súčasná implementácia drží všetko v pamäti. Preto model vylepšeného rozhodovacieho stromu nemusí byť schopný spracovať veľmi veľké súbory údajov, ktoré môžu niektoré lineárne algoritmy zvládnuť.



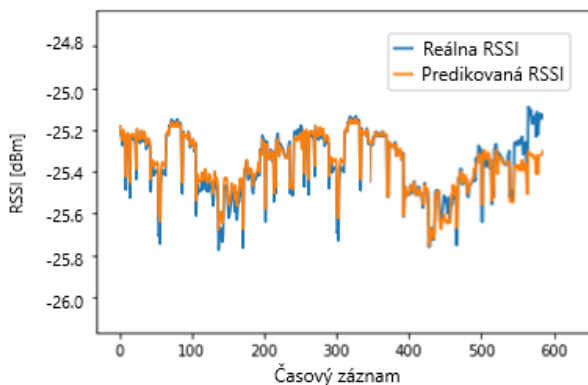
Obr. 7 Príklad predikcie metódou Two-Class Decision Tree

B. Two-Class Decision Forest

Tento algoritmus rozhodovacieho lesa je učiacia metóda určená pre úlohy klasifikácie. Metódy sú založené na všeobecnom princípe, že namiesto spoliehania sa na jeden model môžeme získať lepšie výsledky a všeobecnejší model

vytvorením viacerých súvisiacich modelov a nejakým spôsobom ich skombinovať [14]. Spravidla modely súborov poskytujú lepšie pokrytie a presnosť ako jednotlivé rozhodovacie stromy. Existuje mnoho spôsobov, ako vytvoriť jednotlivé modely a skombinovať ich do jedného súboru. Táto implementácia rozhodovacieho lesa funguje vytvorením viacerých rozhodovacích stromov a následným hlasovaním vo výstupnej triede. Hlasovanie je jednou z najznámejších metód generovania výsledkov v modeli súboru.

Algoritmus na začiatku vytvára veľa jednotlivých klasifikačných stromov s využitím celého súboru údajov, ale s rôznymi východiskovými bodmi. To sa líši od prístupu náhodného lesa, v ktorom jednotlivé rozhodovacie stromy môžu používať iba určitú náhodnú časť údajov alebo funkcií. Každý strom v rozhodovacom lese vytvára nenormalizovaný frekvenčný histogram. Proces agregácie zhrnie tieto histogramy a normalizuje výsledok, aby sa pre každé rozdelenie získali pravdepodobnosti. Stromy, ktoré majú vysokú spoľahlivosť predikcie, budú mať pri konečnom rozhodnutí súboru väčšiu váhu. Rozhodovacie stromy majú všeobecne mnoho výhod pre úlohy klasifikácie. Môžu zachytiť nelineárne hranice rozhodovania. Taktiež je možné trénovať a predpovedať veľké množstvo údajov, pretože sú efektívne pri výpočte a využití pamäte. Výber funkcií je integrovaný do tréningových a klasifikačných procesov a stromy môžu obsahovať zašumené dáta a mnoho funkcií (Obr. 8).

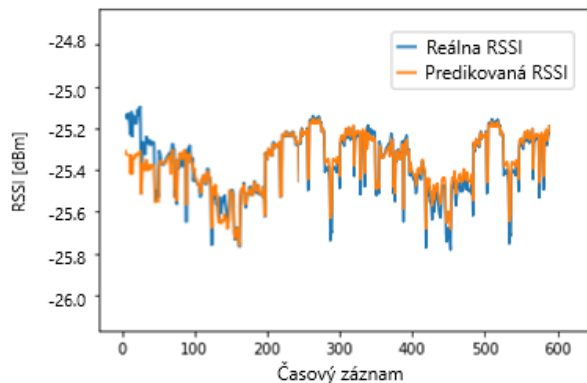


Obr. 8 Príklad predikcie metódou Two-Class Decision Forest

C. Two-Class Decision Jungle

Rozhodovacie džungle, ktoré prehodnocujú myšlienku súborov zakorenených rozhodovacích acyklických grafov (DAG), a ukazujú, že ide o kompaktné a výkonné diskriminačné modely klasifikácie [15]. Na rozdiel od bežných rozhodovacích stromov, ktoré umožňujú iba jednu cestu do každého uzla, umožňuje DAG v rozhodovacej džungli viac ciest od koreňa po každý list. Počas tréningu je rozdeľovanie uzlov a zlučovanie uzlov riadené minimalizáciou úplne rovnakej objektívnej funkcie, tu je vážený súčet entropií na listoch (Obr. 9). Výsledky rôznych dátových súborov ukazujú, že v porovnaní s rozhodovacími lesmi a niekoľkými ďalšími základnými líniami vyžadujú rozhodovacie džungle dramaticky menej pamäte a podstatne zlepšujú zovšeobecnenie. Rozhodovacie džungle majú nasledujúce výhody:

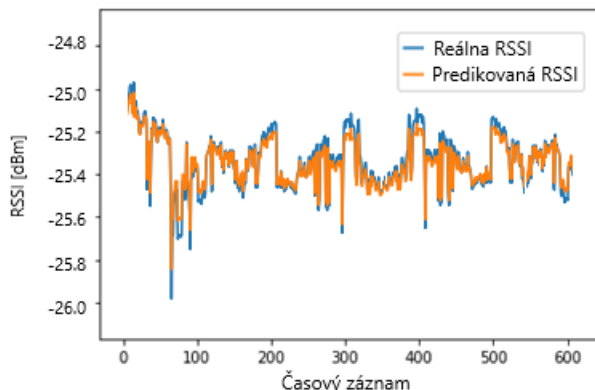
- Umožnením zlúčenia vetiev stromu má rozhodovacia DAG zvyčajne nižšiu pamäťovú stopu a lepší výkon generalizácie ako rozhodovací strom, aj keď za cenu o niečo vyššieho času na zaškolenie.
- Rozhodovacie džungle sú neparametrické modely, ktoré môžu predstavovať nelineárne hranice rozhodovania.
- Vykonávajú výber a klasifikáciu integrovaných funkcií a sú odolné voči prítomnosti hlučných prvkov.



Obr. 9 Príklad predikcie metódou Two-Class Decision Jungle

D. Two-Class Support Vector Machine

Pri výcviku klasifikátora sa zvyčajne snažíme maximalizovať výkonnosť klasifikácie tréningových údajov. Ale ak je klasifikátor príliš vhodný na tréningové dáta, degraduje sa schopnosť klasifikácie neznámych dát, t.j. generalizačná schopnosť. Tento jav sa nazýva preučenie (z angl. overfitting), konkrétne existuje kompromis medzi schopnosťou generalizácie a prispôbením sa údajom o tréningu. Aby sa zabránilo nadmernému preučeniu, boli navrhnuté rôzne metódy. Pre dvojtriedny problém je podporný vektorový stroj tréningovaný tak, aby funkcia priameho rozhodovania maximalizovala schopnosť generalizácie, menovite, m -dimenzionálny vstupný priestor x je mapovaný do l -dimenzionálneho ($l \geq m$) znakového priestoru z . Potom v z je vyriešený problém s kvadratickým programovaním, aby sa dve triedy oddelili optimálnou oddeľovacou nadrovinou (Obr. 10).



Obr. 10 Príklad predikcie metódou Two-Class Support Vector Machine

E. Porovnanie klasifikačných metód strojového učenia

Medzi posledné zvolené metódy patria klasifikačné metódy Two-class Boosted Decision Tree, Two-Class Decision Forest, Two-Class Decision Jungle a Two-Class Support Vector Machine. Pre metódu Two-Class Boosted Decision Tree bol zvolený maximálny počet listov na strome na hodnotu 20 a minimálny počet vzoriek na listový uzol bol nastavený na hodnotu 10. Miera učenia bola nastavená na hodnotu 0,2 a počet stromov bol rovný estimators = 100. Metóda Two-Class Decision Forest využívala baliacu metódu prevzorkovania a počet stromov je rovný estimators = 18. Maximálna hĺbka rozhodovacích stromov bola nastavená na max_depth = 32. Počet náhodných rozdelení na uzol bol nastavený na hodnotu 128. Metóda Two-Class Decision Jungle využíva rovnako ako predošlá metóda baliacu metódu prevzorkovania. Počet rozhodovacích acyklických grafov (DAG) bol nastavený na hodnotu 8 s maximálnou hĺbkou rozhodnutia DAG nastavenou na max_depth_DAG = 32. Maximálna šírka rozhodovacích acyklických grafov (DAG) bola nastavená na hodnotu 128. Počet optimalizačných krokov na rozhodovaciu vrstvu DAG využíval hodnotu 2048. Posledná metóda Two-Class Support Vector Machine využíva počet iterácií 1000 a parameter lamda = 0,001 s využitím normalizácie popisných funkcií. Najhoršie percento úspešnosti predikcie získala metóda Two-Class Decision Tree a to 50,3 %. Nasleduje metóda Two-Class Decision Forest s percentom úspešnosti predikcie 58,2 %. Metóda Two-Class Support Vector Machine dosiahla percento úspešnosti 65,6 %. Najlepšiu hodnotu predikcie úspešnosti získala metóda Two-Class Decision Jungle z hodnotou 75,9 % a tým sa stala táto metóda najlepšou klasifikačnou metódou a zároveň aj najlepšou metódou so všetkých skúmaných metód strojového učenia. Tabuľka 1 zobrazuje porovnanie klasifikačných metód.

TABUĽKA I POROVNANIE KLASIFIKAČNÝCH METÓD

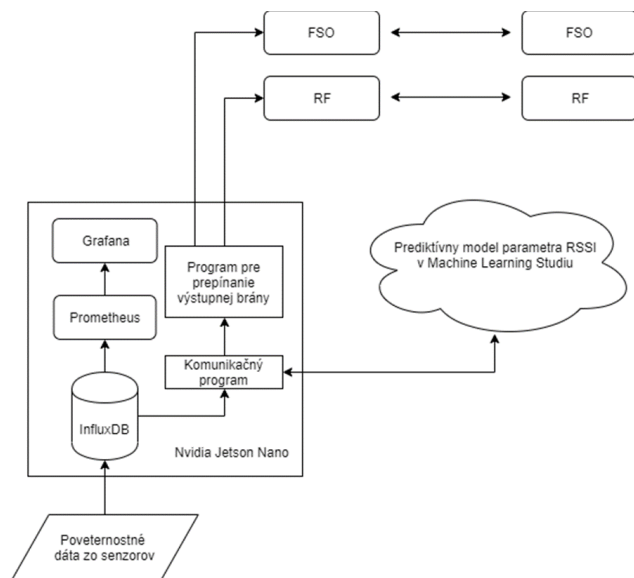
Metóda strojového učenia	Percento úspešnosti predikcie
Two-Class Decision Tree	50,3 %
Two-Class Decision Forest	58,2 %
Two-Class Decision Jungle	75,9 %
Two-Class Support Vector Machine	65,6 %

V. NÁVRH AUTOMATIZOVANÉHO UČIACEHO SA SYSTÉMU PRE TVRDÉ PREPÍNANIE HYBRIDNEJ FSO/RF LINKY

Pre potreby automatizovaného systému, ktorý bude vykonávať predikciu parametra RSSI, bol vytvorený automatizovaný systém zložený z programu pre odosielanie a prijímanie dát v rámci senzorickej stanice, ktorú riadi mini počítač Nvidia Jetson Nano. Ďalšou súčasťou automatizovaného systému je prediktívna webová služba, ktorá pomocou vstupného a výstupného modulu webovej služby predikuje cez zvolený natrénovaný model strojového učenia výstupný parameter RSSI (Obr. 11). Na základe parametra RSSI je následne zvolená výstupná brána pre komunikáciu hybridného FSO/RF systému. Ak parameter RSSI klesne pod kritickú

hodnotu -42 dBm, automaticky sa prepne na záložnú RF linku, ak minipočítač získa z prediktívneho modelu hodnotu parametra RSSI, ktorá je lepšia ako kritická, prepne komunikačný kanál späť na FSO linku s vyššou prenosovou rýchlosťou.

Klasická verzia Microsoft Azure Machine Learning Studio umožňuje nasadiť riešenie predikcie parametra RSSI ako webovú službu. Webové služby Machine Learning Studio poskytujú rozhranie medzi aplikáciou pracujúcou na minipočítači nvidia Jetson Nano a zvoleným prediktívnym modelom pracujúcim v cloude. Aplikácia môže komunikovať s predikčným modelom v reálnom čase. Volanie webovej služby v Machine Learning Studiu vráti výsledky predikcie späť do aplikácie pracujúcej na mini počítači Nvidia Jetson Nano. Ak chceme využívať predikčný model vytvorený v cloude ako webovú službu, potrebujeme na to kľúč API (z angl. Application Programming Interface), ktorý bol vytvorený spolu s webovou službou. Webová služba v Machine Learning Studiu je založená na architektúre rozhraní Representational State Transfer (REST), ktorá je veľmi populárnou voľbou architektúry pre projekty webového programovania.



Obr. 11 Blokový diagram automatizovaného učiaceho sa systému pre tvrdé prepínanie hybridného FSO/RF systému

VI. ZÁVER

Trénovanie predikčného modelu potrebuje vhodnú vstupnú maticu parametrov, ako aj získanie/určenie vhodného parametra hĺbky rozhodovacieho stromu max_depth a počet estimátorov v lese. Klasifikačná metóda Two-Class Support Vector Machine vykazuje najlepšiu predikciu prijatého optického výkonu RSSI. Najnižšiu úspešnosť predikcie parametra RSSI dosiahla metóda Two-Class Boosted Decision Tree. Pri analýze predikcie cieľového parametra prijatého optického výkonu je dôležité dodržiavať časovú následnosť radu nesprávne predikovaných hodnôt stanovených učiacich modelov.

Pre vytvorenie automatizovaného systému pre tvrdé prepínanie hybridnej FSO/RF linky na báze strojového učenia bol využitý cloudový systém Microsoft Azure a Machine Learning Studio. Vytvorením prediktívneho modelu ako

webovej služby vznikla možnosť rýchlej zmeny algoritmu strojového učenia pre tvrdé prepínanie linky. Ako predikčný model bola zvolená metóda Two-Class Decision Jungle, keďže získala najlepšiu percentuálnu úspešnosť predikcie. Porovnaním kritickej hranice -42 dBm, pod ktorou nie je možný prenos cez FSO linku s výstupnou hodnotou z prediktívneho modelu pracujúceho v cloude, sme získali plne automatický systém prepínania hybridnej FSO/RF linky.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná nasledujúcimi výskumnými projektami: APVV-17-0208 – Odolné mobilné siete na doručovanie obsahu a vďaka projektu KEGA009TUKE-4/2019.

LITERATÚRA

- [1] A. Mathur, A. Cheffena, M. Bhatnagar, M. Lei, H. (2019). Physical layer security of hybrid satellite-FSO cooperative systems. *IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-14.
- [2] P. Singal, S. Rai, R. Punia, and D. Kashyap, "Comparison of different transmitters using 1550nm and 10000nm in FSO communication systems," *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 107–113, jun 2015
- [3] R. Gupta and P. Singh, "Hybrid fso - rf system: A solution to atmospheric turbulences in long haul communication," *International Journal of Scientific Engineering Research*, vol. 5, no. 11, nov 2014.
- [4] J. Tóth, "High availability and reliability in wireless optics using data analytics techniques" - 2017.In: *SCYR 2017*. - Košice : TU, 2017 S. 118-119. - ISBN 978-80-553-3162-1
- [5] T. Hastie and J. M. Chambers. "Statistical models." *Statistical Models in S*. Routledge, 2017. 13-44.
- [6] H. Gavin. *Mastering Machine Learning with scikit-learn*. Packt Publishing Ltd, 2017.
- [7] M. Brzoska, "Modellierung zwischen „overfitting“ und „underfitting“," *Rationale Entscheidungen unter Unsicherheit*, pp. 152–156, 2018.
- [8] H. Hamsa, S. Indiradevi, and J. J. Kizhakkethottam, "Student Academic Performance Prediction Model Using Decision Tree and Fuzzy Genetic Algorithm," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 326–332, 2016.
- [9] G. Mittag and S. Möller, "Detecting Packet-Loss Concealment Using Formant Features and Decision Tree Learning," *Interspeech 2018*, Feb. 2018.
- [10] X. Zhong and W. Li, "A Decision-Tree-Based Multi-objective Estimation of Distribution Algorithm," *2007 International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS 2007)*, 2007.
- [11] L. Rokach and O. Maimon, "Top-Down Induction of Decision Trees Classifiers—A Survey," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 35, no. 4, pp. 476–487, 2005.
- [12] O. Maimon and L. Rokach, "Introduction to Supervised Methods," *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, pp. 149–164.
- [13] A. S.bhatlavande and A. A. Phatak, "Data Aggregation Techniques in Wireless Sensor Networks: Literature Survey," *International Journal of Computer Applications*, vol. 115, no. 10, pp. 21–24
- [14] T. Shaikhina, D. Lowe, S. Daga, D. Briggs, R. Higgins, and N. Khovanova, "Decision tree and random forest models for outcome prediction in antibody incompatible kidney transplantation," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 52, pp. 456–462, 2019
- [15] F. J. Brims, T. M. Meniawy, I. Duffus, D. D. Fonseka, A. Segal, J. Creaney, N. Maskell, R. A. Lake, N. D. Klerk, and A. K. Nowak, "A Novel Clinical Prediction Model for Prognosis in Malignant Pleural Mesothelioma Using Decision Tree Analysis," *Journal of Thoracic Oncology*, vol. 11, no. 4, pp. 573–582, 2016.

Aspekty miniaturizácie elektronického obvodu pre NFC komunikáciu na báze vnorených súčiastok

Tomáš Lenger

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

Alena Prietriková

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

Abstrakt—Tento článok sa zaoberá aspektmi miniaturizácie elektronického obvodu pre NFC komunikáciu na báze vnorených súčiastok a face-down technológie. Významná časť článku sa zaoberá analýzou mechanických a tepelných vlastností substrátov, špeciálne prepreg materiálov, za účelom ich využitia pri vnáraní súčiastok. Analyzované boli vlastnosti sendvičových štruktúr na báze sklo-epoxidových kompozitov, ako aj vplyv dvojstupňového laminovania na ich vlastnosti. Následne boli získané poznatky o týchto štruktúrach využité pri realizácii miniaturizovaného NFC komunikačného modulu na báze vnorených súčiastok.

Kľúčové slová—vnorené súčiastky; sendvičové štruktúry; mechanické vlastnosti; tepelné vlastnosti; NFC; face-down technológia

Abstract— This paper deals with aspects of miniaturization of the electronic circuit for the NFC communication based on embedded components. The most important part of the paper focuses on the analysis of the mechanical and thermal properties of substrate materials, especially the prepreg materials, for the purpose of its application for components embedding. Sandwich structures' properties based on glass-epoxy composites were analysed as well as the impact of two-step lamination on its' properties. Achieved knowledge was then applied for the realization of a miniaturized NFC communication module based on embedded components.

Keywords—embedded components; sandwich structures; mechanical properties; thermal properties; NFC; face-down

I. ÚVOD

Svetový vývoj priemyslu sa momentálne ocitá na prelome novej vlny revolúcie označovanej ako Industry 4.0. Industry 4.0 predstavuje prepojenie a súčinnosť oblastí elektroniky a informatiky. Tento aktuálny trend prináša vzájomné prepojenie všetkých elektronických zariadení prostredníctvom dostupných bezdrôtových komunikačných technológií. Cieľom tejto modernizácie priemyslu je dosiahnutie vzájomnej komunikácie všetkých elektronických zariadení pre dosiahnutie vyššej efektívnosti, komfortu a bezpečnosti [1].

Súčasná doba sa rovnako vyznačuje miniaturizáciou v každej oblasti priemyslu a elektronika nie je výnimkou. V minulosti sa miniaturizácia vyznačovala zmenšovaním rozmerov vodivých dráh, izolačných medzier alebo puzdier

samotných súčiastok. Momentálne sa stále väčší dôraz kladie aj na využívanie tretieho rozmeru a teda ukladanie viacerých čipov na seba alebo vnáranie súčiastok do substrátu v smere osi "z" [2-8].

Miniaturizácia zároveň umožňuje integráciu viacerých funkcií do jedného zariadenia. Zatiaľ čo kedysi boli elektronické zariadenia určené primárne pre jeden účel, tak napr. súčasné smartfóny v sebe zlučujú niekoľko kedysi samostatných zariadení (telefón, fotoaparát, kamera a pod.) [4-6].

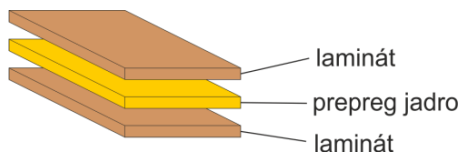
Spoločne s miniaturizáciou sa vývoj v oblasti elektroniky zameriava na prenášanie informácií alebo aj energie prostredníctvom bezdrôtových komunikačných prostriedkov. Jednou z najnovších takýchto možností, ktorej základom je bezdrôtová komunikácia na krátke vzdialenosti, je komunikácia NFC (Near Field Communication). Základy komunikácie NFC položili v roku 2002 spoločnosti Sony a Philips. NFC komunikácia má veľký potenciál do budúcnosti, pretože je to technológia, ktorá umožňuje bezdrôtový prenos informácií a energie pri zachovaní vysokej miery bezpečnosti prenášaných informácií [15-18]. Aktuálne prebieha dynamický vývoj v tejto oblasti, ktorý je podmienený vývojom a aplikáciou nových typov materiálov a tiež technológií. Ruka v ruku s tým prebieha aj vývoj v oblasti návrhových systémov zameraných na miniaturizáciu v smere osi "z" [10-14].

NFC komunikácia vychádza zo štandardov RFID (Radio Frequency IDentification), ale využíva princíp elektromagnetickej indukcie a umožňuje prenos nielen informácií ale aj energie na krátke vzdialenosti. V porovnaní s RFID sa NFC vyznačuje vyššou bezpečnosťou pri bezdrôtovom prenose informácií od jedného zariadenia k druhému, nakoľko informácie sú prenášané na krátke vzdialenosti. Získanie a zneužitie prenášaných informácií je v prípade použitia NFC náročné alebo aj neuskutočniteľné. Momentálne sa tento typ komunikácie využíva najčastejšie pri bezkontaktných platbách platobnými kartami. Medzi možnosťami využívania NFC technológie patria aj platby telefónom, rôzne identifikačné systémy, párovanie zariadení bez potreby zásahu používateľa alebo získanie informácie z pasívneho NFC tagu, ktorý môže byť umiestnený napr. na plagáte alebo v časopise [15-18].

Jednou z progresívnych možností miniaturizácie DPS, ktorá je založená na využívaní materiálov známych z výroby viacvrstvových DPS je technológia face-down. Technológia face-down umožňuje využitie materiálu, ktorý pozostáva z kombinácie sklenených vlákien a polovytvrdenej epoxidovej živice (FR-4 Flame Retardant-4) pre vytváranie miniaturizovaných viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami. Využívanie tohto materiálu pre vytváranie týchto komplikovaných štruktúr s vnorenými súčiastkami vyžaduje podrobnú analýzu mechanických ale aj tepelných vlastností týchto materiálov za účelom predikovania správania sa a životnosti týchto komplikovaných štruktúr [5-14].

II. POUŽITÉ SUBSTRÁTOVÉ MATERIÁLY, MOŽNOSTI ICH SPRACOVANIA A POPIS VZORIEK

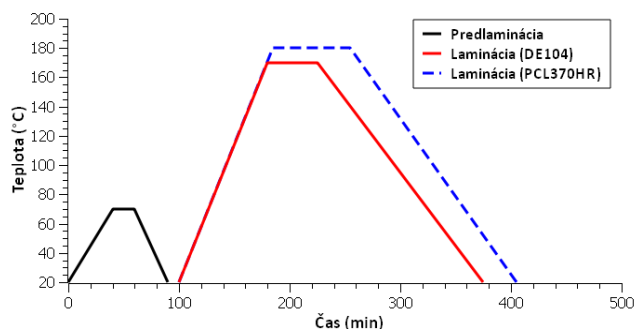
Substráty predstavujú základný stavebný prvok pre vytváranie viacvrstvových štruktúr technológiou face-down. Na substráty sú kladené vysoké požiadavky nielen z pohľadu ich mechanických vlastností ale spoločne so zvyšovaním hustoty integrovania elektronických súčiastok, vrátane vnárania súčiastok do substrátu sa stále väčší význam prikladá aj vlastnostiam jednotlivých substrátov pri zmene teploty. Vytváranie moderných sendvičových štruktúr na báze epoxidových materiálov (Obr. 1) aj v oblasti elektroniky predstavuje veľkú výzvu a vyžaduje podrobnú analýzu vlastností týchto materiálov (Tab.1). Pre účely dizertačnej práce boli využívané nízkoteplotné (DE 104) ako aj vysokoteplotné (PCL370HR) substrátové epoxidové polovytvrdené materiály (prepregy).



Obr. 1 Sendvičová štruktúra

TAB. 1 ZÁKLADNÉ PARAMETRE POUŽITÝCH MATERIÁLOV

	DE104	PCL370HR
Teplota skleného prechodu T_g [°C]	135	180
Teplota delaminácie T_d [°C]	315	340
ϵ_r	4,32	3,92
$\tan \delta$	0,024	0,025



Obr. 2 Teplotný profil dvojstupňovej laminácie tetovaných prepregov

Kritickou súčasťou vytvárania viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami je laminácia, pri ktorej dochádza k dovytvrdeniu prepreg materiálu. Laminácia je realizovaná prostredníctvom tlaku a teploty podľa presne stanoveného profilu (Obr. 2), ktorý je pre jednotlivé typy prepregov zafinovaný výrobcom.

Prepreg jadro pozostáva z viacerých vrstiev prepregových listov, v závislosti od toho, aká je požadovaná výsledná hrúbka, čo súvisí s výškou potenciálne vnáraných elektronických súčiastok. Na jednej strane je to výhodou, nakoľko je možné hrúbku prepregového jadra pružne meniť, ale na druhej strane to môže predstavovať komplikáciu pri tvorbe viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami, nakoľko prepreg jadro v nevytvrdenom stave nie je kompaktné.

Uvedené nízkoteplotné a vysokoteplotné polovytvrdené materiály (DE104 a PCL370HR) sa štandardne dosiaľ v elektronike využívali pre výrobu viacvrstvových DPS (dosiek plošných spojov) aplikáciou jedнокrokového postupu pri použití 1 listu prepregu pôsobením definovanej teploty a tlaku. Za účelom vývoja technológie face-down sme v našich experimentoch analyzovali možnosti viacstupňového tepelného spracovania týchto lepiacich listov. Cieľom dvojstupňového postupu spracovania bola snaha vyrobiť neúplne vytvrdený viacvrstvový prepreg materiál, ktorý by mal dostatočnú hrúbku a tuhosť na to, aby bolo možné s ním manipulovať (vyrezávať, vŕtať, ...) a teda vyvárať otvory pre vnorenie potenciálnych súčiastok SMD (Surface Mount Device). Pre optimalizáciu procesu laminácie bol teda pridaný proces predlaminácie (Obr. 2), ktorý zabezpečuje vytvorenie kompaktného viacvrstvového prepreg jadra, pri zachovaní adhézných vlastností prepreg jadra pri neskoršej laminácii. Predlaminácia bola realizovaná pri teplote 70 °C po dobu 20 minút pre oba používané prepreg materiály, pri rovnakom tlaku ako proces laminácie (2 MPa). Následný proces laminácie bol realizovaný podľa odporúčani výrobcu (Obr. 2), teda v prípade prepregu DE104 bola vrcholová teplota 170 °C po dobu 45 minút a v prípade prepregu PCL370HR to bola teplota 180°C po dobu 70 minút.

Pre analýzu vplyvu procesu predlaminácie bolo realizovaných viacero typov vzoriek (Tab. 2), na nízkoteplotnom, rovnako ako aj na vysokoteplotnom substrátovom materiáli. Analyzovaný bol vplyv predlaminácie a to buď v jedno alebo dvojstupňovom technologickom postupe na mechanické ako aj na tepelné vlastnosti použitých materiálov. V našich experimentoch sme porovnávali vlastnosti úplne vytvrdených štandardných nízko (L1) a vysokoteplotných (L2) laminátov s viacvrstvovými prepreg jadrami ako aj so sendvičovými štruktúrami, ktoré predstavovali kombináciu tuhých laminátov a sendvičového jadra. Vzorky boli teda tvorené samostatným tuhým laminátom "L1 a L2", samostatným prepreg jadrom, laminovaným jedноступňovým laminovaním (bez procesu predlaminácie) "1A, 2A a 3A", laminovaným dvojstupňovým laminovaním (s procesom predlaminácie) "1B, 2B a 3B", ale aj ako výsledná sendvičová štruktúra "M1 a M2", ktorá pozostávala z vonkajších laminátov a prepreg jadra. Počet

vrstiev prepreg jadra bol prispôbený pre dosiahnutie približne rovnakej výslednej hrúbky prepreg jadra (1,2 mm). Hrúbka jadra na úrovni 1,2 mm umožňuje vnáranie aj aktívnych SMD súčiastok vrátane BGA (Ball Grid Array) puzdier.

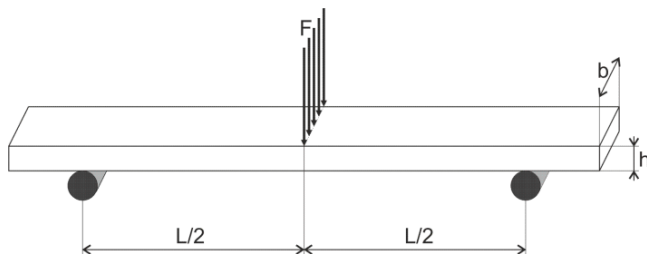
TAB. 2 TYPY TESTOVANÝCH VZORIEK

Vzorka	Materiál	Počet vrstiev	Tg [°C]	Hrúbka [mm]
L1	DE104 laminát	1	135	0,56
L2	PCL370HR laminát	1	180	0,56
1A	DE104 prepreg 2116	10	135	1,21
1B	DE104 prepreg 2116	5+5	135	1,16
2A	DE104 prepreg 7626	6	135	1,27
2B	DE104 prepreg 7626	3+3	135	1,22
3A	PCL370HR prepreg 7626	6	180	1,36
3B	PCL370HR prepreg 7626	3+3	180	1,32
M1	Kombinácia L1 a 1B	10+2	135	2,22
M2	Kombinácia L2 a 3B	6+2	180	2,44

III. ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

A. Základný popis testu a testovaných vzoriek

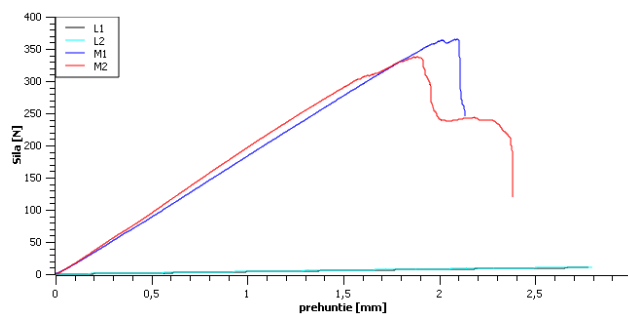
Mechanické vlastnosti vzoriek boli testované 3-bodovým ohybom (Obr. 3). Pevnosť v ohybe takto laminovaných sendvičových materiálov predstavuje veľmi dôležitý parameter. Použitie 3-bodového ohybu sa považuje za optimálny test pre detegovanie nedostatkov v procese laminácie, ktorý umožňuje odhaliť zníženú adhéziu vrstiev prepreg jadra, čo môže viesť k delaminácií medzi jednotlivými prepreg vrstvami ako aj k delaminácií medzi prepreg jadrom a vonkajšími laminátmi v sendvičovej štruktúre.



Obr. 3 Princíp 3-bodového ohybu

Meranie pevnosti v 3-bodovom ohybe bolo realizované zariadením Testometric M250-2.5CT. Rozmery testovaných vzoriek boli 7 mm × 40 mm a hrúbka vzoriek závisela od typu testovanej vzorky (Tab. 2). Meranie v 3-bodovom ohybe prebiehalo pri konštantnej rýchlosti zaťažovania (0,4 mm/min) a zaznamenávanými veličinami bolo prehnutie vzorky a aplikovaná sila. Sila je aplikovaná presne do stredu testovanej vzorky až kým nedôjde k mechanickému porušeniu vzorky. Výsledkom testovania každej vzorky je závislosť aplikovanej sily od prehnutia testovanej vzorky (Obr. 4).

Z Obr. 4 vyplýva takmer lineárny priebeh závislosti aplikovanej sily od prehnutia meraných vzoriek. Lineárny priebeh bol narušený až výrazným poklesom aplikovanej sily, keď došlo k narušeniu sklenených vlákien jednej alebo viacerých vrstiev meranej vzorky. Sendvičová štruktúra s prepreg vrstvami s jemnejším vlákňovaním (M1) a nižšou teplotou skleneného prechodu preukazovala lepšiu vzájomnú súdržnosť medzi jednotlivými vrstvami a nedochádzalo k ich postupnému narušovaniu ale k narušeniu pevnosti celej štruktúry. Naopak, pri vzorkách s hustejším vlákňovaním a s vyššou teplotou skleneného prechodu (M2) častejšie dochádzalo k postupnému narušovaniu štruktúry jednotlivých vrstiev.



Obr. 4 Priebeh závislosti aplikovanej sily od prehnutia testovanej vzorky pri 3-bodovom ohybe

Namerané hodnoty počas 3-bodového ohybu sú základom pre výpočet mechanických vlastností testovaných vzoriek. Pevnosť v ohybe a tuhosť v ohybe predstavujú základné mechanické vlastnosti viacvrstvových štruktúr. Pevnosť v ohybe opisuje aká sila je potrebná pre trvalé narušenie štruktúry testovaného materiálu a je udávaná vzťahom [14]:

$$R_{max} = (3 \cdot F \cdot L) / (2 \cdot b \cdot h) \tag{1}$$

v ktorom F je sila pôsobenia, L je merané rozpätie vzorky, b je šírka vzorky a h je hrúbka vzorky. Tuhosť v ohybe opisuje schopnosť materiálu odolávať sile na neho pôsobiacej a je udávaná vzťahom [14]:

$$K = F_{max} / w_0 \tag{2}$$

v ktorom F_{max} je maximálna sila pôsobenia a w_0 je priehyb vzorky, ktorý je udávaný vzťahom [14]:

$$w_0 = (F \cdot L^3) / (48 \cdot E_f \cdot I) \tag{3}$$

v ktorom F je sila pôsobenia, L je merané rozpätie vzorky, E_f je Youngov modul pružnosti a I je moment zotrvačnosti udávaný vzťahom [14]:

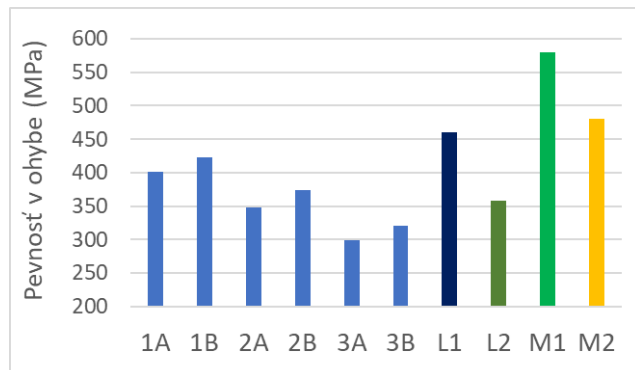
$$I = (h^3 \cdot b) / 12 \tag{4}$$

v ktorom h je hrúbka vzorky a b je šírka vzorky.

B. Dosiahnuté výsledky

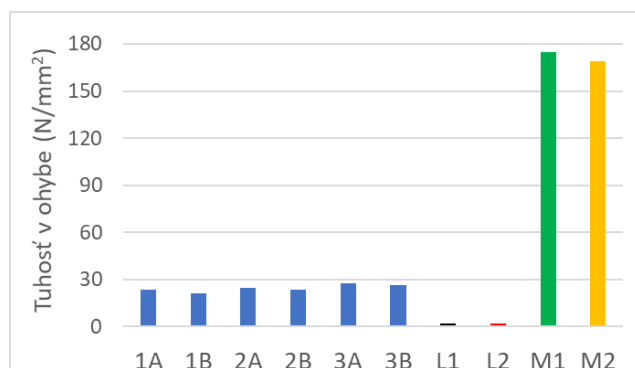
Z vypočítanej pevnosti v ohybe pre každý typ vzorky (Obr. 5) môžeme vidieť vplyv dvojstupňového laminovania na prepreg jadro. Všetky vzorky vytvorené dvojstupňovým laminovaním preukazovali vyššiu pevnosť v ohybe ako ekvivalentné vzorky vytvorené jednoduchým laminovaním,

čo znamená, že predlaminovanie neznižuje, ale naopak mierne zvyšuje silu potrebnú pre narušenie prepreg jadra. Najnižšiu pevnosť v ohybe dosahovali vzorky prepreg jadra s hustejším vláknaním, čo bolo spôsobené nižšou súdržnosťou medzi vrstvami a postupným praskaním jednotlivých vrstiev prepreg jadra. Najväčšiu pevnosť v ohybe preukázali sendvičové štruktúry, čo poukazuje na ich vysokú pevnosť a životnosť elektronického zariadenia a ich vhodnosť pre tvorbu viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami.



Obr. 5 Pevnosť v ohybe jednotlivých vzoriek

Obr. 6 zobrazuje tuhosť v ohybe testovaných materiálov. Z Obr. 6 vyplýva, že vzorky vytvorené jednodupňovým a dvojstupňovým laminovaním majú porovnateľnú tuhosť, takže dvojstupňové laminovanie neznižuje tuhosť prepreg jadra v porovnaní s jednodupňovým laminovaním. Prepreg jadro z vysokoteplotného materiálu (3A a 3B) malo v porovnaní s nízkoteplotným mierne väčšiu tuhosť v ohybe. Najväčšiu tuhosť preukázali sendvičové štruktúry oboch testovaných materiálov. Tuhosť v ohybe oboch testovaných sendvičových štruktúr bola výrazne vyššia ako pri ostatných testovaných vzorkách, čo poukazuje na vysokú mechanickú odolnosť sendvičových štruktúr počas životnosti elektronického zariadenia.



Obr. 6 Tuhosť v ohybe jednotlivých vzoriek

IV. ANALÝZA TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ

A. Základný popis testu a testovaných vzoriek

Pri analýze tepelných vlastností pomocou DMA (dynamicko-mechanická analýza) boli využívané rovnaké typy vzoriek ako pri analýze mechanických vlastností (Tab. 2).

Kľúčovým ukazovateľom teplotných vlastností je teplota skleného prechodu (T_g), počas ktorej sa výrazne menia tepelné vlastnosti materiálu. Najvhodnejším spôsobom analýzy T_g je DMA, pri ktorej je testovaný materiál cyklicky mechanicky namáhaný počas postupného nárastu teploty a sú zaznamenávané zmeny v správaní sa testovaného materiálu, kedy dochádza k zmene z elastických vlastností testovaného materiálu na viskózne. DMA merania boli realizované zariadením DMA Q800 TA Instruments pri stálom náraste teploty 10 °C za minútu v rozsahu teplôt od 50 °C do 250 °C. Výsledok DMA merania predstavuje závislosť $\tan \delta$ (pomer dynamického modulu pružnosti k statickému modulu) od teploty (Obr. 7), pričom maximálna hodnota $\tan \delta$ predstavuje teplotu skleného prechodu.

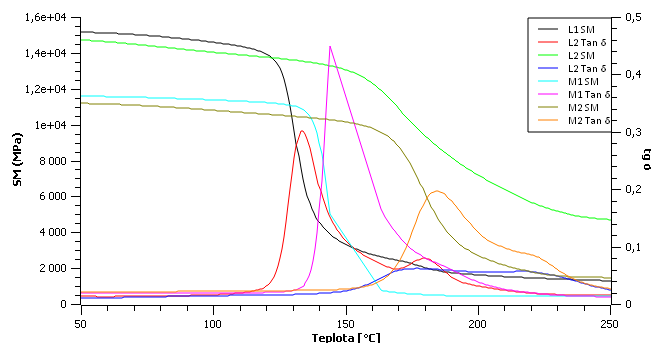
Kritickou vlastnosťou pre vytváranie viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami je CTE (koeficient tepelnej rozťažnosti). Pre detegovanie CTE sa využíva TMA (termo-mechanická analýza). Pri TMA je na testovanú vzorku aplikovaná konštantná sila počas zmeny teploty v požadovanom rozsahu. Merania TMA prebiehali pri teplotnom rozsahu od 20 °C do 230 °C čo zodpovedá štandardnému reflow procesu pre spájkovanie.

B. Výsledky DMA

Obr. 7 zobrazuje porovnanie priebehov laminátov a sendvičových štruktúr. Z tohto obrázka vyplýva výrazný rozdiel v teplote skleného prechodu medzi použitým nízkoteplotným (L1) a vysokoteplotným (L2) laminátom, čo bolo v súlade s katalógovými hodnotami. Nízkoteplotný materiál taktiež preukazuje výraznejšiu zmenu vlastností v oblasti okolo teploty T_g ako vysokoteplotný materiál. Z grafu je pri všetkých vzorkách čitateľná aj mierna zmena vlastností nad hodnotou T_g , ktorá je pravdepodobne spôsobená dovytvrdzovaním živice v objeme vzorky. Sendvičové štruktúry preukázali nárast teploty T_g v porovnaní s laminátmi z rovnakého typu materiálu. Dynamický modul pružnosti (SM - Storage Modulus) v grafe DMA reprezentuje množstvo pružnej deformácie materiálom počas jedného záťažového cyklu. Počas takmer lineárnej časti SM priebehu (elastická oblasť správania sa testovaného materiálu) je dodávaná energia počas DMA analýzy prenesená do pružnej deformácie testovanej vzorky. Pokles SM je spôsobený mäknutím sklenených vlákien, čím dochádza k zmene elastických vlastností materiálu na viskózne. Zmenou elastických vlastností materiálu na viskózne už nedochádza k pružným deformáciám testovaného materiálu, ale dodávaná energia je vo viskóznej oblasti správania sa materiálu rozptýlená v testovanom materiáli.

Z Obr. 7 vyplýva, že najvyššiu hodnotu SM v oblasti pred T_g dosahovali nízkoteplotné materiály. Nízkoteplotné materiály (L1, M1) taktiež preukazovali výraznejší pokles SM, ktorý začína pri teplote približne 125 °C. Vysokoteplotné materiály (L2, M2) mali viditeľne nižšie hodnoty SM v oblasti pod T_g . Pokles hodnoty SM vysokoteplotných materiálov (zmena elastických vlastností na viskózne) začína pri teplote približne 160 °C a nemal taký výrazný spád ako pri nízkoteplotných materiáloch. Z Obr. 7 vyplýva, že vo vysokoteplotnom materiáli nedochádza k tak výraznému mäknutiu sklenených vlákien ako pri nízkoteplotnom materiáli. Vysokoteplotný

materiál má stabilnejšie vlastnosti v širšom rozsahu teplôt a predstavuje vhodnejší materiál pre vytváranie viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami.



Obr. 7 Graf DMA merania testovaných laminátov

V Tab. 3 sú namerané hodnoty T_g prostredníctvom DMA. Z Tab. 3 vyplýva, že dvojstupňové laminovanie mierne znížilo T_g a teda negatívne ovplyvnilo tepelnú stabilitu testovaných materiálov. Tento nedostatok bol však odstránený laminovaním prepreg jadra do sendvičových štruktúr, ktoré preukazovali veľmi stabilné tepelné vlastnosti a hodnota T_g týchto štruktúr vzrástla v porovnaní so samostatnými laminátmi, ako aj v porovnaní so samostatným prepreg jadrom.

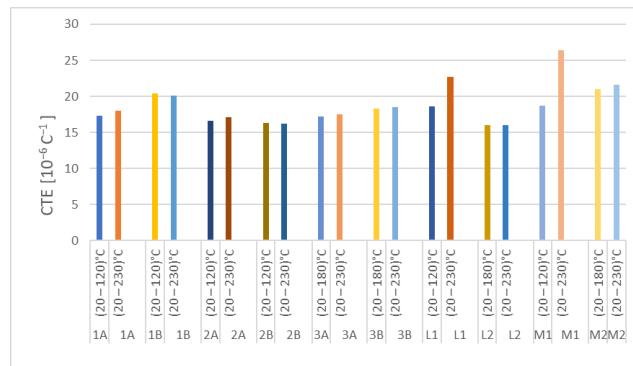
TAB. 3 POROVNANIE NAMERANÝCH A KATALOGOVÝCH HODNÔT T_g

Vzorka	T_g [°C] - namerané	T_g [°C] - katalógové
1A	136,89	135
1B	131,83	135
2A	136,29	135
2B	135,36	135
3A	174,02	180
3B	170,80	180
L1	133,12	135
L2	176,83	180
M1	144,24	135
M2	185,04	180

C. Výsledky TMA

Z Obr. 8 je viditeľný mierny nárast CTE pri použití dvojstupňového laminovania pri vzorkách s jemnejším vlákňovaním (1A a 1B), ale na druhej strane vzorky vytvorené dvojstupňovým laminovaním (1B) vykazujú stabilnejšiu hodnotu CTE pod T_g a nad T_g . Najvýraznejší rozdiel medzi CTE pod T_g a nad T_g bol zaznamenaný pri vzorkách z nízko-teplotného materiálu (L1 a M1). Z Obr. 8 vyplýva, že hustota vlákňovania nemá vplyv na CTE daného materiálu (porovnanie vzoriek 1A a 2A). Vysokoteplotný laminát (L2) mal výraznejšie stabilnejšiu hodnotu CTE pod T_g a nad T_g v porovnaní s nízko-teplotným laminátom (L1). Rovnaký výsledok bol dosiahnutý aj pri sendvičových štruktúrach, pri ktorých mal vysokoteplotný materiál taktiež stabilnejšiu hodnotu CTE pod T_g a nad T_g . Z dosiahnutých výsledkov vyplýva väčšia stabilita hodnoty CTE pod T_g a nad T_g pri vysokoteplotných materiáloch, takže je predpokladaná vyššia stálosť rozmerov v smere osi "x" a "y" u vysokoteplotného

materiálu pri zmenách teploty DPS počas životnosti elektronického zariadenia.

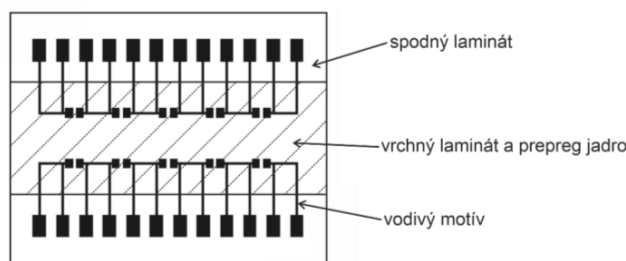


Obr. 8 CTE v smere osi "y" u jednotlivých vzoriek

V. ANALÝZA SPOĽAHLIVOSTI SMD REZISTOROV VNORENÝCH DO SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR

A. Základný popis testu

Pre testovanie spoľahlivosti a stability bola navrhnutá a realizovaná sendvičová štruktúra s vnorenými súčiastkami (Obr. 9).



Obr. 9 Použitý motív pre meranie 4-vodičovou metódou

Rezistory boli osadené na vnútornú stranu spodného laminátu pomocou spájkovania využitím spájkovacej pasty SAC305 ešte pred laminovaním sendvičovej štruktúry. Prepregové jadro sendvičovej štruktúry bolo predlaminované a po predlaminovaní do neho boli vyrezované otvory pre vnárané súčiastky. Ako už bolo spomínané, výhodou tejto sendvičovej zostavy je, že hrúbku prepregového jadra máme možnosť modifikovať a to na základe údajov o predpokladanej výške vnáraných elektronických komponentov. Takto predpripravené materiály boli následne zlamínované do sendvičovej štruktúry s vnorenými súčiastkami.

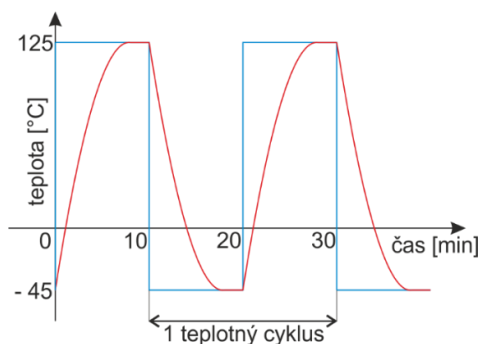
Spoľahlivosť sendvičových štruktúr sme deklarovali na podklade merania elektrického odporu vnorených SMD rezistorov v porovnaní so štandardnými SMD rezistormi osadenými na povrchu DPS. Spoľahlivosť bola meraná na základe analýzy životnosti týchto súčiastok po realizácii zrýchlených testov starnutia.

Pre analýzu spoľahlivosti modulov s rezistorami boli realizované 3 typy vzoriek:

- elektronické súčiastky osadené na povrchu laminátu (S1),
- elektronické súčiastky vnorené do nízko-teplotnej sendvičovej štruktúry (M1),
- elektronické súčiastky vnorené do vysoko-teplotnej sendvičovej štruktúry (M2).

Rozmery prepreg jadra v smere osi “x“ a “y“ ako aj vrchného laminátu boli menšie ako rozmery spodného laminátu s osadenými súčiastkami, čo umožnilo meranie elektrického odporu vnorených súčiastok aj bez vytvárania medzivrstvových prepojení. Motív realizovanej štruktúry bol navrhnutý pre možnosť merania každej súčiastky samostatne prostredníctvom 4-vodičovej metódy merania (Obr. 9). Meranie elektrického odporu vnorených súčiastok bolo realizované zariadením Milliohmmer Agilent 4338B. Meranie prebiehalo pri konštantnom prúde 1 mA a presnosťou merania na 10 $\mu\Omega$.

Pre analýzu životnosti vnorených súčiastok v sendvičových štruktúrach je vhodné využiť proces zrýchleného starnutia. Počas doby životnosti takýchto štruktúr môže vplyv zmien teplôt a rôznych tepelných vlastností jednotlivých materiálov viesť k vzniku pnutí vo vnútri sendvičovej štruktúry. Tieto vnútorné pnutia vedú k zníženiu kvality vnorených spájkovaných spojov v sendvičovej štruktúre. Vnorené súčiastky sú v porovnaní so súčiastkami osadenými na povrchu DPS navyše vystavené vysokej teplote počas procesu laminácie. Pre odhadnutie správania sa viacvrstvovej štruktúry počas životnosti elektronického zariadenia sme využili teplotné cyklovanie.

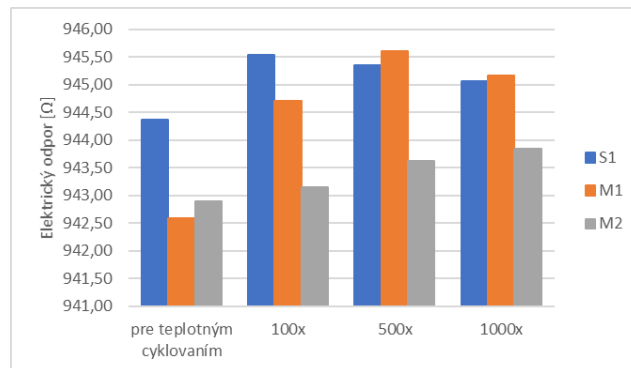


Obr. 10 Profil teplotného cyklovania pri šokových skúškach

Modrý priebeh na Obr. 10 označuje nastavený priebeh teploty a červený priebeh zobrazuje reálny priebeh teploty počas teplotného cyklovania. Teplotné cyklovanie bolo realizované v šokovej komore na základe normy IPC-9701 pri teplotách od -45 °C do 125 °C. Jeden teplotný cyklus trval 20 minút a pre odhadnutie spoľahlivosti bolo vykonaných 1000 teplotných cyklov.

Merania elektrického odporu boli vykonané pred teplotným cyklovaním, po 100, po 500 a po 1000 teplotných cykloch (Obr. 11). Pre každý typ vzorky bolo osadených 15 SMD rezistorov. Najmenšie hodnoty elektrického odporu pre všetky typy vzoriek boli namerané pred teplotným cyklovaním. Výrazný rozdiel nameraných hodnôt elektrického odporu

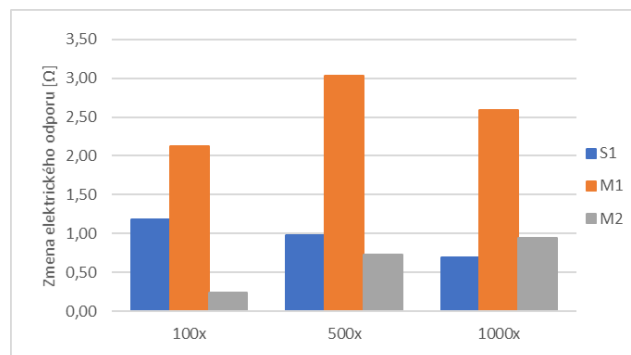
medzi jednotlivými typmi vzoriek bol pravdepodobne spôsobený toleranciou samotných SMD rezistorov.



Obr. 11 Priemerné hodnoty elektrického odporu SMD rezistorov v priebehu teplotného cyklovania

Z Obr. 11 vyplýva, že elektrický odpor SMD rezistorov osadených na povrchu DPS (S1) vzrástol po 100 teplotných cykloch, ale po 500 a 1000 teplotných cykloch už nedochádzalo k výrazným zmenám hodnôt elektrického odporu. Ide o štandardný priebeh zmeny hodnôt odporu po zrýchlenom starnutí. SMD rezistory vnorené do sendvičovej štruktúry z nízko-teplotného laminátu (M1) vykazovali vzrast hodnôt elektrického odporu po 100 aj po 500 teplotných cykloch, ale po 1000 teplotných cykloch už nedochádzalo k rastu elektrického odporu. Je potrebné však poukázať na to, že tento nárast hodnôt elektrického odporu po 100, 500 ale aj 1000 cykloch bol v porovnaní s rezistorami na povrchu ale aj rezistorami na báze vysoko-teplotného sendviča výrazne odlišný. Zmena poukazuje na to, že pri teplotnom cyklovaní v rozsahu -45 °C až +125 °C dochádzalo tiež k cyklovaniu zmien teplotnej rozťažnosti sendvičovej štruktúry.

Tieto cyklické zmeny rozťažnosti pravdepodobne v dôsledku vnútorných pnutí, ovplyvnili kvalitu spájkovaného spoja vnorených rezistorov. SMD rezistory vnorené do sendvičovej štruktúry z vysoko-teplotného laminátu (M2) vykazovali mierny nárast hodnôt elektrického odporu počas celej doby teplotného cyklovania, ale zmeny hodnôt elektrického odporu SMD rezistorov v tomto prípade boli počas celej doby teplotného cyklovania najmenšie (Obr. 12).



Obr. 12 Zmena elektrického odporu počas teplotného cyklovania vzhľadom na hodnotu pred teplotným cyklovaním

Sumarizácia nameraných hodnôt elektrického odporu je uvedená v Tab. 4. Najmenší rozptyl nameraných hodnôt elektrického odporu SMD rezistorov mali vzorky osadené na povrchu DPS (S1). Rozptyl nameraných hodnôt SMD rezistorov vnorených do vysokoteplotného materiálu (M2) bol takmer rovnaký ako rozptyl elektrického odporu SMD rezistorov osadených na povrchu laminátu (S1). Hodnoty SMD rezistorov vnorených do nízkoteplotného materiálu (M1) mali najväčší rozptyl nameraných hodnôt elektrického odporu. Rovnako aj k najvýraznejším zmenám hodnoty elektrického odporu počas teplotného cyklovania (Obr. 12) dochádzalo u SMD rezistorov vnorených do nízkoteplotného laminátu (M1). Zmena hodnoty elektrického odporu SMD rezistorov vnorených do vysokoteplotného laminátu (M2) bola počas teplotného cyklovania porovnateľná s SMD rezistormi osadenými na povrchu (S1).

TAB. 4 NAMERANÉ HODNOTY ELEKTRICKÉHO ODPORU POČAS V PRIEBEHU TEPLOTNÉHO CYKLOVANIA

Počet cyklov	Vzorka	Priemer [Ω]	Min [Ω]	Max [Ω]
0x	S1	944,37	937,70	952,70
	M1	942,59	930,10	955,80
	M2	942,90	935,70	950,10
100x	S1	945,55	936,30	953,60
	M1	944,71	936,40	958,10
	M2	943,15	936,00	949,30
500x	S1	945,35	935,70	953,90
	M1	945,61	936,10	964,60
	M2	943,63	936,20	950,20
1000x	S1	945,06	937,10	953,80
	M1	945,17	936,10	958,70
	M2	943,84	936,30	950,60

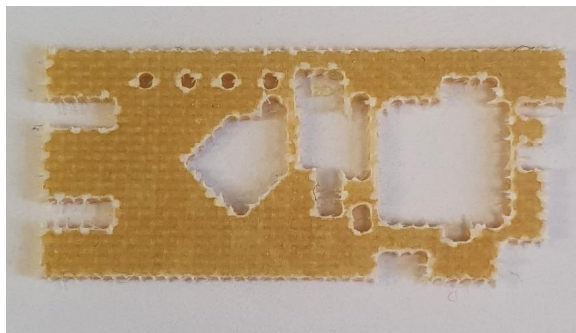
VI. APLIKÁCIA ZÍSKANÝCH POZNATKOV PRI REALIZÁCIÍ NFC KOMUNIKAČNÉHO MODULU

Pri konštrukcii tohto miniatúrneho modulu boli využité poznatky o možnostiach laminovania viacvrstvových štruktúr, pričom rozmer vyvinutej antény bol prispôsobený vývojovej doske. Na trhu je dostupných mnoho vývojových dosiek s rôznymi rozmermi, ktoré ale zvyčajne neposkytujú možnosť bezdrôtovej komunikácie. NFC antény sú zvyčajne dostupné len ako prídavná DPS, ktorá výrazne zväčší celkové rozmery zariadenia. Z pohľadu miniaturizácie je výhodnejšie implementovať NFC anténu priamo na vývojovú DPS. Z tohto dôvodu bolo cieľom tejto časti aplikovanie antény a zvolenej vývojovej dosky (XMC2Go) do sendvičovej štruktúry s vnorenými súčiastkami. Na základe poznatkov o materiáloch testovaných v prechádzajúcich kapitolách boli všetky súčasti modulu realizované na substrátovom materiáli PCL370HR z dôvodu jeho stabilnejších vlastností.

Prvým krokom pri realizácii NFC modulu bola výroba a osadenie vrchnej DPS sendvičovej štruktúry s NFC anténou. Cievka NFC antény bola realizovaná na vrchnej strane tejto DPS (teda na vrchnej strane celého modulu) a na spodnej strane bol osadený rezonančný kondenzátor a NFC integrovaný obvod, ktorý zabezpečuje realizáciu NFC komunikácie. Osadené súčiastky boli pretavené štandardným reflow procesom pri špičkovej teplote 235 °C. Súčiastky osadené na

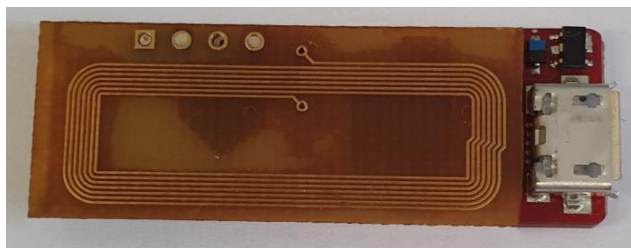
spodnej strane boli v následnom procese laminácie určené pre vnorenie.

Druhou nevyhnutnou súčasťou realizácie NFC modulu s vnorenými súčiastkami bola príprava prepreg jadra. Prepreg jadro pozostávalo zo šiestich listov prepregu. Počet vrstiev bol zvolený tak, aby presahoval hrúbku súčiastok osadených na vývojovej doske XMC2Go (1 mm). Prepreg jadro bolo predlaminované pri konštantnom tlaku 2 MPa a pri teplote 70 °C po dobu 20 minút. Predlaminovaním bola vytvorená súdržná štruktúra prepreg listov, ktorá bola následne vyfrézovaná na potrebný rozmer a zároveň do nej boli vyfrézované otvory pre vnorenie súčiastok ako aj pre vytvorenie vodivých prepojení medzi vonkajšími DPS sendvičovej štruktúry (Obr. 13). Pri frézovaní otvorov na vnáranie súčiastok bolo potrebné brať do úvahy súčiastky na vývojovej doske ako aj na spodnej strane vrchnej DPS s NFC anténou.



Obr. 13 Predlaminované prepreg jadro s vyfrézovanými otvormi pre vodivé prepojenia a vnorenie súčiastok

Vodivé prepojenia cez prepreg jadro boli realizované na báze striebornej pasty Britrade 26-8204. Dôvodom zvolenia tejto pasty bola jej výhodná teplota sintrovania (150 °C), takže k sintrovaniu tejto pasty dochádzalo počas procesu laminácie a teda nebolo potrebné ďalšie teplotné zaťažovanie vytvorenej štruktúry po procese laminácie z dôvodu vytvrdnutia aplikovanej pasty. Strieborná pasta bola do otvorov v prepreg jadre aplikovaná prostredníctvom disperzingu.



Obr. 14 NFC modul s vnorenými súčiastkami na báze sendvičových štruktúr

Po nanosení pasty boli všetky súčasti modulu zložené do sendvičovej štruktúry a pripravené na lamináciu. Laminácia prebiehala podľa odporúčaní výrobcu pri konštantnom tlaku 2 MPa a pri teplote 180 °C po dobu 70 minút. Pri laminácii dochádza vplyvom pôsobenia tlaku a teploty k dovytvrdnutiu

prepreg jadra a výsledkom laminácie je NFC modul na báze sendvičových štruktúr s vnorenými súčiastkami (Obr. 14) pozostávajúci z oboch častí (vývojovej dosky a DPS s NFC anténou).

VII. ZÁVER

Tento článok bol zameraný na aspekty miniaturizácie NFC modulu na báze vnorených súčiastok (face-down technológia), čo predstavuje jeden z aktuálnych a progresívnych spôsobov miniaturizácie elektronických zariadení. Pri miniaturizácii NFC modulu bola potrebná detailná analýza vlastností substrátov využívaných pre tvorbu viacvrstvových štruktúr za účelom ich využitia pri potenciálnom vnáraní elektronických súčiastok do ich objemu, ako aj možnosti ich laminácie a následne využitie získaných poznatkov pri realizácii miniaturizovaného NFC modulu.

Sendvičové štruktúry preukázali veľmi stabilné mechanické aj tepelné vlastnosti počas testovania 3-bodovým ohybom, DMA, ako aj pri TMA. Zvolené meracie techniky predstavujú najlepší spôsob analyzovania mechanických a tepelných vlastností materiálov určených pre vytváranie viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami. Počas testovania bol analyzovaný aj vplyv dvojstupňového laminovania na prepreg jadro ako aj na sendvičovú štruktúru. Bolo preukázané, že využitie dvojstupňového laminovania pri tvorbe sendvičových štruktúr nezhoršuje mechanické ani tepelné vlastnosti substrátov. Sendvičové štruktúry predstavujú výborný substrátový materiál pre tvorbu viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami. Vysokoteplotné lamináty preukázali výborné tepelné vlastnosti a vysokú stabilitu rozmerov pri zmene teploty. Sendvičové štruktúry z vysokoteplotných materiálov predstavujú najvhodnejší materiál pre vytváranie viacvrstvových štruktúr s vnorenými súčiastkami.

Vnáranie SMD súčiastok do sendvičových štruktúr sa ukázalo ako možnosť miniaturizácie viacvrstvových štruktúr. Bolo dokázané, že sendvičové štruktúry z nízkoteplotného materiálu majú výrazne väčšie zmeny rozmerov pri zmenách teploty, čo malo nepriaznivý vplyv aj na stabilitu hodnoty elektrického odporu SMD rezistorov vnorených do takýchto štruktúr. Naopak, stabilita hodnoty elektrického odporu SMD rezistorov vnorených do sendvičových štruktúr z vysokoteplotného materiálu bola porovnateľná s SMD rezistormi osadenými na povrchu.

Na základe získaných poznatkov o mechanických a tepelných vlastnostiach sendvičových štruktúr bolo možné realizovať miniaturizovaný NFC komunikačný modul na báze sendvičových štruktúr technológiou face-down z materiálu PCL370HR.

REFERENCES

- [1] C. Klienberga "Industry 4.0: what makes it a revolution?" In: 24th EurOMA Conference, Edinburg, Scotland, 2017.
- [2] D. Manesis et al. "Embedding technologies for heterogeneous integration of components in PCBs-an innovative modularization approach with environmental impact." In: 21st European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition, Warsaw, Poland, 2017.
- [3] D. Ator, R. Genke "Embedded Passives Technology, Final Testing Report." FY'04 Work. 2005. Dostupné na internete: <[https://nepp.nasa.gov/docuploads/CDEFCEB7-6369-4A0B-A229B5632F364A89/Embedded Passives BOK.f.doc](https://nepp.nasa.gov/docuploads/CDEFCEB7-6369-4A0B-A229B5632F364A89/Embedded%20Passives%20BOK.f.doc)>.
- [4] C. Coombs Jr. Printed Circuits Handbook: Sixth Edition, Chapter 21: Embedded Components, New York. 2008.
- [5] W. Kpobie et al. "Thermo-mechanical simulation of PCB with embedded components." In: Microelectronics Reliability 65, 2016. s. 108-130.
- [6] A. Ostmann et al. "Power Modules with embedded Components." In: European Microelectronics and Packaging Conference, Grenoble, France, 2013.
- [7] R. Tuominen, T. Earis, L. Mettovaara "IMB Technology for Embedded Active and Passive Components in SiP, SiB and Single IC Package Applications." In: Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging Vol. 2, No. 1, 2009. s. 134-138.
- [8] K. Hyunho "Device Embedded Substrate with Embedding Multi Passive Components for Camera Module." In: Pan Pacific Symposium 2015 Proceedings, Kauai, Hawaii, USA, 2015. s. 242-247. ISBN: 978-1-63439-931-9.
- [9] L. Boettcher, S. Karaszkiwicz, D. Manesis, A. Ostmann "Power Electronics Packages with Embedded Components - Recent Trends And Developments." In: SMTA International 2013 Proceedings, Fort Worth, Texas, USA, 2013. s. 337-342. ISBN: 978-1-62993-291-0.
- [10] M. Cauwe et al. "Passive Component Embedding in Printed Circuit Boards for Space Applications" [online]. Dostupné na internete: <http://passive-components.eu/wp-content/uploads/2017/10/1.3.-PCNS2017_mcauwe_paper.pdf>.
- [11] K. Perälä "Embedded Resistors in Printed Wiring Boards." In: Proceeding of the IEEE 9th Int'l Symposium on Advanced Packaging Materials, 2004. s. 220-229.
- [12] E. Parker, B. Narveson, A. Alderman, L. Burgyan "Embedding Active and Passive Components in PCBs and Inorganic Substrates for Power Electronics." In: 2015 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), Chicago, USA, 2015. s. 107-110.
- [13] P. Palm, J. Moisala, A. Kivikero, R. Tuominen and A. Iihola "Embedding active components inside printed circuit board (PCB) - a solution for miniaturization of electronics," Proceedings. International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces, 2005., Irvine, CA, USA, 2005, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISAPM.2005.1432034.
- [14] A. Pietrikova, T. Lenger, O. Fricova, L. Popovic, and L. Livovsky "Properties of glass/epoxy sandwich structure for electronic boards", Microelectronics International, Vol. 37 No. 3, pp. 139-146.
- [15] K. Xiao and L. Luo "A Novel Mobile Device NFC Stack Architecture," 2013 IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Chengdu, China, 2013, pp. 169-173, doi: 10.1109/DASC.2013.57.
- [16] V. Coskun, B. Ozdenizci, K. Ok and M. Alsadi "NFC loyal system on the cloud," 2013 7th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, Baku, Azerbaijan, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAICT.2013.6722637.
- [17] H. Horikoshi and H. Chujo "Prevention Method of Electromagnetic Interference by Implementing NFC Radio Active Signal for Touchpad," 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Nara, Japan, 2018, pp. 488-489, doi: 10.1109/GCCE.2018.8574634.
- [18] R. Schamberger, G. Madlmayr and T. Grechenig "Components for an interoperable NFC mobile payment ecosystem," 2013 5th International Workshop on Near Field Communication (NFC), Zurich, Switzerland, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/NFC.2013.6482440.

Výpočet prevádzkovej teploty vodiča prenosového vedenia v reálnych prevádzkových podmienkach

Vladimír Gáll

Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
vladimir.gall@student.tuke.sk

Alexander Mészáros

Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
alexander.meszaros@tuke.sk

Abstrakt — Integrácia a presun k obnoviteľným zdrojom energie, rast záťaže a starnutie súčasnej energetickej sústavy sú hlavnými dôvodmi rozvoja elektroenergetiky. Prenosové vedenia v poslednej dobe čelia novým technickým a hospodárskym výzvam. Tieto problémy by mohlo vyriešiť okamžité využitie pokrokových technológií a moderných metód. V tejto časti sa zaoberáme prenosom a distribúciou elektrickej energie so zameraním na výpočet prevádzkovej teploty vodiča prenosového vedenia, ktoré je zaťažené elektrickým prúdom. Zaťaženie prenosového vedenia je obmedzené povolenou prevádzkovou teplotou. Prevádzková teplota by nemala prekročiť prípustnú prevádzkovú teplotu, pretože vodiče prenosového vedenia majú z hľadiska priehybu vodičov mechanické obmedzenie. Prevádzková teplota, ako aj prevádzkové podmienky vodiča sú určené druhom a materiálom vodiča ALFe (ACSR). Cieľom je navrhnúť vhodnú výpočtovú metódu prevádzkovej teploty vodiča vonkajšieho prenosového vedenia v reálnych prevádzkových podmienkach (vonkajšie poveternostné vplyvy, prúdové zaťaženie a vplyv koróny). Výhoda tejto navrhovanej metódy (diferenciálnej rovnice) spočíva v zohľadnení vplyvu koróny. To zvyšuje presnosť výpočtu prevádzkovej teploty vodiča v reálnych podmienkach. Výpočty sú porovnávané podľa metódy diferenciálnej rovnice a metódy popísanej v technickom návode CIGRE 601 – Návod pre výpočet tepelného hodnotenia vonkajších vedení. Metóda diferenciálnej rovnice počítá so stratami, alebo bez strát vplyvom koróny. Tieto metódy stanovenia prevádzkovej teploty sú porovnané počas viacerých dní v rôznych poveternostných podmienkach, zohľadňujúc vplyv teploty prostredia, slnečného žiarenia, rýchlosti a smeru vetra. Zistilo sa, že pri pôsobení koróny sa teplota vodiča v malej miere zvyšuje.

Kľúčové slová— prenosové vedenie, vodiče ACSR, technický návod CIGRE 601, technický návod CIGRE 207, diferenciálne rovnice, prevádzková teplota, poveternostné podmienky

I. ÚVOD

Prenosové vedenia predstavujú jednu z hlavných súčastí elektrizačnej sústavy. Prenosové vedenia sú prevádzkované pri

vysokom napätí a ich parametre musia spĺňať určité limitné požiadavky, aby bola zaistená ich bezpečná a spoľahlivá prevádzka [1]. Jedným z kľúčových problémov energetických technológií sa javí otázka prenosu, prenosových strát a hospodárnosti vedení, kde vzhľadom na technické parametre súčasných prenosových vysokonapäťových systémov dochádza k podstatným stratám pre väčšie vzdialenosti [2] [3] [4]. V budúcnosti budú existujúce energetické zdroje nahradené novými. To znamená, že nové elektrárne budú umiestnené v inom usporiadaní a ďalej od miest spotreby. To povedie k transformácii výrobnjej infraštruktúry elektrární [5] [6] [7]. Vysokonapäťové prenosové vedenia budú vo väčšej miere spolupracovať s obnoviteľnými zdrojmi. V súčasnosti dochádza k zmene prírodných podmienok a pre tento dôvod sa predpokladá ďalší nárast teploty [2] [3]. To znamená, že budú menej chladné zimy, ale za to budú teplejšie letá. Zároveň táto otázka zmení spotrebu elektrickej energie, kde v zime sa bude síce menej kúriť v budovách, ale v lete sa elektrická energia bude využívať pre pohon klimatizačných jednotiek na chladenie budov. Skúsenosti z krajín s teplejším podnebí, kde veľká časť spotreby elektrickej energie je viazaná na pohon klimatizačných jednotiek ukazujú, že nemožno všetky problémy s tým spojené vyriešiť napríklad cez Smart-grid v oblasti energetických sústav [5]. Na druhej strane významné výkyvy v dopyte po elektrickej energii prispeli k potrebe vyvinúť novú technologickú stratégiu s názvom Smart-grid systémy. Smart-grid systémy sa stavajú smerom vývoja v elektroenergetike pre optimalizáciu využitia a spotreby elektrickej energie, vysoká účinnosť energetických systémov je jedným z jeho najdôležitejších cieľov [3] [4].

Jedným z dôležitých prevádzkových problémov prenosových vedení je prevádzková teplota, ktorá ovplyvňuje ich technické a ekonomické vlastnosti [8] [9]. Elektrický prúd pretekajúci vodičom spôsobuje zvýšenie jeho prevádzkovej teploty. Straty v izolácii izolovaných vodičov alebo straty vplyvom koróny okolo holých vodičov spôsobujú tiež zvýšenie prevádzkovej teploty. Teplo sa prenáša z vodiča do okolitého prostredia vedením tepla najmä u izolovaných vodičov a konvekciou u holých vodičov. Kým maximálna teplota povrchu vodiča je relatívne nízka, podiel tepla prenášaného žiarením (radiáciou) je tiež relatívne malé v

porovnaní s teplom prenášaného prúdením (konvekciou) a vedením (kondukciou) [10] [11] [12]. Výsledná prevádzková teplota vodiča je daná rovnováhou medzi vyprodukovaným teplom, teplom akumulovaným vo vodiči a teplom prenášaným do okolia [13] [14] [15].

V mnohých prípadoch je potrebné presnejšie určiť prevádzkovú teplotu holých vodičov prenosového vedenia v neustále sa meniacom prostredí, aby sa zabránilo narušeniu bezpečných vzdialeností vplyvom priehybov alebo možnému poškodeniu materiálov v dôsledku vysokých prevádzkových teplôt [16]. Ampacita (prúdová kapacita alebo ampérová kapacita) je významným parametrom konštrukcie a prevádzky prenosového vedenia. Táto hodnota predstavuje maximálny prípustný prevádzkový prúd pri nepretržitej prípustnej (alebo dovolenej) teplote za poveternostných podmienok, ako je teplota prostredia, rýchlosť a smer vetra a slnečné žiarenie, ktorý môže tečť cez prenosové vedenie bez narušenia elektrických a mechanických vlastností vodičov [17]. Prenosové vedenia však väčšinou fungujú v zložitom prostredí (poveternostné podmienky), čo zodpovedá situácii núteného prenosu tepla prúdením [18] [19]. Na prenos tepla prenosovými vedeniami má vplyv niekoľko faktorov, napríklad vietor a slnečné žiarenie [20] - [28]. Napríklad v článku [29] je opísané meranie magnetického poľa okolo vonkajších prenosových vedení. Metóda použitá na výpočet prevádzkovej teploty získaná z ideálnych poveternostných podmienok nie je schopná presne a komplexne zohľadniť vplyv skutočných poveternostných podmienok na vzostup prechodnej odozvy prevádzkovej teploty vodiča [30].

Teplota prostredia a ďalšie poveternostné podmienky ovplyvňujú prevádzkovú teplotu vodičov prenosového vedenia a je potrebné brať do úvahy skutočné poveternostné podmienky na jednotlivých územiach. Poveternostné podmienky sa počas dňa výrazne menia a sú zaznamenávané, spracovávané [31] - [35], predpovedané, modelované a overované [36] - [43] rôznymi metódami. Medzi získanými (nameranými) a skutočnými hodnotami poveternostných podmienok je rozdiel a tento rozdiel nemožno ignorovať. Nameraná prevádzková teplota nemôže úplne predstavovať skutočné maximum prevádzkovej teploty pre diaľkové prenosové vedenia, ktoré vedú cez viac oblastí s rôznymi poveternostnými podmienkami, vzhľadom na obmedzené umiestnenie a množstvo meracích prístrojov na meranie prevádzkovej teploty [30]. Pretože poveternostné podmienky významne ovplyvňujú prevádzkovú teplotu, je potrebné počítať s neistotou týchto parametrov [44] - [48].

Vodiče sú najdôležitejšou súčasťou vonkajších prenosových vedení a najpoužívanejšie vodiče vedení sú vodiče ACSR - AlFe (hliníkové vodiče vystužené oceľou) [18] [19]. Prevádzková teplota vodiča závisí od poveternostných podmienok (teplota prostredia, rýchlosť a smer vetra, slnečné žiarenie), a najmä od hodnoty pretekajúceho elektrického prúdu. Dĺžka vodiča sa môže meniť podľa jeho prevádzkovej teploty, čo môže mať vplyv na priehyb a mechanické namáhanie vodiča [49]. V tejto súvislosti prešli metódy výskumu prevádzkovej teploty prenosových vedení významným vývojom. Tieto metódy musia správne súvisieť

so zmenami rôznych parametrov a premenných prenosového vedenia v čase. Výrobcovia uvádzajú maximálnu prevádzkovú teplotu vodičov ACSR v rozmedzí od 90 °C do 110 °C [18] [19]. Výskum poveternostných podmienok a výskum parametrov vodiča (prevádzková teplota, priehyb, vôľa, napätie, vibrácie), ako aj sledovanie parametrov vodiča opisuje niekoľko autorov [50] - [65]. Užitočný opis možno nájsť v článkoch [61] [62], ktoré sa týkajú identifikácie kritických rozptátí pre optimálne umiestnenie snímačov na meranie poveternostných podmienok a ďalších parametrov vodičov.

Prvá časť normy STN EN 50 341-1 [66]: Vonkajšie elektrické vedenia presahujúce napätie AC 45 kV určuje maximálnu prevádzkovú teplotu vodiča, pričom sa odporúča zvoliť teplotu nie menej ako 70 °C [18] [19]. Táto norma opisuje maximálny prípustný prúd podľa špecifikovanej maximálnej prevádzkovej teploty pre nasledujúce poveternostné podmienky: vysoká teplota prostredia (35 °C), vysoké slnečné žiarenie (1 000 W m⁻²), nízka rýchlosť vetra (0,5 m s⁻¹), uhol nábehu vetra (45 °), súčiniteľ absorpcie a emisivity (0,5) [67]. Na základe dlhodobých meraní poveternostných podmienok (teplota prostredia, rýchlosť a smer vetra, slnečné žiarenie) okolo prenosových vedení je zrejme, že po väčšinu roka tieto poveternostné podmienky nedosahujú hodnoty podľa tejto normy [18] [19].

Terminológia podľa ENTSO-E: Dynamické hodnotenie pre prenosové vonkajšie vedenie - V6 sa používa v prípade návrhu prevádzkovej teploty prenosového vedenia [68]. Navrhovaná prevádzková teplota prenosového vedenia je maximálna teplota, ktorú môže vodič v akomkoľvek rozptátí dosiahnuť bez obáv z porušenia bezpečnosti prevádzky. Je potrebné poznamenať, že navrhovaná prevádzková teplota môže byť nižšia ako maximálna prevádzková teplota, ktorú je možné dosiahnuť daným (lanovým) vodičom. Hlavný rozdiel medzi statickým a dynamickým hodnotením vedenia je ten, že „statický prúd“ sa počíta na základe skôr bežných atmosférických podmienok, zatiaľ čo dynamické hodnotenie vedenia zohľadňuje skutočné atmosférické podmienky, ktoré väčšinou ponúkajú lepšie chladenie a umožňujú tak vyšší „dynamický prúd“, a prispievajú k zlepšeniu bezpečnosti [99] - [109]. Cieľom dynamického hodnotenia vedenia je bezpečne využiť existujúcu prenosovú kapacitu prenosových vedení na základe reálnych podmienok, v ktorých fungujú elektrické vedenia [18] [19]. Existuje mnoho článkov [69] - [109], ktoré sa zaoberajú modelmi prevádzkovej teploty prenosového vedenia.

Výpočtom prevádzkovej teploty vonkajších prenosových vedení (alebo vodičov) sa zaoberá viacero priemyselných noriem. Najčastejšie používané metódy sú opísané v norme IEEE na výpočet vzťahu prúd - teplota holých vodičov [110] a v technickom návode CIGRE 207 [111]. Vylepšenou verziou štandardného technického návodu CIGRE 207 [111] je technický návod CIGRE 601 [112]. Niekoľko výskumných štúdií [41] [74] [98] [113] [114] [115] ilustruje porovnanie štandardov IEEE a CIGRE pre výpočet prevádzkovej teploty vonkajších prenosových vedení (alebo vodičov). Metóda výpočtu prevádzkovej teploty získaná za ideálnych prírodných

konvenčných podmienok nie je schopná presne a komplexne odrážať vplyv okolitého meteorologického prostredia na odozvu vodiča na prechodný nárast teploty [18] [19] [30].

Technický návod CIGRE 207 [111] opisuje pracovnú teplotu vodičov prenosového vedenia pri nízkych prúdových hustotách (menej ako 1,5 A mm⁻²) a nízkych teplotách (menej ako 100 °C). Technický návod CIGRE 601 [112] opisuje výpočet tepelného hodnotenia prenosových vedení, vrátane prenosových vedení prevádzkovaných pri vysokých prúdových hustotách a vysokých prevádzkových teplotách. Technický návod CIGRE 601 [112] opisuje zmeny poveternostných podmienok alebo zaťažovacieho prúdu v čase, to znamená s vyššími zaťažovacími prúdmi a vyššími prevádzkovými teplotami vodičov prenosového vedenia. Aj tieto metódy výpočtu prevádzkovej teploty zohľadňujú prechodný stav. Používajú sa tiež tieto návody: Technický návod CIGRE 498 - Sprievodca aplikáciou systémov priameho monitorovania v reálnom čase [116], Technický návod CIGRE 345 - Rezistencia striedavých prúdov (AC) špirálovo lankových vodičov [117], Technický návod CIGRE 324 - Metódy výpočtu Priehyb - Mechanické napätie (Sag - Tension) pre vonkajšie vedenie [118], Technický návod CIGRE 299 - Sprievodca výberom parametrov počasia pre hodnotenie holých nadzemných vodičov [119] a Technický návod CIGRE 244 - Vodiče pre zvýšenie napätia vonkajšieho vedenia [120]. Technický návod CIGRE 601 [112] zohľadňuje ustálený stav (parametre vodiča a poveternostné podmienky sú v priebehu času relatívne konštantné).

Technický návod CIGRE 207 [111] ani Technický návod CIGRE 601 [112] neopisujú výpočet prevádzkovej teploty so zohľadnením korónových výbojov. V nasledujúcej časti je navrhnutá výpočtová metóda prevádzkovej teploty vodiča vonkajšieho prenosového vedenia so zohľadnením strát vplyvom koróny. Výhodou tejto navrhovanej metódy je zlepšenie presnosti výpočtu prevádzkovej teploty vodiča v reálnych podmienkach.

II. METÓDY PRE VÝPOČET PREVÁDZKOVEJ TEPLoty

Prvá metóda počíta prevádzkovú teplotu ϑ_p pomocou diferenciálnej rovnice [10] [11] pre neustálu rovnováhu tepelnej energie (metóda diferenciálnej rovnice). Pre stanovenie výslednej rezistencie R_0 má vplyv materiál vodiča a jeho čistota, krútenie vodiča (lana), odchýlka od skutočného prierezu pozdĺž vodiča (lana) a skinefekt. Pre rezistenciu vodiča R_0 pri základnej teplote ϑ_0 rovnica je definovaná ako

$$R_0 = \rho_R \frac{l}{S} \quad (1)$$

kde ρ_R je rezistivita vodiča pri základnej teplote ϑ_0 . Závislosť rezistencie vodiča R_ϑ od zmeny teploty $\Delta\vartheta_0$ definujeme rovnicou ako

$$R_\vartheta = R_0 (1 + \alpha_R \Delta\vartheta_0) \quad (2)$$

kde α_R je teplotný súčiniteľ rezistencie, $\Delta\vartheta_0$ je rozdiel od základnej (referenčnej) teploty. Pre vodivosť vplyvom koróny G_c môžeme definovať rovnicu

$$G_c = \gamma_c \frac{S_p}{l_i} = \gamma_c \frac{o l}{l_i} \quad (3)$$

kde γ_c je konduktivita vplyvom koróny a l_i je ionizačná vzdialenosť od vodiča (vzdialenosť, do ktorej sa vyskytujú ionizačné výboje vplyvom koróny) [15]. Pre hmotnosť vodiča m platí vzťah

$$m = \rho_m V = \rho_m S l \quad (4)$$

kde V je objem vodiča, S je prierez vodiča, ρ_m je hustota materiálu vodiča a l dĺžka vodiča. Pre povrch vodiča S_p môžeme napísať rovnicu

$$S_p = o l \quad (5)$$

Pre obvod o kruhového vodiča môžeme definovať rovnicu

$$o = 2 \pi r \quad (6)$$

kde r je polomer vodiča. Ak prúd I preteká vodičom v čase dt , produkuje Joulovo teplo dQ' . Straty v izolovaných vodičoch alebo straty vo vzduchu v vplyvom korónových výbojov u holých vodičov produkujú teplo dQ'' . Časť tepla spotrebovaného na ohrev vodiča je označená ako dQ_1 a časť tepla odovzdaného do prostredia je označená ako dQ_2 . Keď prúd I preteká vodičom s rezistenciou R_ϑ , potom je teplo dQ' vyvinuté v čase dt definované nasledujúcou rovnicou

$$dQ = R_\vartheta I^2 dt = R_0 I^2 (1 + \alpha_R \Delta\vartheta_0) dt = \frac{\rho_R l I^2}{S} (1 + \alpha_R \Delta\vartheta_0) dt \quad (7)$$

$$dQ' = \frac{\rho_R l I^2}{S} (1 + \alpha_R (\Delta\vartheta + \Delta\vartheta_w)) dt \quad (8)$$

kde Q' je produkované Joulovo teplo, R_ϑ je rezistencia vodiča pre striedavý prúd (vrátane skinefektu) pri prevádzkovej teplote, R_0 je rezistencia vodiča pre striedavý prúd (vrátane skinefektu) pri základnej (referenčnej) teplote, I je prúd, t je čas, $\Delta\vartheta_0$ je rozdiel od základnej (referenčnej) teploty, α_R je teplotný súčiniteľ rezistencie, $\Delta\vartheta$ je prevádzkový rozdiel teploty vodiča a $\Delta\vartheta_w$ je počiatočný rozdiel teploty vodiča. Teplo generované stratami vo vzduchu vplyvom pôsobenia korónových výbojov u holých vodičov dQ'' je vyjadrené nasledujúcou rovnicou.

$$dQ'' = G_c U_{vz}^2 dt = \gamma_c \frac{S_p}{l_i} U_{vz}^2 dt = \gamma_c \frac{o l}{l_i} U_{vz}^2 dt \quad (9)$$

kde Q'' je teplo generované stratami vo vzduchu vplyvom pôsobenia korónových výbojov u holých vodičov, G_c je vodivosť vplyvom koróny a U_{vz} je napätie medzi vodičom a zemou. Časť tepla dQ_1 je spotrebovaná na ohrev vodiča so zmenou teploty $d(\Delta\vartheta)$.

$$dQ_1 = m c d(\Delta\vartheta) = V \rho_m c d(\Delta\vartheta) = S l \rho_m c d(\Delta\vartheta) = S l c_v d(\Delta\vartheta) \quad (10)$$

Časť tepla dQ_2 je odvedená do okolia v čase dt .

$$dQ_2 = h_E S_p \Delta\vartheta dt = h_E o l \Delta\vartheta dt \quad (11)$$

Pre objemovú mernú tepelnú kapacitu c_v rovnica je definovaná ako

$$c_v = c \rho_m \quad (12)$$

kde Q_1 je teplo spotrebované na ohrev vodiča, Q_2 je teplo prenášané do prostredia, m je hmotnosť, c je merná tepelná kapacita materiálu vodiča, V je objem vodiča, ρ_m je hustota materiálu vodiča, S predstavuje prierez vodiča, h_E je celkový koeficient prestupu tepla pre vonkajšiu plochu vodiča, S_p je vonkajšia plocha vodiča, o je kruhový obvod vodiča, l je dĺžka vodiča a c_v je objemová merná tepelná kapacita materiálu vodiča. Rovnováha energií pomocou diferenciálnej rovnice je definovaná

$$dQ' + dQ'' = dQ_1 + dQ_2 \quad (13)$$

Po prepísaní rovnice 13 a dosadení rovnic 7 až 11 dostaneme diferenciálnu rovnicu

$$\frac{\rho_R I^2}{S} (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_0) dt + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 dt = S \rho_m c l d(\Delta \vartheta) + h_E o l \Delta \vartheta dt \quad (14)$$

$$\frac{\rho_R I^2}{S} (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_0) dt + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 dt = S \rho_m c d(\Delta \vartheta) + h_E o \Delta \vartheta dt \quad (15)$$

$$\frac{\rho_R I^2}{S} (1 + \alpha_R (\Delta \vartheta + \Delta \vartheta_W)) dt + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 dt = S \rho_m c d(\Delta \vartheta) + h_E o \Delta \vartheta dt \quad (16)$$

$$\left(\frac{\rho_R I^2}{S} (1 + \alpha_R \Delta \vartheta + \alpha_R \Delta \vartheta_W) - h_E o \Delta \vartheta + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 \right) dt = S \rho_m c d(\Delta \vartheta) \quad (17)$$

$$\left(\frac{\rho_R I^2}{S} + \frac{\rho_R I^2 \alpha_R \Delta \vartheta_W}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 + \frac{\rho_R I^2 \alpha_R \Delta \vartheta}{S} - h_E o \Delta \vartheta \right) dt = S \rho_m c d(\Delta \vartheta) \quad (18)$$

$$\left(\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 + \Delta \vartheta \left(\frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S} - h_E o \right) \right) dt = S \rho_m c d(\Delta \vartheta) \quad (19)$$

$$\left(\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 - \Delta \vartheta \left(h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S} \right) \right) dt = S \rho_m c d(\Delta \vartheta) \quad (20)$$

$$dt = \frac{S \rho_m c d(\Delta \vartheta)}{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 - \Delta \vartheta \left(h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S} \right)} \quad (21)$$

$$dt = \frac{S \rho_m c d(\Delta \vartheta)}{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 - \Delta \vartheta \left(h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S} \right)} \quad (22)$$

$$dt = \frac{S \rho_m c d(\Delta \vartheta)}{\lambda o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}$$

$$dt = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} - \Delta \vartheta$$

Pre diferenciálnu rovnicu 22 môžu byť použité nasledovné substitúcie

$$A = S \rho_m c \quad (23)$$

$$B = \frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2 \quad (24)$$

$$D = h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S} \quad (25)$$

$$\frac{A}{D} = \frac{S \rho_m c}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} \quad (26)$$

$$\frac{B}{D} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} \quad (27)$$

$$\frac{B}{D} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} \quad (27)$$

potom dostaneme nasledujúcu diferenciálnu rovnicu:

$$dt = \frac{\frac{A}{D} d(\Delta \vartheta)}{\frac{B}{D} - \Delta \vartheta} \quad (28)$$

A po ďalšej substitúcii dostaneme diferenciálnu rovnicu v tvare

$$Z = \frac{B}{D} - \Delta \vartheta \quad (29)$$

$$dZ = -d(\Delta \vartheta) \quad (30)$$

$$Diferenciálna rovnicu po nahradení substitúciou$$

$$dt = \frac{-\frac{A}{D} dZ}{Z} \quad (31)$$

Pomocou substitúcie môžeme riešiť integrál.

$$t = \int_0^t dt = -\frac{A}{D} \int_{\Delta \vartheta_E}^{\Delta \vartheta_P} \frac{dZ}{Z} = -\frac{A}{D} [\ln Z]_{\Delta \vartheta_E}^{\Delta \vartheta_P} = -\frac{A}{D} \left[\ln \left(\frac{B}{D} - \Delta \vartheta \right) \right]_{\Delta \vartheta_E}^{\Delta \vartheta_P} = \quad (32)$$

$$= -\frac{A}{D} \left(\ln \left(\frac{B}{D} - \Delta \vartheta_P \right) - \ln \left(\frac{B}{D} - \Delta \vartheta_E \right) \right) = -\frac{A}{D} \ln \left(\frac{\frac{B}{D} - \Delta \vartheta_P}{\frac{B}{D} - \Delta \vartheta_E} \right) =$$

$$= -\frac{A}{D} \ln \left(\frac{\left(\frac{B-D \Delta \vartheta_P}{D} \right)}{\left(\frac{B-D \Delta \vartheta_E}{D} \right)} \right) = -\frac{A}{D} \ln \left(\frac{B-D \Delta \vartheta_P}{B-D \Delta \vartheta_E} \right) \quad (33)$$

$$t = -\frac{A}{D} \ln \left(\frac{B-D \Delta \vartheta_P}{B-D \Delta \vartheta_E} \right) \quad (33)$$

Vzostup prevádzkovej teploty vodiča $\Delta \vartheta_P$ je rozdiel medzi prevádzkovou teplotou vodiča ϑ_P a teplotou okolia ϑ_E .

$$\Delta \vartheta_P = \vartheta_P - \vartheta_E \quad (34)$$

Počiatkový vzostup teploty vodiča $\Delta \vartheta_E$ je rozdiel medzi počiatkovou teplotou vodiča ϑ_W a teplotou okolia ϑ_E

$$\Delta \vartheta_E = \vartheta_W - \vartheta_E \quad (35)$$

Počiatkový rozdiel teploty vodiča $\Delta \vartheta_W$ je rozdiel medzi počiatkovou teplotou vodiča ϑ_W a základnou (referenčnou) teplotou ϑ_0 . Základnú (referenčnú) teplotu ϑ_0 môžeme nájsť vo fyzikálnych tabuľkách.

$$\Delta \vartheta_W = \vartheta_W - \vartheta_0 \quad (36)$$

Prevádzkový rozdiel teploty vodiča $\Delta \vartheta$ je rozdiel medzi prevádzkovou teplotou vodiča ϑ_P a počiatkovou teplotou vodiča ϑ_W .

$$\Delta \vartheta = \vartheta_P - \vartheta_W \quad (37)$$

V predchádzajúcich rovniciach $\Delta \vartheta_P$ je zvýšenie teploty vodiča, ϑ_P je prevádzková teplota, ϑ_E je teplota prostredia, $\Delta \vartheta_E$ je počiatkové zvýšenie teploty vodiča, ϑ_W je počiatková teplota vodiča, $\Delta \vartheta_W$ je počiatkový rozdiel teploty vodiča, ϑ_0 je základná (referenčná) teplota a $\Delta \vartheta$ je prevádzkový rozdiel teploty vodiča. V ďalšom kroku prepíšeme rovnicu do tejto formy.

$$t \left(-\frac{D}{A} \right) = \ln \left(\frac{B-D \Delta \vartheta_P}{B-D \Delta \vartheta_E} \right) \quad (38)$$

Logaritmus môže byť prepísaný do exponenciálnej formy.

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{B-D \Delta \vartheta_P}{B-D \Delta \vartheta_E} \quad (39)$$

V ďalších krokoch prepíšeme rovnicu do tejto formy.

$$e^{-\frac{t}{\tau}} (B-D \Delta \vartheta_E) = B-D \Delta \vartheta_P \quad (40)$$

$$e^{-\frac{t}{\tau}} (B-D \Delta \vartheta_E) - B = -D \Delta \vartheta_P \quad (41)$$

$$B e^{-\frac{t}{\tau}} - D \Delta \vartheta_E e^{-\frac{t}{\tau}} - B = -D \Delta \vartheta_P \quad (42)$$

$$D \Delta \vartheta_P = B - B e^{-\frac{t}{\tau}} + D \Delta \vartheta_E e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (43)$$

$$\Delta \vartheta_P = \frac{B}{D} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta \vartheta_E e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (44)$$

$$\Delta \vartheta_P = \frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W) + \gamma_c \frac{\rho}{l_i} U_{vc}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta \vartheta_E e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (45)$$

Počiatková otepľovacia konštanta τ je definovaná rovnicou.

$$\tau = \frac{A}{D} = \frac{S \rho_m c}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} \quad (46)$$

Takže môžeme rovnicu prepísať ako

$$\Delta \vartheta_p = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 - e^{-\frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}} \right) - \frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} + \Delta \vartheta_E e^{-\frac{t}{S c_p c}} \quad (47)$$

Pri poklese teploty sa znižuje rezistencia vodivých materiálov. Pre supravodivé podmienky rezistencia vodiča je definovaná ako $R_\vartheta = 0 \Omega$ [12]. Pre fiktívnu a supravodivú teplotu platí $-\vartheta_S = \vartheta_f$ a pre tento predpoklad teplotný súčiniteľ rezistencie α_R je definovaný rovnicami.

$$R_\vartheta = R_0 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_S) \quad (48)$$

$$R_0 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_S) = 0 \quad (49)$$

$$1 + \alpha_R \Delta \vartheta_S = 0 \quad (50)$$

$$1 + \alpha_R (\vartheta_S - \vartheta_0) = 0 \quad (51)$$

$$\vartheta_S = -\vartheta_f \quad (52)$$

$$1 + \alpha_R (-\vartheta_f - \vartheta_0) = 0 \quad (53)$$

$$1 - \alpha_R (\vartheta_f + \vartheta_0) = 0 \quad (54)$$

$$1 = \alpha_R (\vartheta_f + \vartheta_0) \quad (55)$$

Teplotný súčiniteľ rezistencie α_R je definovaný rovnicou v tejto forme.

$$\alpha_R = \frac{1}{\vartheta_f + \vartheta_0} \quad (56)$$

Pre konštanty substitúcie A, B, D a otepľovaciu konštantu τ rovnice sú definované ako

$$A = S \rho_m c = S c_f \quad (57)$$

$$B = \frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 = \frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R (\vartheta_W - \vartheta_0))}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \quad (58)$$

$$D = h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S} = h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)} \quad (59)$$

$$\tau = \frac{A}{D} = \frac{S \rho_m c}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} = \frac{S \rho_m c}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} = \frac{S c_f}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} \quad (60)$$

$$\frac{B}{D} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R (\vartheta_W - \vartheta_0))}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} = \frac{\frac{\rho_R I^2}{S} \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} \quad (61)$$

$$\frac{B}{D} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R (\vartheta_W - \vartheta_0))}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} = \frac{\frac{\rho_R I^2}{S} \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} \quad (61)$$

$$\frac{B}{D} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R (\vartheta_W - \vartheta_0))}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} = \frac{\frac{\rho_R I^2}{S} \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right) + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} \quad (61)$$

Výsledná rovnica je v tejto forme.

$$\Delta \vartheta_p = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 - e^{-\frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}} \right) - \frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} + \Delta \vartheta_E e^{-\frac{t}{S c_p c}} \quad (62)$$

$$\vartheta_p - \vartheta_E = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 - e^{-\frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}} \right) - \frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} + (\vartheta_W - \vartheta_E) e^{-\frac{t}{S c_p c}} \quad (63)$$

$$\vartheta_p = \frac{\frac{\rho_R I^2 (1 + \alpha_R \Delta \vartheta_W)}{S} + \gamma_c \frac{o}{l_i} U_{vz}^2 \left(1 - e^{-\frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}} \right) - \frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2 \alpha_R}{S}} + (\vartheta_W - \vartheta_E) e^{-\frac{t}{S c_p c}} \quad (64)$$

Ak uvažujeme, že konduktivita vplyvom koróny γ_c je rovná 0 $S \text{ m}^{-1}$, rovnicu potom môžeme definovať ako

$$\vartheta_p = \frac{\frac{\rho_R I^2}{S} \left(1 + \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{\vartheta_f + \vartheta_0} \right)}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}} \left(1 - e^{-\frac{\frac{t}{S c_p c}}{h_E o - \frac{\rho_R I^2}{S (\vartheta_f + \vartheta_0)}}} \right) + (\vartheta_W - \vartheta_E) e^{-\frac{t}{S c_p c}} + \vartheta_E \quad (65)$$

Táto rovnica ukazuje vplyv teplotného súčiniteľa rezistencie α_R na prevádzkovú teplotu ϑ_p v závislosti od rôznej počiatkovej teploty vodiča ϑ_W a teploty okolia ϑ_E pri zaťažení prúdom I v čase t .

Druhú metódu sme uvažovali metódu CIGRE, ktorá je popísaná v Technickom návode CIGRE 601 [112] a Technickom návode CIGRE 207 [111]. Táto metóda definuje tepelné podmienky vodiča ako ustálený stav. Všeobecnú tepelnú rovnicu pre homogénnu a izotropnú pevnú látku možno vyjadriť v polárnych súradniciach r, ϕ a z vo forme

$$\frac{\partial \vartheta_p}{\partial t} = \frac{\lambda_W}{\rho_m c} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vartheta_p}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_p}{\partial z^2} \right) + \frac{q(\vartheta_p, \vartheta, z, r, t)}{\rho_m c} \quad (66)$$

Pre druhú metódu rezistencia R_ϑ je vypočítaná pri priemernej teplote ϑ_{AV}

$$R_\vartheta = R_0 (1 + \alpha_R (\vartheta_{AV} - \vartheta_0)) \quad (67)$$

Pre druhú metódu sa merná tepelná kapacita materiálu vodiča c výrazne líši a dá sa predpokladať, že lineárne stúpa s teplotou. Merná tepelná kapacita materiálu vodiča c je vypočítaná pri priemernej teplote ϑ_{AV} pomocou súčiniteľa mnernej tepelnej kapacity β

$$c = c_0 (1 + \beta (\vartheta_{AV} - \vartheta_0)) \quad (68)$$

kde r je polomer, ϕ je uhol v polárnych súradniciach, z je rozmer vodiča v polárnych súradniciach, λ_W je tepelná vodivosť, ϑ_{AV} je priemerná teplota a β je súčiniteľ mnernej tepelnej kapacity. Ustálený stav je situácia, keď je teplo dodávané do vodiča vyvážené stratou tepla.

$$S l c \rho_m \frac{d \vartheta_p}{dt} = P_J + P_M + P_S + P_c + P_r \quad (69)$$

kde P_J je Joulov tepelný zisk, P_M je magnetický tepelný zisk, P_S je solárny tepelný zisk, P_c je konvenčná tepelná strata a P_r radiačná tepelná strata. Solárny tepelný zisk P_S závisí v zásade od slnečného žiarenia S_T , nech je akýkoľvek prúd I a prevádzková teplota ϑ_p . Tepelné straty konvekciou P_c sa menia s povrchovou teplotou ϑ_{sur} , teplotou prostredia ϑ_E a v nútenej konvekcii s rýchlosťou a smerom vetra. Inými slovami, zmeny prevádzkovej teploty ϑ_p vodiča sú vyvolané zmenami prúdu I vo vodiči a zmenami poveternostných podmienok: rýchlosť vetra v , uhol nábehu vetra δ , teplota prostredia ϑ_E a slnečné žiarenie S_T . Straty žiarenia P_r sú veľmi nelineárne s povrchovou teplotou ϑ_{sur} a závisia od teploty prostredia ϑ_E . Teplota vzduchu v kontakte s povrchom vodiča (nazvaná aj teplota filmu) ϑ_{film} je definovaná touto rovnicou

$$\vartheta_{film} = \frac{\vartheta_{sur} + \vartheta_E}{2} \quad (70)$$

Priemerná teplota vodiča ϑ_{AV} je definovaná touto rovnicou

$$\vartheta_{AV} = \frac{\vartheta_{core} + \vartheta_{sur}}{2} \quad (71)$$

kde ϑ_{sur} je priemerná teplota povrchu vodiča, ϑ_{core} je teplota jadra vodiča. Tepelnú diferenciálnu rovnicu je možné vyriešiť tak, že urobíme malé prírastky nárastu teploty vodiča $d\vartheta_p$ a

vypočítame každú zložku: vstup výkonu, straty výkonu a tepelnú kapacitu pre stredný nárast teploty.

$$dt_i = \frac{S l \rho_m c (\vartheta_{pi}) d \vartheta_p}{P_J (\vartheta_{pi}) + P_M (\vartheta_{pi}) + P_S (\vartheta_{pi}) + P_c (\vartheta_{pi}) + P_r (\vartheta_{pi})} \quad (72)$$

Pre druhú metódu je možné použiť predchádzajúce rovnice z prvej metódy pre zvýšenie teploty vodiča $\Delta\vartheta_p$ a počiatočné zvýšenie teploty vodiča $\Delta\vartheta_E$. Asymptotické zvýšenie teploty vodiča $\Delta\vartheta_m$ je rozdielom medzi asymptotickou hodnotou teploty ϑ_m a teplotou prostredia ϑ_E .

$$\Delta\vartheta_m = \vartheta_m - \vartheta_E \quad (73)$$

kde $\Delta\vartheta_m$ je asymptotické zvýšenie teploty vodiča a ϑ_m je asymptotická hodnota teploty. Tepelnú bilanciu je možné vyriešiť numerickou integráciou, ale s určitou mierou aproximácie je možné získať uzavretú formu riešenia. Najmä ak možno teplo žiarením linearizovať alebo sú straty malé v porovnaní s tepelnými stratami vplyvom núteného prúdenia a solárne a magnetické tepelné zisky sa považujú za konštantné, je možné riešenie diferenciálnej rovnice upraviť nasledujúcim spôsobom

$$t = \frac{-S l c \rho_m (\Delta\vartheta_m - \Delta\vartheta_E)}{p_r} \left(\beta (\Delta\vartheta_p - \Delta\vartheta_E) + (1 + \beta \Delta\vartheta_m) \left(\ln \left(\frac{\Delta\vartheta_m - \Delta\vartheta_E}{\Delta\vartheta_m - \Delta\vartheta_E} \right) \right) \right) \quad (74)$$

kde p_r je rozdiel v tepelnom zisku na jednotku dĺžky vodiča pri skokovej zmene prúdu I. Pre prvú a druhú metódu je potrebné vypočítať súčiniteľ prestupu tepla h_c a celkový súčiniteľ prestupu tepla pre vonkajší povrch vodičov h_E . Podľa technického návodu CIGRE 601 [112] a technického návodu CIGRE 207 [111] možno rovnicu napísať pre tepelné straty vzniknuté prúdením p_c na jednotku dĺžky vodiča

$$p_c = \pi \lambda_f (\vartheta_{sur} - \vartheta_E) (f_x N_{u,nat} + p_x N_{u,for} k_{air}) \quad (75)$$

kde ϑ_{sur} je priemerná teplota povrchu vodiča, $N_{u,nat}$ je Nusseltovo číslo prirodzeného prenosu tepla prúdením (bezrozmerné) a $N_{u,for}$ je Nusseltovo číslo núteného prenosu tepla prúdením (bezrozmerné). $N_{u,nat}$ a $N_{u,for}$ sú rôzne, keď prúd vzduchu prúdi cez rôzne časti povrchu vodiča, k_{air} je konštanta pre tepelnú vodivosť vzduchu a musí byť korigovaná konštantou f_x a konštantnou p_x . V tejto rovnici sa používa rozdiel medzi teplotou povrchu ϑ_{sur} a teplotou prostredia ϑ_E [30] [111] [121]. V ďalšom kroku možno rovnicu napísať pre koeficient prenosu tepla prúdením h_c

$$h_c = \frac{p_c}{\pi d (\vartheta_{sur} - \vartheta_E)} = \lambda_f \frac{\pi (\vartheta_{sur} - \vartheta_E) (f_x N_{u,nat} + p_x N_{u,for} k_{air})}{\pi d (\vartheta_{sur} - \vartheta_E)} = \lambda_f \frac{f_x N_{u,nat} + p_x N_{u,for} k_{air}}{d} \quad (76)$$

kde h_c je koeficient prenosu tepla prúdením, d je vonkajší priemer vodiča a λ_f je tepelná vodivosť vzduchu. Podľa zákona Stefana – Boltzmannova súvisia tepelné straty žiarením p_r povrchu vodiča s teplotným rozdielom medzi povrchom vodiča ϑ_{sur} a okolitým prostredím ϑ_E

$$p_r = \pi d \sigma_B \varepsilon_S \left((\vartheta_{sur} + 273)^4 - (\vartheta_E + 273)^4 \right) \quad (77)$$

kde p_r sú tepelné straty žiarením, ε_S je súčiniteľ emisivity povrchu vodiča a σ_B je Stefan-Boltzmannova konštanta, $\sigma_B = 5,6977 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Pre slnečný tepelný zisk p_s na jednotku dĺžky vodiča možno definovať pomocou nasledujúcej rovnice

$$p_s = \alpha_S S_T d \quad (78)$$

kde p_s je slnečný tepelný zisk, α_S je súčiniteľ absorpcie povrchu vodiča a S_T je intenzita slnečného žiarenia. Pre

diferenciálnu rovnicu je potrebné vypočítať koeficient prenosu tepla do prostredia h_E . Potom je možné napísať rovnicu pre prenos tepelných strát do prostredia p_E a táto rovnica je definovaná pomocou tepelných strát prúdením p_c , tepelných strát žiarením p_r a slnečného tepelného zisku p_s [111]. Hodnoty p_E , p_c , p_r , p_s sa počítajú na jednotku dĺžky vodiča.

$$p_E = p_c + p_r - p_s \quad (79)$$

kde p_E je prenos tepelných strát do prostredia. Pre celkový koeficient prestupu tepla pre vonkajší povrch vodičov h_E možno rovnicu napísať pomocou hodnoty prenosu tepelných strát do prostredia p_E .

$$h_E = \frac{p_E}{\pi d (\vartheta_{sur} - \vartheta_E)} = \frac{p_c + p_r - p_s}{\pi d (\vartheta_{sur} - \vartheta_E)} = h_c + \frac{p_r - p_s}{\pi d (\vartheta_{sur} - \vartheta_E)} \quad (80)$$

III. POROVNANIE PREVÁDZKOVEJ TEPLoty VYPOČÍTANEJ POMOCOU DIFERENCIÁLNEJ ROVNICE S CIGRE METÓDOU

Existujú podobné štúdie [82] [100] [114] porovnávajúce prevádzkovú teplotu vypočítanú podľa Technického návodu CIGRE 601 alebo podľa štandardu IEEE s nameranou prevádzkovou teplotou vodičov v laboratórnych podmienkach. Pre nasledujúci výpočet zisťujeme vlastnosti vodiča ACSR 758-AL1/43-ST1A a vodiča ACSR 143-AL1/25-ST1A [122] [123] [124] a tieto potrebné technické vlastnosti uvádza nasledujúca tabuľka.

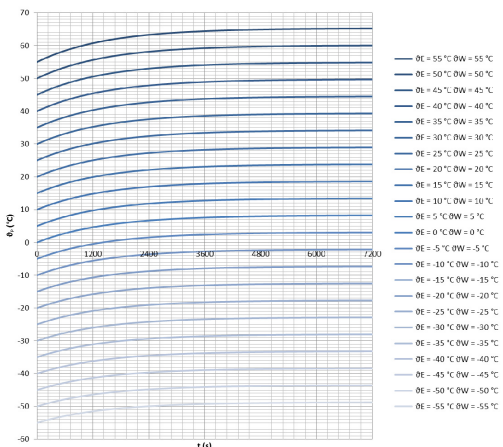
TABUĽKA 1 Vlastnosti vodiča ACSR 758-AL1/43-ST1A a vodiča ACSR 143-AL1/25-ST1A

Typ vodiča ACSR	758-AL1/43-ST1A AlFe 750/43	143-AL1/25-ST1A AlFe 150/22
Priemer oceľového vodiča (mm)	8,4	6,36
Celkový priemer vodiča (mm)	36,5	16,96
Priemer drôtu vnútornej vrstvy (mm)	4	2,12
Priemer drôtu vonkajšej vrstvy (mm)	2,9 a 4,12	2,65
Rezistencia pri základnej (referenčnej) teplote (Ω/km)	0,0384	0,202
Zakladná (referenčná) teplota ($^\circ\text{C}$)	20	20
Vodivosť korónou (S/km)	$5 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^7$
Tepelný súčiniteľ zmeny rezistancie ($^\circ\text{C}^{-1}$)	$4,04 \cdot 10^{-3}$	$4,04 \cdot 10^{-3}$
Koeficient absorpcie (-)	0,35	0,35
Koeficient emisivity (-)	0,5	0,5

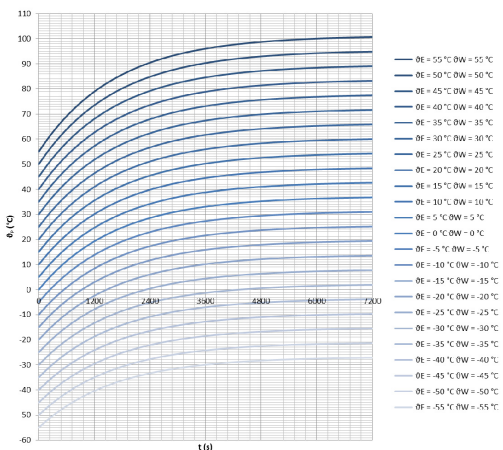
Pre porovnanie prevádzkovej teploty ϑ_p boli vybrané výpočty pomocou prvej metódy [10] [11] a druhej metódy [112] popísaných v predchádzajúcej časti. Výpočty prevádzkovej teploty ϑ_p boli vykonané pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A a vodič ACSR 143-AL1 / 25-ST1A. Nebol to nový vodič, ale skôr vodič s miernym znečistením. Pre tento vodič bola zvolená hodnota súčiniteľa absorpcie 0,35 a hodnota súčiniteľa emisivity 0,5. Tieto koeficienty zodpovedajú približne teoretickým predpokladom opísaným v Technickom návode CIGRE 601 [112] a hodnoty týchto koeficientov sa pohybujú od 0,2 pre nové vodiče do 0,9 pre znečistené vodiče v priemyselnom prostredí [28]. Použité napätie medzi fázou a zemou U_{vz} bolo rovné 63508,53 V a použité napätie medzi fázami U_z bolo rovné 110000 V.

Výpočty prvou metódou sú vypočítané pre dva prípady s vodivosťou alebo bez vodivosti vplyvom koróny G_c . Na týchto grafoch vidíme vypočítanú prevádzkovú teplotu ϑ_p v závislosti od času t . Prezentované výsledky prevádzkovej teploty ϑ_p sa porovnávajú s druhou metódou (metóda CIGRE).

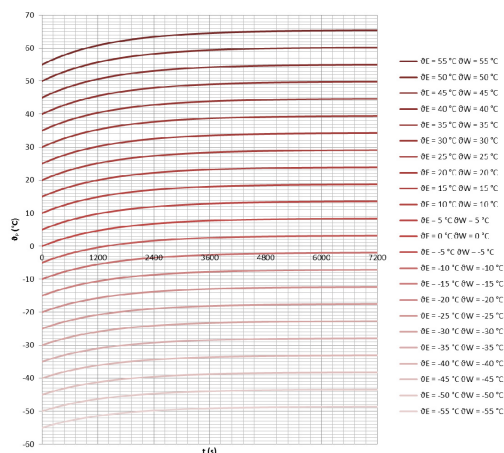
Nasledujúce grafy sú zostavené pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A pre dve rôzne hodnoty prúdu I. Grafy zodpovedajú prúdu I v hodnotách 570 A a 1140 A. Pre čas t bol použitý rozsah od 0 s do 7200 s. Akonáhle čas t dosiahne 7200 s, za ďalších 180 s sa prevádzková teplota ϑ_P zvýši o menej ako 0,013 °C pre prúd I rovný 570 A a o menej ako 0,085 °C pre prúd I rovný 1140 A. Počiatočná teplota vodiča ϑ_W sa rovná teplote prostredia ϑ_E . Nasledujúce obrázky 1 až 6 znázorňujú prevádzkovú teplotu ϑ_P pri rýchlosti vetra 0,2 m s⁻¹ so 45 ° uhlom nábehu, s intenzitou slnečného žiarenia 770 W m⁻² a s nadmorskou výškou 216 m.



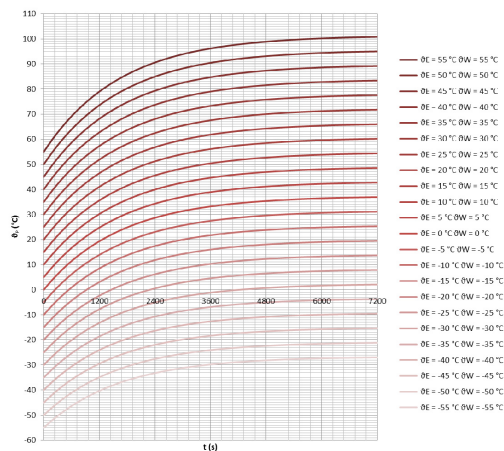
Obr. 1 Vypočítaná prevádzková teplota ϑ_P podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c pre prúd I = 570 A



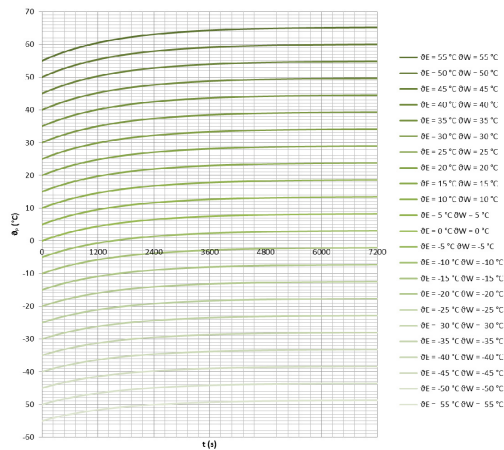
Obr. 2 Vypočítaná prevádzková teplota ϑ_P podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c pre prúd I = 1140 A



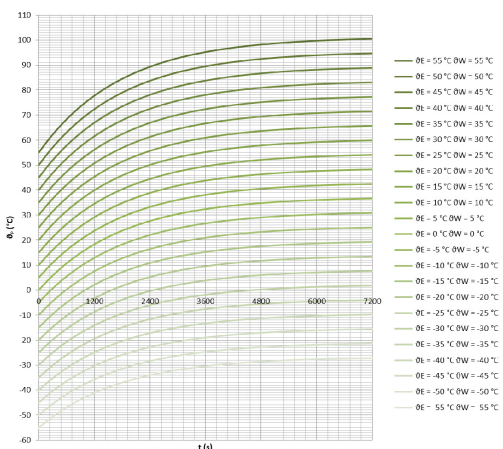
Obr. 3 Vypočítaná prevádzková teplota ϑ_P podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c pre prúd I = 570 A



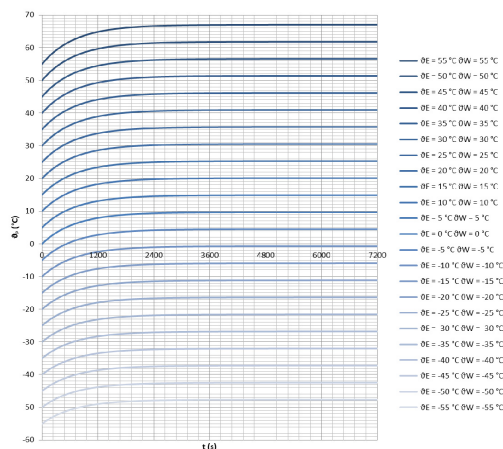
Obr. 4 Vypočítaná prevádzková teplota ϑ_P podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c pre prúd I = 1140 A



Obr. 5 Vypočítaná prevádzková teplota ϑ_P podľa druhej metódy pre prúd I = 570 A



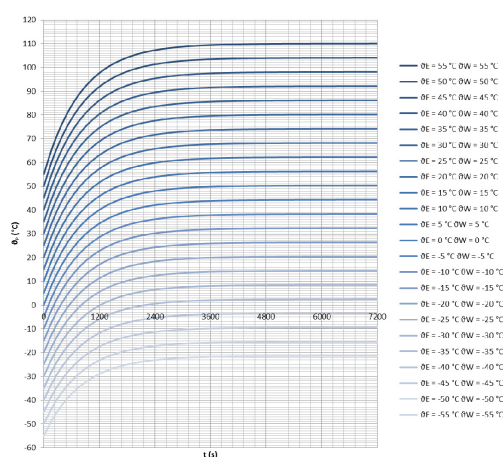
Obr. 6 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa druhej metódy pre prúd I = 1140 A



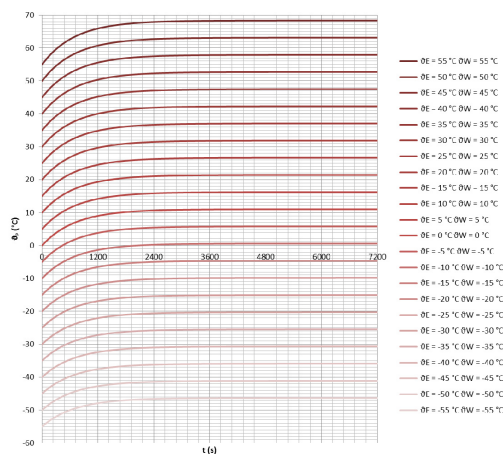
Obr. 7 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c pre prúd I = 197,8 A

Môžeme tieto metódy porovnať pre teplotu prostredia θ_E rovnú 25 °C a počiatočnú teplotu vodiča θ_W rovnú 25 °C. Pre prúd I sa rovná 1140 A prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 65,812 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 65,974 °C a podľa druhej metódy sa rovná 65,668 °C. Pre prúd I sa rovná 570 A, prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 34,136 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 34,28 °C a podľa druhej metódy sa rovná 34,144 °C.

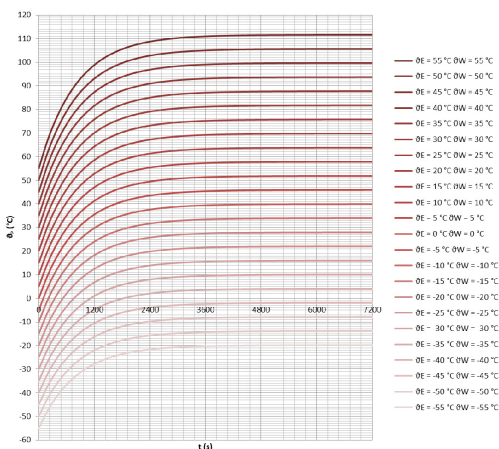
Nasledujúce grafy sú zostavené pre vodič ACSR 143-AL1 / 25-ST1A pre dve rôzne hodnoty prúdu I. Grafy zodpovedajú prúdu I v hodnotách 197,8 A a 395,6 A. Pre čas t bol použitý rozsah od 0 s do 7200 s. Akonáhle čas t dosiahne 7200 s, za ďalších 180 s sa prevádzková teplota θ_p zvýši o menej ako 0,00024 °C pre prúd I rovný 197,8 A a o menej ako 0,0032 °C pre prúd I rovný 395,6 A. Počiatočná teplota vodiča θ_W sa rovná teplote prostredia θ_E . Nasledujúce obrázky 7 až 12 znázorňujú prevádzkovú teplotu θ_p pri rýchlosti vetra 0,2 m s⁻¹ so 45 ° uhlom nábehu, s intenzitou slnečného žiarenia 770 W m⁻² a s nadmorskou výškou 216 m.



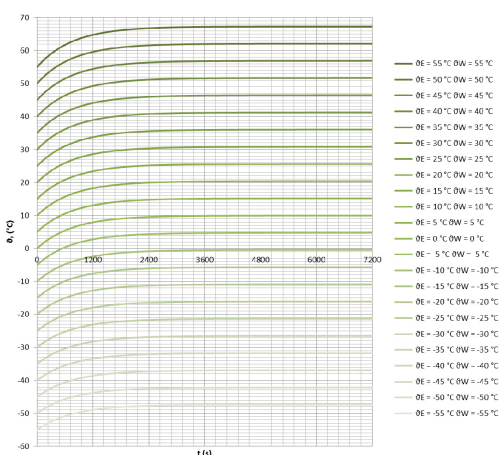
Obr. 8 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c pre prúd I = 395,6 A



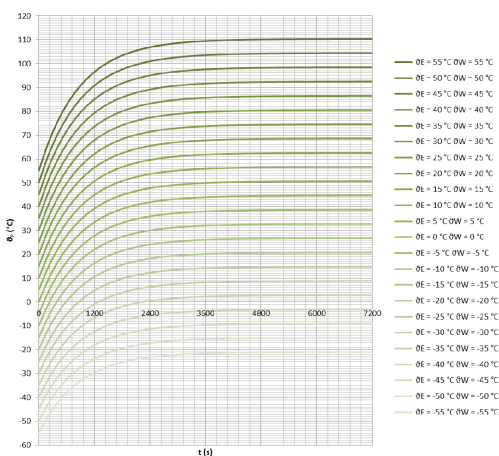
Obr. 9 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c pre prúd I = 197,8 A



Obr. 10 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c pre prúd $I = 395,6$ A



Obr. 11 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa druhej metódy pre prúd $I = 197,8$ A



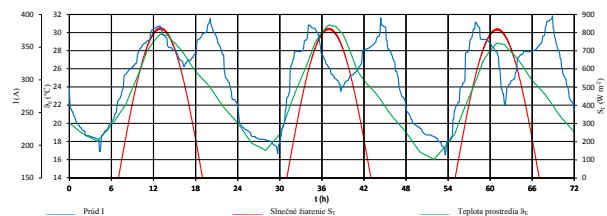
Obr. 12 Vypočítaná prevádzková teplota θ_p podľa druhej metódy pre prúd $I = 395,6$ A

Môžeme tieto metódy porovnať pre teplotu prostredia θ_E rovnú 25 °C a počiatočnú teplotu vodiča θ_W rovnú 25 °C. Pre

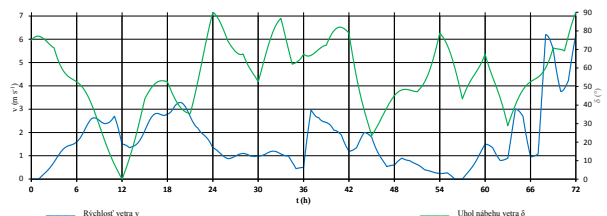
prúd I sa rovná 395,6 A prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c rovná 74,193 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 75,731 °C a podľa druhej metódy sa rovná 74,544 °C. Pre prúd I sa rovná 197,8 A, prevádzková teplota θ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 35,731 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 37,073 °C a podľa druhej metódy sa rovná 36,037 °C.

Ďalšia časť je zameraná na porovnanie výpočtov hodnôt prevádzkovej teploty θ_p za každé 3 minúty počas 3 dní, realizovaných pre analyzované prenosové vedenie s vodičom ACSR 758-AL1/43-ST1A a tiež vodičom ACSR 143-AL1 / 25-ST1A. Analyzované prenosové vedenie (napät'ová hladina 110000 V, dĺžka 50 km) sa nachádzalo medzi dvoma elektrickými stanicami v Slovenskej republike (nadmorská výška 216 m a 254 m). Výpočty prevádzkovej teploty θ_p boli vykonané v roku 2019 v troch letných dňoch. Počas prenosu elektrickej energie ovplyvňovali vodiče prenosového vedenia rôzne poveternostné podmienky (teplota prostredia θ_E , slnečné žiarenie S_T , rýchlosť vetra v a uhol nábehu vetra δ). V jednej z elektrických staníc (216 m n. m.) boli nainštalované dva rôzne meracie prístroje, ktoré zaznamenávali RMS (Root Mean Square) hodnotu striedavého prúdu pretekajúceho analyzovaným prenosovým vedením, slnečné žiarenie, teplotu prostredia, rýchlosť a smer vetra. Namerané údaje sa získali v intervale záznamu 3 minúty. Použité napätie medzi fázou a zemou U_{VZ} bolo rovné 63508,53 V a použité napätie medzi fázami U_z bolo rovné 110000 V.

Pre porovnanie pomocou prvého a druhého spôsobu je vypočítaná prevádzková teplota θ_p . Prvá metóda uvažuje s prevádzkovou teplotou θ_p podľa riešenia diferenciálnej rovnice s alebo bez vodivosti vplyvom koróny G_c . Nasledujúce obrázky 13 a 14 zobrazujú vstupné hodnoty prúdu I , slnečného žiarenia S_T , teploty prostredia θ_E , rýchlosti vetra v a uhla nábehu vetra δ .



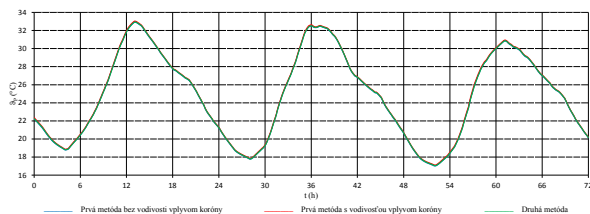
Obr. 13 Vstupné hodnoty prúdu I , slnečného žiarenia S_T , teploty prostredia θ_E



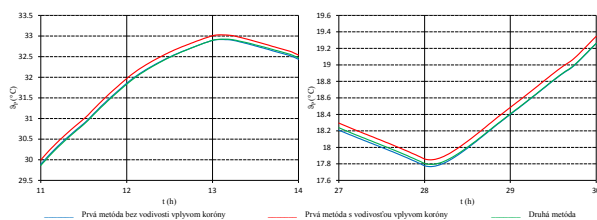
Obr. 14 Vstupné rýchlosti vetra v a uhla nábehu vetra δ

Pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A nasledujúce obrázky 15 a 16 zobrazujú výpočty prevádzkovej teploty θ_p a zároveň

zväčšené detaily pre maximálnu a minimálnu prevádzkovú teplotu ϑ_p .

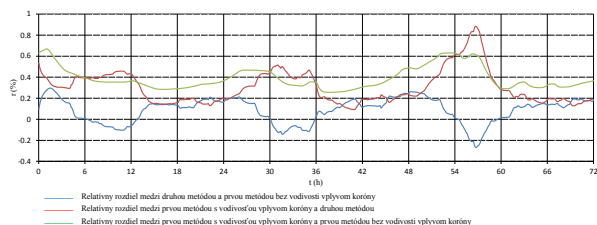


Obr. 15 Vypočítané prevádzkové teploty ϑ_p pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A



Obr. 16 Zväčšený detail pre maximálnu a minimálnu prevádzkovú teplotu ϑ_p pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A

Pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A maximálne a minimálne vypočítané prevádzkové teploty ϑ_p sú zobrazené na predchádzajúcom obrázku 16. Maximum prevádzkovej teploty ϑ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 32,915 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 33,028 °C a podľa druhej metódy sa rovná 32,924 °C. Minimum prevádzkovej teploty ϑ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 17,769 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 17,851 °C a podľa druhej metódy sa rovná 17,794 °C. Nasledujúci obrázok 17 zobrazuje výpočty relatívneho rozdielu medzi použitými metódami.

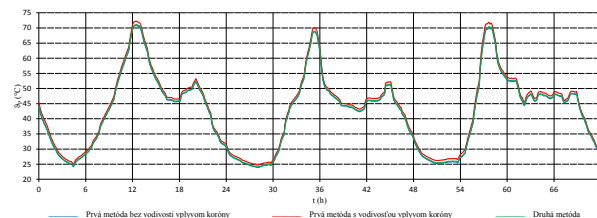


Obr. 17 Vypočítaný relatívny rozdiel medzi použitými metódami pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A

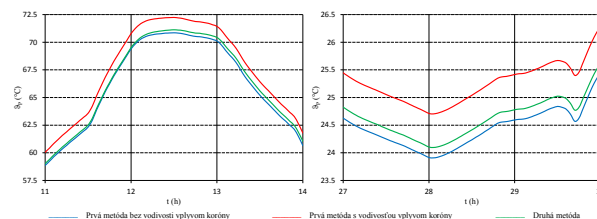
Pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A hodnota relatívneho rozdielu medzi druhou metódou a prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny klesá, keď klesá hodnota prevádzkovej teploty ϑ_p . Hodnota relatívneho rozdielu medzi ostatnými metódami zvyšuje, keď klesá hodnota prevádzkovej teploty ϑ_p . Hodnota relatívneho rozdielu medzi druhou metódou a prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny G_c je v rozmedzí od -0,266 % do 0,296 %. Hodnota relatívneho rozdielu medzi prvou metódou s vodivosťou vplyvom koróny G_c a druhou metódou je v rozmedzí od 0,092 % do 0,882 %. Hodnota relatívneho rozdielu medzi prvou metódou s

vodivosťou vplyvom koróny G_c a prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny G_c je v rozmedzí 0,257 % až 0,669 %.

Pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A nasledujúce obrázky 18 a 19 zobrazujú výpočty prevádzkovej teploty ϑ_p a zároveň zväčšené detaily pre maximálnu a minimálnu prevádzkovú teplotu ϑ_p .

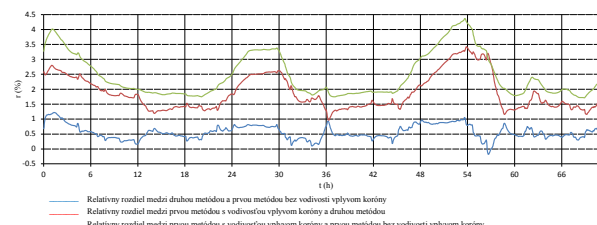


Obr. 18 Vypočítané prevádzkové teploty ϑ_p pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A



Obr. 19 Zväčšený detail pre maximálnu a minimálnu prevádzkovú teplotu ϑ_p pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A

Pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A maximálne a minimálne vypočítané prevádzkové teploty ϑ_p sú zobrazené na predchádzajúcom obrázku 19. Maximum prevádzkovej teploty ϑ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 70,859 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 72,245 °C a podľa druhej metódy sa rovná 71,13 °C. Minimum prevádzkovej teploty ϑ_p podľa prvej metódy bez vodivosti vplyvom koróny G_c sa rovná 23,908 °C, podľa prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c sa rovná 24,705 °C a podľa druhej metódy sa rovná 24,095 °C. Nasledujúci obrázok 20 zobrazuje výpočty relatívneho rozdielu medzi použitými metódami.



Obr. 20 Vypočítaný relatívny rozdiel medzi použitými metódami pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A

Pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A sa hodnota relatívneho rozdielu medzi jednotlivými metódami zvyšuje, keď klesá hodnota prevádzkovej teploty ϑ_p . Hodnota relatívneho rozdielu medzi druhou metódou a prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny G_c je v rozmedzí od -0,178 % do 1,221 %. Hodnota relatívneho rozdielu medzi prvou

metódou s vodivosťou vplyvom koróny G_c a druhou metódou je v rozmedzí od 0,967 % do 3,419 %. Hodnota relatívneho rozdielu medzi prvou metódou s vodivosťou vplyvom koróny G_c a prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny G_c je v rozmedzí 1,721 % až 4,366 %.

Navrhované výpočty prevádzkovej teploty ϑ_p možno ľahko rozšíriť pri zvažovaní rôznych prípadov prúdu I v závislosti od času t . Tieto výpočty je možné prepočítať vo vzťahu ku konkrétnym poveternostným podmienkam, ktoré sa vyskytujú v letnej alebo zimnej sezóne. Zároveň je možné použiť výpočty prevádzkovej teploty ϑ_p pre diaľkové prenosové vedenia vedúce cez viaceré územia. Zistenie prevádzkovej teploty ϑ_p je dôležité pre návrh prenosového vedenia a analýzu je možné použiť v širokom rozsahu prenosových vedení s rôznymi materiálmi vodičov, menovitým napätím a inými vlastnosťami.

IV. ZÁVER

Pri zvyšujúcom sa dopyte po elektrickej energii je potrebné preniesť vyrobenú elektrickú energiu ku koncovým spotrebiteľom. Dôležitými parametrami vodičov prenosového vedenia sú ich prevádzková teplota ϑ_p , ako aj ampacita a tieto dva parametre sú navzájom prepojené.

Hlavným prínosom je navrhnutá metóda výpočtu prevádzkovej teploty vodiča vonkajšieho prenosového vedenia v reálnych prevádzkových podmienkach (vonkajšie poveternostné vplyvy, prúdové zaťaženie a vplyv koróny). Výhoda tejto vyvinutej metódy spočíva v zohľadnení vplyvu korónového výboja. Ďalej bola táto metóda (prvá metóda) porovnaná s metódou CIGRE (druhá metóda) s prihliadnutím na skutočné poveternostné podmienky.

V prvom kroku sa vykonali výpočty prevádzkovej teploty ϑ_p pre dve rôzne hodnoty prúdu I pretekajúceho analyzovaným vodičom ACSR 758-AL1/43-ST1A a tiež vodičom ACSR 143-AL1/25-ST1A pomocou prvej a druhej metódy. Tieto výpočty boli realizované pre niekoľko hodnôt teploty prostredia ϑ_E a súčasne pre počiatočnú teplotu vodiča ϑ_w . V ďalšej časti boli vykonané výpočty prevádzkovej teploty ϑ_p podľa týchto metód pre skutočné prenosové vedenie pre tri letné dni. Matematický opis vplyvu poveternostných podmienok na vodiče elektrického vedenia je uvedený v Technickom návode CIGRE 207 [111] a Technickom návode CIGRE 601 [112]. Kvalitný systém merania poveternostných podmienok a prúdu I v okolí vonkajšieho prenosového vedenia poskytuje veľmi dôležité informácie na výpočet prevádzkovej teploty vodiča ϑ_p . Údaje boli zaznamenané o poveternostných podmienkach a prúde I pretekajúcom vodičom (zaznamenané každé 3 minúty počas 3 dní).

Druhá metóda opisuje výpočet prevádzkovej teploty ϑ_p bez zohľadnenia vodivosti vplyvom koróny G_c . Teda druhú metódu možno porovnať s prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny G_c . V tomto prípade sa priemerná hodnota relatívneho rozdielu rovná 0,087 % pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A a 0,565 % pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A. Obidve metódy poskytujú veľmi podobné výsledky, len s malými rozdielmi v dôsledku rozdielného spôsobu riešenia tepelnej rovnováhy. Prvá metóda [10] [11] môže určiť

vodivosť vplyvom koróny G_c . To dáva priestor na porovnanie prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c s prvou metódou bez vodivosti vplyvom koróny G_c . Toto porovnanie odhalilo, že priemerná hodnota relatívneho rozdielu sa rovná 0,391 % pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A a 2,458 % pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A. Ďalej porovnanie prvej metódy s vodivosťou vplyvom koróny G_c s druhou metódou ukázalo, že priemerná hodnota relatívneho rozdielu sa rovná 0,304 % pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A a 1,882 % pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A.

Získané výsledky potvrdzujú, že prvá a druhá metóda sú použiteľné na približný výpočet prevádzkovej teploty ϑ_p . Nebol však zistený žiadny významný vplyv strát spôsobených vplyvom koróny na prevádzkovú teplotu.

Pri prenose elektrickej energie s prihliadnutím na technické parametre skutočných prenosových vedení sa významná časť energie stráca vo vysokonapäťových prenosových vedeniach na väčšie vzdialenosti [2]. V našom prípade sú relatívne straty výkonu s prihliadnutím na straty vplyvom koróny 4,797 % pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A a 8,804 % pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A. Relatívne straty výkonu bez zohľadnenia strát vplyvom koróny sú 4,794 % pre vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A a 8,552 % pre vodič ACSR 143-AL1/25-ST1A. Na tomto základe sa predpokladá použitie týchto výpočtov na zaistenie bezpečnej a spoľahlivej prevádzky prenosových vedení predpokladané zmenou parametrov prenosového vedenia v dôsledku zvýšenia prevádzkovej teploty ϑ_p . Koróna spôsobuje ďalšie straty elektrickej energie, a preto je potrebné ju redukovať pomocou homogenizačné vysokonapäťových prenosových vedení. Všetky tieto problémy vytvárajú mimoriadne zložité súvislosti k dosiahnutiu správnej činnosti prenosového vedenia v elektroenergetike. Nakoniec je potrebný nový komplexný prístup k prenosovým vedeniam ako jednej z dôležitých častí celého systému elektrizačnej sústavy.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenská akadémia vied na základe zmluvy VEGA č. 1/0372/18 a Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy APVV-19-0576.

LITERATÚRA

- [1] W. Z. Black, W. R. Byrd, "Real-time ampacity model for overhead lines", IEEE Transactions Power Apparatus Systems, PAS-10:2289-93, 1983
- [2] P. Staněk, P. Ivanová, "Súčasná tendencie ekonomickej globalizácie", Bratislava 2015, ISBN 978-80-970135-7-8
- [3] P. Staněk, P. Ivanová, "Spoločnosť 5.0 ekonomika budúcnosti", Bratislava 2017, ISBN 978-80-8168-678-8
- [4] P. Staněk, P. Ivanová, "Európska únia na križovatke postrehy a inšpirujúce riešenia", Bratislava 2016, ISBN 978-80-8168-482-1
- [5] P. Staněk, P. Ivanová, "Štvrtá priemyselná revolúcia a piaty civilizačný zlom", Bratislava 2016, ISBN 978-80-970135-8-5
- [6] P. Staněk, P. Ivanová, Nové rozhrania spoločnosti a ekonomie – Kritické postrehy, Bratislava, 2018, ISBN: 978-80-8168-854-6

- [7] P. Staněk, P. Ivanová, I. Pauhofova, V. vašková, D. Vilhelm, Hľadanie novej reality – Nové dimenzie ekonomie a spoločnosti, Bratislava, 2018, ISBN: 978-80-8168-943-7
- [8] S. Beryozkina, "Evaluation Study of Potential Use of Advanced Conductors in Transmission Line Projects", *Energies* 12(5) 822-48, 2019
- [9] S. Beryozkina, A. Sauhats, E. Vanzovichs, "Climate conditions impact on the permissible load current of the transmission line", *Proceedings of the IEEE Trondheim PowerTech*, pp 1-6, 2011
- [10] P. Novák, "Elektrické teplo", Technical University of Košice, 2010, ISBN 978-80-89284-48-1
- [11] L. Varga, S. Ilenin, P. Leščinský, "Prenos a rozvod elektrickej energie", Technická univerzita Košice, 2003
- [12] Jorge RS, Hertwich EG, "Environmental evaluation of power transmission in Norway", *Applied Energy* 101 513-20, 2013
- [13] L. Kotni, "A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24:578-96, 2014
- [14] J. Chlebný, P. Beneš, J. Langer, J. Král, M. Martinásková, "Automatizace a automatizační technika", Computer Press Brno, 2014
- [15] I. Kolcunová, "Diagnostika elektrických strojov", Technická univerzita Košice, 2006, ISBN 80-8073-550-6
- [16] Z. Yan Z, Y. Wang, L. Liang, "Analysis on ampacity of overhead transmission lines being operated", *Journal of Information Processing Systems*, 13:1358-71, 2017
- [17] J. Šnajdr, J. Sedláček, Z. Vostrácký, "Application of a line ampacity model and its use in transmission lines operations", *Journal of Electrical Engineering*, 65:221-7
- [18] M. Kanálik, A. Margitová, L. Beňa, "Comparison of the Temperature Calculated by CIGRE Technical Brochure 601 with Real Temperature Measurement on ACSR Conductors in the Slovak Republic", *Electrical Engineering*, 101(3):921-33, 2019
- [19] M. Kanálik, A. Margitová, J. Urbanský, L. Beňa, "Temperature calculation of overhead power line conductors according to the CIGRE technical brochure 207", *Proceedings of the 20th international scientific conference on electric power engineering (EPE)*, pp 24-8, 2019
- [20] L. Arya, S. Choube, M. Shrivastava, D. Kothari, "Loadability margin enhancement using co-ordinated aggregation based particle swarm optimization (CAPSO)", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32:975-84, 2010
- [21] H. Farahmand, M. Rashidinejad, A. Mousavi, A. Gharaveisi, M. Irving, G. Taylor, "Hybrid mutation particle swarm optimisation method for available transfer capability enhancement", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42:240-9, 2012
- [22] P. Acharjee, "Identification of maximum loadability limit and weak buses using security constraint genetic algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 36:40-50, 2012
- [23] G. D. Irisarri, X. Wang, J. Tong, S. Mokhtari, "Maximum loadability of power systems using interior point nonlinear optimization method", *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1):162-72, 1997
- [24] M. Othman, I. Musirin, "A novel approach to determine transmission reliability margin using parametric bootstrap", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33:1666- 74, 2011
- [25] D. M. Kim, I. S. Bae IS, J. O. Kim, "Determination of available transfer capability (ATC) considering real-time weather conditions", *European Transactions on Electrical Power*, 21:855-64, 2011
- [26] M. Miura, T. Satoh, S. Iwamoto, I. Kurihara, "Application of dynamic rating to increase the available transfer capability", *Electrical Engineering in Japan*, 166(4):40-7, 2009
- [27] S. Quaia, "Critical analysis of line loadability constraints", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24:1-11, 2018
- [28] D. O. Klimenta, B. D. Perović, M. D. Jevtić, J. N. Radosavljević, "An analytical algorithm to determine allowable ampacities of horizontally installed rectangular bus bars", *Thermal science*, 20(2) 717-30, 2016
- [29] D. Medved', L. Mišenić, M. Kolcun, J. Zbojovský, M. Pavlík, "Measuring of magnetic field around power lines", *Proceedings of the 8th International Scientific Symposium Elektroenergetika*, pp 148-51, 2015
- [30] J. Hu, X. Xiong, J. Chen, W. Wang, J. Wang, "Transient Temperature Calculation and Multi-Parameter Thermal Protection of Overhead Transmission Lines Based on an Equivalent Thermal Network", *Energies*, 12(1) 66-91, 2018
- [31] L. S. Chan, T. T. Chow, K. F. Fong, Z. Lin Z, "Generation of a typical meteorological year for hong kong", *Energy Conversion and Management*, 47:87-96, 2006
- [32] T. Lhendup, S. Lhundup S, "Comparison of methodologies for generating a typical meteorological year (TMY)", *Energy for Sustainable Development*, 11(3):5-10, 2007
- [33] S. Guo, D. Yan, T. Hong, C. Xiao, Y. Cui Y, "A novel approach for selecting typical hot-year (THY) weather data", *Applied Energy*, 242:1634-48, 2019
- [34] A. Ebrahimpour, A. Maerefat, "A method for generation of typical meteorological year", *Energy Conversion and Management*, 51:410-7, 2010
- [35] K. Skeiker, B. A. Ghani, "A software tool for the creation of a typical meteorological year", *Renewable Energy*, 34:544-54
- [36] S. Karimi, A. M. Knight, P. Musilek, J. Heckenbergerova, "A probabilistic estimation for dynamic thermal rating of transmission lines", *Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp 1-6, 2016
- [37] D. M. Kim, J. O. Kim JO, "Prediction of transmission-line rating based on thermal overload probability using weather models", *European Transactions on Electrical Power*, 20(4):534-44, 2010
- [38] T. Ringelband, P. Schäfer, A. Moser, "Probabilistic ampacity forecasting for overhead lines using weather forecast ensembles", *Electrical Engineering*, 95(2):99-107, 2013
- [39] P. Lynch, "The origins of computer weather prediction and climate modeling", *Journal of Computational Physics*, 227(7):3431-44, 2008
- [40] R. Dupin, G. Kariniotakis, A. Michiorri, "Overhead lines dynamic line rating based on probabilistic day-ahead forecasting and risk assessment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 110:565-78, 2019
- [41] A. Michiorri, H. M. Nguyen, S. Alessandrini, J. B. Bremnes, S. Dierer, E. Ferrero, B. E. Nygaard, P. Pinson, N. Thomaidis, S. Uski, "Forecasting for dynamic line rating", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52:1713-30, 2015
- [42] X. Sun, P. Luh, K. Cheung, W. Guan, "Probabilistic forecasting of dynamic line rating for over-head transmission lines", *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp 1-5, 2015
- [43] G. Liu, Y. Li, S. Liu, X. Dong, F. Qu, Y. Li Y, "Real-time solar radiation intensity modeling for dynamic rating of overhead transmission lines", *Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp 1-6, 2016
- [44] Y. Wang, W. Tao, Z. Yan, R. Wei, "Uncertainty analysis of dynamic thermal rating based on environmental parameter estimation", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 167:1-10, 2018
- [45] J. Teh, I. Cotton, "Reliability impact of dynamic thermal rating system in wind power integrated network", *IEEE Transactions on Reliability*, 65(2):1081-9, 2016
- [46] D. M. Greenwood, J. P. Gentle, K. S. Myers, P. J. Davison, I. J. West, G. L. Ingram, M. C. M. Troffaes, "A comparison of real-time thermal rating systems in the U.S. and the U.K. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(4):1849- 58, 2014
- [47] H. Shaker, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, "Fuzzy Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4):1885-92, 2012
- [48] S. Karimi, A. Knight, P. Musilek, "A comparison between fuzzy and probabilistic estimation of dynamic thermal rating of transmission lines", *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pp 1740-4, 2016
- [49] Y. Du, Y. Liao, "On-line estimation of transmission line parameters, temperature and sag using PMU measurements", *Electric Power Systems Research*, 93:39-45, 2012
- [50] C. R. Black, W. A. Chisholm, "Key considerations for the selection of dynamic thermal line rating systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(5):2154-62, 2015

- [51] E. Fernandez, I. Albizu, M. Bedialauneta, A. Mazon, P. Leite, "Review of dynamic line rating systems for wind power integration", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:80-92, 2016
- [52] I. Albizu, E. Fernández, A. Mazón, J. Bengoechea, "Influence of the conductor temperature error on the overhead line ampacity monitoring systems", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(4):440-7, 2011
- [53] I. Albizu, E. Fernández, A. Mazón, J. Bengoechea, E. Torres, "Hardware and software architecture for overhead line rating monitoring", *Proceedings of the IEEE Trondheim PowerTech*, pp 1-6, 2011
- [54] I. Albizu, E. Fernández, P. Eguia, E. Torres, A. Mazon, "Tension and ampacity monitoring system for overhead lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1):3-10, 2013
- [55] K. Morozovska, P. Hilber, "Study of the monitoring systems for dynamic line rating", *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Energy (ICAE)*. Energy Procedia, 105:2557-62, 2017
- [56] M. Musavi, D. Chamberlain, Q. Li, "Overhead conductor dynamic thermal rating measurement and prediction", *Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Measurements of Future Grids (SMFG)*, pp 135-138, 2011
- [57] T. O. Seppa, "Increasing transmission capacity by real time monitoring", *Proceedings of the IEEE power engineering society winter meeting*, pp 1208-11, 2002
- [58] F. V. De Nazare, M. M. Werneck, "Temperature and current monitoring system for transmission lines using power-over-fiber technology", *Proceedings of the IEEE instrumentation and measurement technology conference (I2MTC)*, pp 779-84, 2010
- [59] J. Luo, Y. Hao, Q. Ye, Y. Hao, L. Li, "Development of optical fiber sensors based on Brillouin scattering and FBG for on-line monitoring in overhead transmission lines", *Journal of Lightwave Technology*, 31(10):1559-65, 2013
- [60] R. G. Olsen, K. S. Edwards, "A new method for real-time monitoring of high-voltage transmission-line conductor sag", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(4):1142- 52, 2002
- [61] J. Teh, I. Cotton, "Critical span identification model for dynamic thermal rating system placement", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(16):2644-52, 2015
- [62] M. Matus, D. Saez, M. Favley, C. S. Martinez, J. Moya, R. P. Behnke, G. Olguin, P. Jorquera, "Identification of critical spans for monitoring systems in dynamic thermal rating", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2):1002- 9, 2012
- [63] P. Musilek, J. Heckenbergerova, M. Bhuiyan, "Spatial analysis of thermal aging of overhead transmission conductors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3):1196- 204, 2012
- [64] M. Bhuiyan, P. Musilek, J. Heckenbergerova, D. Koval, "Evaluating thermal aging characteristics of electric power transmission lines. Proceedings of the 23rd Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)", pp 1-4, 2010
- [65] J. Heckenbergerova, P. Musilek, M. Bhuiyan, D. Koval, E. Pelikan, "Identification of critical aging segments and hotspots of power transmission lines. Proceedings of the 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering", pp 1-4, 2010
- [66] "STN EN 50341-1: Overhead Electrical Lines Exceeding AC 45 kV. Part 1: General Requirements" Common Specifications, 2013
- [67] J. Heckenbergerova, P. Musilek, K. Filimonenkov, "Quantification of gains and risks of static thermal rating based on typical meteorological year", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1):227-35, 2013
- [68] "Dynamic line rating for overhead lines – V6", CE TSOs Current Practice, RGCE SPD WG, ENTSO-E, 2015
- [69] J. Heckenbergerova, P. Musilek, K. Filimonenkov, "Assessment of seasonal static thermal ratings of overhead transmission conductors", *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp 1-8, 2011
- [70] I. Albizu, A. J. Mazón, I. Zamora, "Methods for increasing the rating of overhead lines", *Proceedings of the IEEE Russia Power Tech*, pp 1-6, 2005
- [71] P. Zhang, M. Shao, A. R. Leoni, D. H. Ramsay, M. Graham, "Determination of static thermal conductor rating using statistical analysis method", *Proceedings of the Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp 1237-43, 2008
- [72] F. R. McElvain, S. S. Mulnix, "Statistically determined static thermal ratings of overhead high voltage transmission lines in the rocky mountain region", *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2):899-902, 2000
- [73] S. Karimi, P. Musilek, A. M. Knight, "Dynamic thermal rating of transmission lines: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:600-12, 2018
- [74] A. Arroyo, P. Castro, R. Martinez, M. Manana, A. Madrazo, R. Lecuna, A. Gonzalez, "Comparison between IEEE and CIGRE thermal behavior standards and measured temperature on a 132-kV overhead power line", *Energies*, 8(12):13660-71, 2015
- [75] S. Uski, "Estimation method for dynamic line rating potential and economic benefits", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65:76-82, 2015
- [76] S. Talpur, C. Wallnerstrom, P. Hilber, S. Saqib, "Implementation of dynamic line rating technique in a 130 kV regional network", *Proceedings of the 17th IEEE International Multi Topic Conference*, pp 1-6, 2014
- [77] A. Safdarian, M. Z. Degefa, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen, "Benefits of real-time monitoring to distribution systems: dynamic thermal rating", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4):2023-31, 2015
- [78] H. Shaker, H. Zareipour, M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability modeling of dynamic thermal rating", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(3):1600-9, 2013
- [79] L. Ochoa, L. Cradden, G. Harrison, "Demonstrating the capacity benefits of dynamic ratings in smarter distribution networks", *Proceedings of the Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp 1-6, 2010
- [80] M. Khaki, P. Musilek, J. Heckenbergerova, D. Koval, "Electric power system cost/loss optimization using dynamic thermal rating and linear programming", *Proceedings of the IEEE Electrical Power & Energy Conference*, pp 1-6, 2010
- [81] J. Heckenbergerova, J. Hosek, "Dynamic thermal rating of power transmission lines related to wind energy integration", *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp 798-801, 2012
- [82] J. Fu, D. J. Morrow, S. M. Abdelkader, "Integration of wind power into existing transmission network by dynamic overhead line rating", *Proceedings of the 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems*, pp 1-5, 2012
- [83] T. Ringelband, M. Lange, M. Dietrich, H. J. Haubrich, "Potential of improved wind integration by dynamic thermal rating of overhead lines", *Proceedings of the IEEE Bucharest PowerTech*, pp 1-5, 2009
- [84] J. G. Olazarri, A. J. Mazon, S. Rementeria, I. Albizu, E. Fernandez, "Performance of dynamic line rating systems for wind integration", *Proceedings of international conference on clean electrical power (ICCEP)*, pp 567-73, 2015
- [85] S. Favuzza, M. G. Ippolito, F. Massaro, G. Paternò, A. Puccio, G. Filippone, "A new approach to increase the integration of RES in a mediterranean island by using HTLS conductors", *Proceedings of the IEEE 5th international conference on power engineering, energy and electrical drives (POWERENG)*, pp 272-7, 2015
- [86] D. Waniek, U. Hager, C. Rehtanz, E. Handschin, "Influences of wind energy on the operation of transmission systems", *Proceedings of the IEEE power and energy society general meeting – conversion and delivery of electrical energy in the 21st century*, pp 1-8, 2018
- [87] H. T. Yip, C. An, G. J. Lloyd, M. Aten, R. Ferris, G. Hagan, "Field experiences with dynamic line rating protection", *Proceedings of the 10th IET international conference on developments in power system protection (DPSP)*, pp 1-5, 2010
- [88] Y. Yang, D. Divan, R. Harley, T. Habetler, "Real-time dynamic thermal rating evaluation of overhead power lines based on online adaptation of Echo state networks", *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp 3638-45, 2011

- [89] C. Tumelo-Chakonta, K. Kopsidas, "Assessing the value of employing dynamic thermal rating on system-wide performance", Proceedings of the 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, pp 1-8, 2011
- [90] F. Muñoz, F. Torres, S. Martínez, C. Roa, L. García, "Case study of the increase in capacity of transmission lines in the Chilean system through probabilistic calculation model based on dynamic thermal rating", Electric Power Systems Research, 170:35-47, 2019
- [91] J. Ausen, B. Fitzgerald, E. Gust, D. Lawry, J. Lazar, R. Oye, "Dynamic Thermal Rating System Relieves Transmission Constraint", Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), pp 1-5, 2006
- [92] M. Zafraan, M. Arbab, I. Ahmad, M. Khan, "A case study on alleviating electric transmission congestion using dynamic thermal rating methodology", Proceedings of the International Conference on Energy Systems and Policies (ICESP), pp 1-6, 2014
- [93] J. Vinklers, N. Chokani, R. Abhari R, "Improved integration of European renewables using dynamic line rating in Switzerland", Proceedings of the 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp 1-5, 2016
- [94] E. M. Carlini, C. Pisani, A. Vaccaro, D. Villacci D, "Dynamic line rating monitoring in WAMS: challenges and practical solutions", Proceedings of the IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), pp 1-6, 2015
- [95] S. L. Chen, W. Z. Black, H. W. Loard, "High-Temperature Ampacity Model for Overhead Conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, 17(4):1136-41, 2002
- [96] A. Piccolo, A. Vaccaro, D. Villacci, "Thermal rating assessment of overhead lines by Affine Arithmetic", Electric Power Systems Research, 71:275-83, 2004
- [97] G. Coletta, A. Vaccaro, D. Villacci, "A review of the enabling methodologies for PMUs-based dynamic thermal rating of power transmission lines", Electric Power Systems Research, 152:257-70, 2017
- [98] D. J. Spoor, J. P. Roberts, "Development and experimental validation of a weather-based dynamic line rating system", Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp 1-7, 2011
- [99] J. Hosek, P. Musilek, E. Lozowski, P. Pytlak, "Effect of time resolution of meteorological inputs on dynamic thermal rating calculations", IET Generation, Transmission & Distribution, 5(9):941-7, 2011
- [100] J. Fu, S. Abbott, B. Fox, D. J. Morrow, S. M. Abdelkader, "Wind cooling effect on dynamic overhead line ratings", Proceedings of the 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp 1-6, 2010
- [101] M. M. Saied, "Assessing the dynamic rating of overhead transmission lines", European Transactions on Electrical Power, 17(5):526-36, 2007
- [102] J. Zhan, C. Chung, E. Demeter, "Time series modeling for dynamic thermal rating of overhead lines", IEEE Transactions on Power Systems, 32(3):2172-82, 2017
- [103] C. J. Wallnerstrom, Y. Huang, L. Soder, "Impact from dynamic line rating on wind power integration", IEEE Transactions on Smart Grid, 6(1):343-50, 2015
- [104] D. J. Morrow, J. Fu, S. M. Abdelkader, "Experimentally validated partial least squares model for dynamic line rating", IET Renewable Power Generation, 8(3):260-8, 2014
- [105] R. Adapa, D. Douglass, "Dynamic thermal ratings: monitors and calculation methods", Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, pp 163-167, 2005
- [106] G. Kosec, M. Maksić, V. Djurica, "Dynamic thermal rating of power lines – Model and measurements in rainy conditions", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 91:222-9, 2017
- [107] P. Pytlak, P. Musilek, E. Lozowski, J. Toth, "Modelling precipitation cooling of overhead conductors", Electric Power Systems Research, 81:2147-54, 2011
- [108] P. Pytlak, P. Musilek, J. Doucet, "Using Dynamic Thermal Rating systems to reduce power generation emissions", Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp 1-7, 2011
- [109] L. Staszewski, W. Rebizant, "Avoiding blackouts with dynamic thermal line rating", Proceedings of the Modern Electric Power Systems (MEPS), pp 1-5, 2015
- [110] "IEEE, Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors", Std 738, 2012
- [111] "CIGRE, Working Group 22.12, Thermal behaviour of overhead conductors, Technical Brochure 207", 2002
- [112] "CIGRE, Working Group B2.43, Guide for thermal rating calculation of overhead lines, Technical Brochure 601", 2014
- [113] N. Schmidt, "Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards", IEEE Transactions on Power Delivery, 14:1555-9, 1999
- [114] S. Abbott, S. Abdelkader, L. Bryans, D. Flynn, "Experimental validation and comparison of IEEE and CIGRE dynamic line models", Proceedings of the 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp 1-5, 2010
- [115] M. Simms, L. Meegapola, "Comparative analysis of dynamic line rating models and feasibility to minimise energy losses in wind rich power networks", Energy Conversion Management, 75:11-20, 2013
- [116] "CIGRE, Working Group B2.36, Guide for application of direct real-time monitoring systems, Technical Brochure 498", 2012
- [117] "CIGRE, Working Group B2.12 Alternating current (AC) resistance of helically stranded conductors, Technical Brochure 345", 2008
- [118] "CIGRE, Task Force B2.12.3, Sag-Tension calculation methods for overhead lines, Technical Brochure 324", 2016
- [119] "CIGRE, Working Group B2.12, Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings, Technical Brochure 299", 2006
- [120] "CIGRE, Working Group B2.12, Conductors for the uprating of overhead lines, Technical Brochure 244", 2004
- [121] Y. Ding, M. Gao, Y. Li, T. L. Wang, H. L. Ni, X. D. Liu, Z. Chen, Q. H. Zhan, C. Hu, "The effect of calculated wind speed on the capacity of dynamic line rating", Proceedings of the IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp 1-5, 2016
- [122] M. Mařko, P. Michalovič, M. Herman, Technický štandard - Holé vodiče vzdušných vedení, 2015
- [123] Lanové vodiče tahané rúrky, Technický štandard, 2016
- [124] J. Bárta, P. Brousil, Holé vodiče pro venkovní vedení ze soustředně sláňných kruhových drátů - CSN EN 50182, 2007

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