

Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti

Študentská vedecká a odborná činnosť
9. apríl 2024

Organizátor:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Editori:

Peter Benko
Stanislav Sojak

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU.
Náklad 50 ks CD nosičov

ISBN 978-80-227-5411-8

Obsah

Vyhodnotenie prehliadky prác ŠVOČ	7
1 Aplikovaná informatika	14
1.1 Hardvérový generátor náhodných čísel pre generovanie kľúčov v multivariáte podpisovej schéme Tatiana Hýlová, Viliam Hromada	15
1.2 Edukačná aplikácia na lúštenie historických šifier pomocou slovníkového útoku Adam Hamara, Eugen Antal	23
1.3 Modernizácia portálu historických šifier Ľubomír Ševčík, Eugen Antal	27
1.4 Rýchly heuristický algoritmus pre optimálne farbenie 3D mriežkových grafov s rôznymi diagonálnymi uhlopriečkami Noémi Herbrik, Martin Nehéz	32
2 Mechatronika	38
2.1 Elektromechanický návrh batériového segmentu pre elektrickú formulu Alexander Lazorík, Martin Baťa	39
2.2 Edukačná aplikácia v programe MATLAB: Modelovanie dejov v PEMFC Hortenzia Wollentová, Michal Miloslav Uličný	45
2.3 Spracovanie a vyhodnocovanie dát z motion- capture obleku pre účely rozpoznávania gest Anna Melekhova, Erik Kučera	51
2.4 Extrakcia dát z fakturačných dokumentov Rastislav Tvarožek, Erich Stark	57
2.5 Rozhranie mozog-počítač pre osoby s telesným znevýhodnením Matej Grznár, Dávid Ižof, Erik Kučera, Oto Haffner	63
3 Elektroenergetika	69
3.1 Goniofotometer a goniofotometria v praxi Dávid Kompan, Roman Dubnička	70
3.2 Fotovolitická elektrárň a jej využitie v koncepte záchytného parkoviska Róbert Irgel, Milan Perný	76

3.3	Určovanie fotovoltickeho potenciálu pomocou aplikácie QGIS a otvorených údajov Illia Lazarenko, Matej Cenký	82
3.4	Vyššie harmonické v súvislosti so zaťažením neutrálneho vodiča Dušan Gavora, Vladimír Kujan	88
3.5	Výpočty prechodných javov v elektrizačnej sústave v prostredí ATP-EMTP a ich automatizácia v programovacom jazyku Python Ivan Bednárik, Jozef Bendík	92
3.6	Effects of the Change of Emissivity and Absorptivity Coefficients on the Allowable Current Carrying Capacity Slávka Sečková, Jozef Bendík	96
3.7	Farbivom sensitizované solárne články Tomáš Turňa, Milan Perný	101
4	Elektronika a fotonika, Elektrotechnika	106
4.1	Hybridný napájací systém nanosatelitu s využitím batérie a superkapacitora Jakub Gavenda, Lukáš Gardian, Martin Brázda, Miroslav Mikolášek	107
4.2	Bezdrôtový open-source systém pre diaľkové ovládanie pojazdových motorov garážovej a vjazdovej brány Lukáš Gardian, Jakub Gavenda, Miroslav Mikolášek	112
4.3	Vplyv teploty substrátu na rast vrstvy organického polovodiča DNNT a jeho využitie v OFET prvkoch Ondrej Kokavec, Miroslav Novota	118
4.4	Design of Resistance to Frequency Converter for Gas Sensor Tomáš Gergely, Daniel Arbet	124
4.5	Zelená energia v športe Tibor Rózsár	129
4.6	Merací systém intenzity osvetlenia pre účely skúšobníctva EMC Dominik Galdun, Jozef Hallon	135
5	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo	141
5.1	Štatistický klasický a kvantový opis zrážky dvoch častíc Roman Michelko, Peter Bokes	142
5.2	Dva spôsoby generovania náhodného fluktuujúceho potenciálu s nenulovou korelačnou dĺžkou a korelačným časom Marek Klčovanský, Peter Bokes	148
5.3	Fázové prechody v organických monovrstvách Marko Timotej Mesík, Juraj Chlpík	153
5.4	Analógové a filamentárne memristory Natalia Kamila Calvo, Peter Ballo	158
5.5	Basic spectroscopy of Bright Stars Mykola Melnyk, Pavol Valko	162

5.6	Analýza straty napájania vlastnej spotreby jadrového bloku VVER-440 z vonkajšej siete vplyvom extrémneho vetra Matúš Hupka, Jana Šimeg Veterníková	166
5.7	Optimalizácia snímkovania s Timepix3 pre analýzu zmiešaných radiačných polí Matej Balušík, Andrea Šagátová	172
6	Robotika a kybernetika	178
6.1	Porovnanie sledovacích algoritmov pre UAV Daniel Fundárek, Jozef Rodina	179
6.2	Návrh riadenia lietajúcich dronov pomocou neuroevolúcie Aleš Melichar, Ivan Sekaj	183
6.3	Mriežková architektúra senzorov s aplikáciou v 'In-sensor computing' technológií Matej Horský, Ivan Sekaj, Boris Hudec	187
6.4	PID Controller Implementation in C++ David Janto, Martin Dodek	191
6.5	Návrh a realizácia komunikačného protokolu pre virtuálnu robotickú arénu Adrián Jakubčík, Juraj Slačka	197

Členovia programového a recenzného výboru

Ing. Viliam Hromada, PhD.
Ing. Eugen Antal, PhD.
Mgr. Oľga Stašová, PhD.
Ing. Vladislav Novák
prof. Ing. Danica Rosinová, PhD.
doc. Ing. Pavol Bisták, PhD.
Ing. Juraj Paulech, PhD.
Ing. Mária Hypiúsová, PhD.
prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.
doc. Ing. Žaneta Eleschová, PhD.
Ing. Jozef Bendík, PhD.
doc. Mgr. Miroslava Farkas Smitková, PhD.
prof. Ing. Ľubica Stuchlíková, PhD.
doc. Ing. Daniel Arbet, PhD.
Ing. Martin Šoka, PhD.
Ing. Miroslav Novota, PhD.
Ing. Martin Kemény, PhD.
Mgr. Martin Konôpka, PhD.
Ing. Jaroslav Tóvik, PhD.
Ing. Milan Pavúk, PhD.
Ing. Patrik Novák, PhD.
Mgr. Goran Bulatovič
Ing. Branislav Stríbrnský, PhD.
doc. Ing. Ján Kardoš, PhD.
doc. Ing. Ladislav Kőrösi, PhD.
Ing. Leo Mrafko, PhD.
doc. Ing. Jana Paulusová, PhD.

Vyhodnotenie prehliadky prác ŠVOČ

Úvod

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave sa dňa 09. apríla 2024 konala prehliadka prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ). Táto študentská vedecká konferencia dáva príležitosť študentom bakalárskeho a inžinierskeho štúdia prezentovať výsledky, ktoré vypracovali samostatne, alebo pod vedením pedagogických a výskumných pracovníkov ústavov FEI STU, prípadne významných odborníkov z praxe.

V roku 2024 bolo vyhlásených osem sekcií zodpovedajúcich študijným programom akreditovaným na FEI STU. Počet prác prihlásených do jednotlivých sekcií je uvedený v nasledovnej tabuľke.

	Sekcia	Ústav	Počet prác	Počet študentov
1	Aplikovaná informatika	ÚIM	5	5
2	Elektrotechnika	ÚE	2	2
3	Elektroenergetika	ÚEAE	7	7
4	Elektronika a fotonika	ÚEF	4	5
5	Informačné a komunikačné technológie	ÚMIKT	1	1
6	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo	ÚJFI	7	7
7	Mechatronika	ÚAMT	5	6
8	Robotika a kybernetika	ÚRK	5	5
			36	38

Prihlásené práce boli prezentované v šiestich sekciách nasledovne:

1. Aplikovaná informatika: 6 príspevkov
2. Mechatronika: 5 príspevkov,
3. Elektroenergetika: 7 príspevkov
4. Elektronika a fotonika, Elektrotechnika: 6 príspevkov
5. Jadrové a fyzikálne inžinierstvo: 7 príspevkov
6. Robotika a kybernetika: 5 príspevkov

Príspevky v jednotlivých sekciách hodnotili najmenej trojčlenné komisie.

V každej sekcii boli najlepšie práce ocenené Cenou dekana FEI STU v Bratislave a ďalšie vynikajúce práce získali Diplom dekana FEI STU v Bratislave. Obe ocenenia sú spojené s jednorazovým mimoriadnym štipendiom.

Československá sekcia IEEE venovala do súťaže polročné členstvo v IEEE a tričko s logom spoločnosti pre jednu prácu z každej technickej sekcie. Ceny odovzdala členka predstavenstva československej sekcie IEEE Ing. Elena Cocherová, PhD.

Spoločnosť HUMUSOFT s.r.o. ocenila Cenou HUMUSOFTu najlepší príspevok vypracovaný s využitím systému MATLAB a COMSOL Multiphysics. Autorka víťaznej práce získala voucher na online školenie podľa vlastného výberu a ďalšie vecné dary. Ceny odovzdal zástupca spoločnosti HUMUSOFT na Slovensku Ing. Martin Foltin, PhD.

Zväz slovenských vedeckotechnických spoločností (ZSVTS) venoval do súťaže Cenu ZSVTS, ktorá bola určená pre najlepšiu prácu študentskej vedeckej konferencie, pričom nositeľ ceny dostal možnosť

stat' sa Ambasádorom ZSVTS, ktorého úlohou bude sprostredkovať informácie o svojich vedeckých aktivitách aj o ZSVTS nielen na univerzite, ale aj vo svojom okolí. Práce nominované na toto ocenenie navrhli komisie v jednotlivých sekciách a následne najlepšiu prácu vybral a ocenenie v mene ZSVTS odovzdal riaditeľ Zväzu slovenských vedeckotechnických spoločností Ing. Ivan Janáč.

Ocenené práce a ďalšie práce odporúčené komisiami v sekciách boli zaradené do zborníka, ktorý bol vydaný v elektronickej forme.

Zoznam ocenených prác je uvedený v nasledujúcich tabuľkách.

Prehľad ocenení

Cena dekana FEI STU v Bratislave

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Daniel FUNDÁREK	Porovnanie sledovacích algoritmov pre UAV	Ing. Jozef Rodina, PhD.	Robotika a kybernetika
Tomáš GERGELY	Design of Resistance to Frequency Converter for Gas Sensor	doc. Ing. Daniel Arbet, PhD.	Elektronika a fotonika, Elektrotechnika
Bc. Tatiana HÝLOVÁ	Hardvérový generátor náhodných čísel pre generovanie kľúčov v multivariate podpisovej schéme	Ing. Viliam Hromada, PhD.	Aplikovaná informatika
Marko Timotej MESÍK	Fázové prechody v organických monovrstvách	RNDr. Juraj Chlpík, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo
Bc. Slávka SEČKOVÁ	Effects of the Change of Emissivity and Absorptivity Coefficients on the Allowable Current Carrying Capacity	Ing. Jozef Bendík, PhD.	Elektroenergetika
Bc. Rastislav TVAROŽEK	Extrakcia dát z fakturačných dokumentov	Ing. Erich Stark, PhD.	Mechatronika

Diplom dekana FEI STU v Bratislave

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Matej BALUŠÍK	Optimalizácia snímkovania s Timepix3 pre analýzu zmiešaných radiačných polí	doc. Ing. Andrea Šagátová, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo
Bc. Ivan BEDNÁRIK	Výpočty prechodných javov v elektrizačnej sústave v prostredí ATP-EMTP a ich automatizácia v programovacom jazyku Python	Ing. Jozef Bendík, PhD.	Elektroenergetika
Adrián JAKUBČÍK	Návrh a realizácia komunikačného protokolu pre virtuálnu robotickú arénu	Ing. Juraj Slačka, PhD.	Robotika a kybernetika
Bc. Marek KLČOVANSKÝ	Dva spôsoby generovania náhodného fluktuujúceho potenciálu s nenulovou korelačnou dĺžkou a korelačným časom	doc. Ing. Peter Bokes, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo
Bc. Ondrej KOKAVEC	Vplyv teploty substrátu na rast vrstvy organického polovodiča DNNT a jeho využitie v OFET prvkoch	Ing. Miroslav Novota, PhD.	Elektronika a fotonika, Elektrotechnika
Illia LAZARENKO	Určovanie fotovoltickejho potenciálu pomocou aplikácie QGIS a otvorených údajov	Ing. Matej Cenký PhD.	Elektroenergetika
Alexander LAZORÍK	Elektromechanický návrh batériového segmentu pre elektrickú formulu	Ing. Martin Baťa	Mechatronika
Bc. Ľubomír ŠEVČÍK	Modernizácia portálu historických šifier	Ing. Eugen Antal, PhD.	Aplikovaná informatika

Cena Československej sekcie IEEE

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Dominik GALDUN	Merací systém intenzity osvetlenia pre účely skúšobníctva EMC	Ing. Jozef Hallon, PhD.	Elektronika a fotonika, Elektrotechnika
Bc. Noémi HERBRIK	Rýchly heuristický algoritmus pre optimálne farbenie 3D mriežkových grafov s rôznymi diagonálnymi uhlopriečkami	RNDr. Martin Nehéz, PhD.	Aplikovaná informatika
Matej HORSKÝ	Mriežková architektúra senzorov s aplikáciou v 'In-sensor computing' technológií	prof. Ing. Ivan Sekaj, PhD., Ing. Boris Hudec, PhD.	Robotika a kybernetika
Illia LAZARENKO	Určovanie fotovoltickeho potenciálu pomocou aplikácie QGIS a otvorených údajov	Ing. Matej Cenký PhD.	Elektroenergetika
Bc. Roman MICHELKO	Štatistický klasický a kvantový opis zrážky dvoch častíc	doc. Ing. Peter Bokes, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo
Hortenzia WOLLENTOVÁ	Edukačná aplikácia v programe MATLAB: Modelovanie dejov v PEMFC	Ing. Michal Miloslav Uličný	Mechatronika

Cena HUMUSOFTu

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Hortenzia WOLLENTOVÁ	Edukačná aplikácia v programe MATLAB: Modelovanie dejov v PEMFC	Ing. Michal Miloslav Uličný	Mechatronika

12

Cena ZSVTS

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Dominik GALDUN	Merací systém intenzity osvetlenia pre účely skúšobníctva EMC	Ing. Jozef Hallon, PhD.	Elektronika a fotonika, Elektrotechnika

Vybrané práce v jednotlivých sekciách

V nasledujúcich kapitolách sú uvedené všetky ocenené práce ako aj ďalšie vybrané práce v jednotlivých sekciách.

Sekcia 1

Aplikovaná informatika

Hardvérový generátor náhodných čísel pre generovanie kľúčov v *multivariate* podpisovej schéme

Bc. Tatiana Hýlová

Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave

xhylova@stuba.sk

Abstrakt - Tento príspevok sa zaoberá návrhom a implementáciou hardvérového generátora náhodných čísel na mikrokontroler Arduino Nano. Obsahuje popis implementácie a následné štatistické vyhodnotenie výstupov a analýzu entropie na základe dokumentu NIST SP 800 90B. Popisuje spojenie navrhnutého hardvérového generátora s vybraným štandardizovaným deterministickým generátorom náhodných bitov, a následne demonštruje implementáciu celej konštrukcie do *multivariate* schémy skupinového podpisu.

1 Úvod

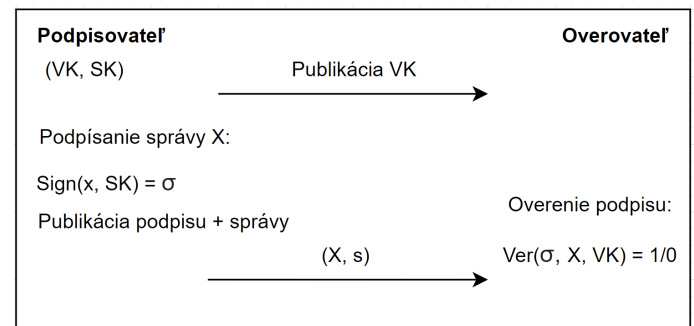
S nástupom konceptu kvantového počítania a rastúcich požiadaviek na bezpečnosť digitálnych systémov sa objavuje potreba vyvinúť kryptosystémy odolné aj voči takýmto novým technológiám. Z pohľadu konštrukcie týchto navrhovaných kryptosystémov sa často stretávame s pojmom generovania náhodných čísel alebo bitov, ktorý sa používa práve pri vytváraní kľúčov, od ktorých sa následne odvíja aj celková bezpečnosť. V tomto kontexte sa zaoberáme návrhom a implementáciou hardvérového generátora náhodných čísel na mikrokontroler Arduino Nano. Jeho náhodnosť demonštrujeme štatistickým vyhodnotením, vrátane testovania entropie podľa dokumentu NIST SP 800 90B. Tento generátor náhodných čísel je ďalej integrovaný ako True Random Number Generator (TRNG) v kombinácii s vybraným Deterministic Random Bit Generator (DRBG) a jeho výstupné reťazce bitov sú využité pri generovaní kľúčov v podpisovej schéme založenej na rovniciach viacerých neznámych.

2 Elektronický podpis

Najrozšírenejší spôsob ako dokázať v dobe digitálnych technológií pôvod správ či dokumentov je použitie elektronického podpisu. Jedna z metód môže byť použitie digitálnej verzie vlastnoručného podpisu pripojeného ku dokumentu. Takáto metóda nie je z hľadiska bezpečnosti vhodná, nakoľko podpis je rovnaký pre každú správu alebo dokument. Navyše je tento typ podpisu jednoducho falzifikovateľný, a preto je bezpečnejšia metóda použiť špe-

cifické algoritmy elektronických podpisov, ktoré produkujú jedinečné podpisy viazané na konkrétnu podpisovanú entitu (dokument, správa ...).

Z kryptografického hľadiska patria elektronické podpisy do *asymetrickej kryptografie*, to znamená, že používateľ vlastní unikátny kľúčový pár skladajúci sa zo súkromného kľúča (SK) a verejného kľúča (VK). Súkromný kľúč zostáva tajný a používateľ ho používa na podpisovanie. Verejný kľúč je následne používaný na verifikáciu podpisu prijímateľom, prípadne verejnosťou. [7]



Obr. 1: Proces generovania a verifikácie podpisu

2.1 Všeobecná podpisová schéma

Schémy elektronického podpisu majú definované tri základné algoritmy ($KeyGen$, $Sign$, Ver ($Verify$)), ktoré sú prispôsobené vždy konkrétnemu typu schémy. Všeobecne však vždy vykonávajú rovnaké logické úkony. Vďaka konštrukcii založenej na asymetrickej kryptografii je možné potvrdiť, či konkrétnu správu podpísal daný používateľ, nakoľko platný podpis dokáže vygenerovať iba so znalosťou správneho SK .

$KeyGen(\lambda)$ - generuje náhodný súkromný kľúč SK a k nemu korešpondujúci verejný kľúč VK s úrovňou bezpečnosti λ .

$Sign(x, SK)$ - generuje podpis σ správy x pomocou súkromného kľúča SK .

$Ver(\sigma, \mathbf{x}, VK)$ - overí pomocou verejného kľúča VK či podpis σ je platný podpis správy x .

Najpoužívanejšie podpisové schémy využívajú známe matematické konštrukcie a im príslušné matematické problémy na zaručenie bezpečnosti, napríklad diskkrétne logaritmy, eliptické krivky či faktorizácia. Aktuálne sa však do popredia dostávajú algoritmy, ktoré majú zaručiť postkvantovú bezpečnosť, teda odolnosť voči útokom kvantovým počítačom. [5]

3 Multivariate podpisová schéma

Jednou z potenciálnych schém, ktoré by mali byť odolné voči útokom kvantovým počítačom sú schémy založené na rovniciach viacerých neznámych (*multivariate*). Súkromné a verejné kľúče v týchto schémach sú založené na sústave nelineárnych polynómov viacerých neurčitých nad konečným poľom. Schéma [8], ktorú použijeme v tomto príspevku, používa sústavu m polynómov kvadratického stupňa s n neurčitými. Tento systém môžeme definovať ako:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n p_{ij}^{(1)} * x_i * x_j + \sum_{i=1}^n p_i^{(1)} * x_i + p_0^{(1)} &= 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n p_{ij}^{(m)} * x_i * x_j + \sum_{i=1}^n p_i^{(m)} * x_i + p_0^{(m)} &= 0 \end{aligned}$$

Bezpečnosť vybranej schémy je založená na takzvanom **MQ probléme**, o ktorom je dokázané, že je NP-ťažký aj pre kvadratické systémy nad poľom $\mathbb{F} = GF(2)$. [6]

MQ-problém - pre m kvadratických polynómov $p^{(1)}, \dots, p^{(m)}$ s n neurčitými nad konečným poľom \mathbb{F} , nájdí vektor $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{F}^n$, taký že $p^{(1)}(\mathbf{x}), \dots, p^{(m)}(\mathbf{x}) = 0$. [8]

Kľúčový pár v nami uvažovanej schéme založenej na MQ-probléme sa skladá zo sústavy \mathcal{P} , ktorá obsahuje m kvadratických polynómov s n neurčitými nad poľom $GF(2)$, pričom koeficienty polynómov sú generované náhodne, a vektora $s \in GF(2)^n$ ako súkromný kľúč, pričom platí, že sústava \mathcal{P} je skonštruovaná tak, aby mala iba dve riešenia, a to 0 a vektor s . Ďalej v práci uvažujeme, že $m = n = 256$. Predpokladáme tak, že riešenie tejto sústavy so zložitou 2^{256} má 256-bitovú bezpečnosť. Analogicky, vektor reprezentujúci SK má veľkosť 256.

Podpisová schéma obsahuje všetky tri základné algoritmy adaptované na použitie s *multivariate* systémom rovníc. Bližšie sa pozrieme na *KeyGen*, teda na algoritmus generovania kľúča.

3.1 KeyGen algoritmus

Súkromný kľúč je vektor hodnôt predstavujúcich korene kvadratickej sústavy polynómov viacerých neurčitých nad konečným poľom. Napríklad, ak by bol počet neurčitých $n = 3$ a korene sústavy polynómov by boli $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 1$, bol by reprezentovaný ako vektor:

$$s = (1 \ 0 \ 1)$$

Vo verejnom kľúči, ako sústave kvadratických polynómov viacerých neurčitých, je každý z polynómov reprezentovaný tromi časťami, a to kvadratickou, lineárnou a absolútnou, pričom vo zvolenej schéme je absolútna časť vždy nulová. Príklad polynómu nad poľom $GF(2)$ o $n = 3$ neurčitých:

Polynóm: $x_1^2 + x_1x_3 + x_2x_3 + x_1 + x_2 + x_3 + 0$

Kvadratická:	Lineárna:	Absolútna:
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$(1 \ 1 \ 1)$	0

Algoritmus generovania kľúča pre našu podpisovú schému vygeneruje kľúčový pár (VK, SK) tak aby spĺňal vyššie spomenuté kritériá, t.j. že riešením sústavy \mathcal{P} je len nulový vektor a vektor s . Vstupom sú parametre m - počet rovníc a n - počet premenných.

Algoritmus 1 Generovanie kľúčového páru v systéme [8]

```

0: function KEYGEN( $m, n$ )
0:    $s \leftarrow$  náhodný vektor  $\in \mathbb{F}^n$  {Nesmie byť nula}
0:    $t \leftarrow$  maximálny index kde  $s[t] \neq 0$ , defaultne  $n - 1$ 
0:    $\mathcal{P} \leftarrow$  náhodný systém  $m$  kvadratických polynómov s
        $n$  neurčitými.
0:    $v \leftarrow \mathcal{P}(s)$ 
0:   for  $j \leftarrow 0$  to  $m - 1$  do
0:     if  $v[j] \neq 0$  then
0:        $\mathcal{P}[j]_t \leftarrow \mathcal{P}[j]_t - \frac{v_j}{s_t}$ 
0:     end if
0:   end for
0:   return  $SK \leftarrow s, VK \leftarrow \mathcal{P}$ 
0: end function=0

```

Z pohľadu algoritmu 1 je bezpečnosť podmienená náhodným generátorom, ktorý sa používa na generovanie súkromného a verejného kľúča, teda náhodných vektorov. Je potrebné preto aby generátor produkoval vektory bitov definovanej dĺžky s dostatočnou nepredvídateľnosťou.

4 Generovanie náhodných čísel

Téma generovania náhodných čísel je kritickou otázkou v oblasti informatiky a kryptografie. Potrebné je generovať sekvencie čísel či bitov, ktoré sú nepredvídateľné, a teda štatisticky sa javia ako plne náhodné. V praxi sa kvalita postupností vyhodnocuje pomocou výpočtu entropie či pokročilou sadou testov od NIST [4].

DRNG (DRBG)

Deterministic random number generator / Deterministic random bit generator

Deterministický alebo aj pseudo-náhodný generátor náhodných čísel je jedným z najpoužívanejších generátorov, ktorý algoritmicky produkuje sekvenciu zdanlivo náhodných čísel. Takýto generátor je založený na inicializačnom *seede*, ktorý dodá generátoru náhodnosť [2].

TRNG

True-random number generator

Zvyčajne označovaný tiež ako nedeterministický generátor náhodných čísel produkuje sekvencie čísel z fyzikálnych procesov. Jeho bezpečnosť sa opiera práve o fyzikálne procesy, ktoré sú narozdiel od algoritmov v DRNG nepredvídateľné. Tieto generátory derivujú hodnoty napríklad z elektrického šumu či rozpadu atómov, sú preto veľmi vhodné pre použitie v kryptografických systémoch [2].

Zásadným rozdielom medzi DRNG a TRNG je tiež rýchlosť generovania náhodných čísel, kedy algoritmické generovanie je výrazne rýchlejšie ako generovanie pomocou fyzikálnych javov. Z tohoto dôvodu sa často používa kombinácia týchto generátorov, kedy sa na generovanie náhodných sekvencií použije DRNG, ktorý je inicializovaný výstupom z TRNG. Za predpokladu, že je inicializačný *seed* dostatočne náhodný a ako DRNG je použitý štandardizovaný algoritmus, môžeme takýto generátor použiť v podpisovej schéme.

5 Hodnotenie náhodnosti

Pre použitie generátora v podpisovej schéme je potrebné vyhodnotiť, či je výstup z použitého generátora odlíšiteľný od štatisticky náhodnej postupnosti, a taktiež otestovať výstup TRNG z hľadiska entropie. Na vyhodnotenie je vhodné použiť základné štatistické testy prípadne štandardizovanú sadu štatistických testov a dostupných publikácií od NIST (*National Institute of Standards and Technology*).

5.1 NIST štatistické testy

Inštitúcia NIST vyvinula sadu komplexných štatistických testov pre posúdenie náhodnosti a kvality generátorov náhodných čísel, publikácia NIST SP 800 22 [3]. Sada obsahuje 15 testov, pričom každý sa sústreďuje na iné aspekty, ktorými je vyhodnocovaná náhodnosť. Testy hodnotia vlastností sekvencií bitov, teda či sa výstupy generátora javia ako štatisticky skutočné náhodné. Cieľom je odhaliť generátory, ktoré by umožňovali potenciálnym útočníkom použiť štatistickú analýzu na prelomenie generátora.

5.2 Entropia

Entropia ako koncept teoretickej informatiky sa snaží kvantifikovať náhodnosť. Reflektuje predvídateľnosť výstupu generátora, čím väčšia entropia pripadá na výstup generátora, tým zložitejšie je predvídať jeho výstup. Zjednodušene môžeme povedať, že hovorí o tom, koľko informácií vieme z dostupnej množiny dát získať. Pri tomto vyhodnocovaní použijeme takzvanú *min-entropy*, ktorá kvantifikuje náhodnosť v najhoršom prípade, teda za predpokladu, že generátor produkuje najpravdepodobnejšie výstupy. Hodnotu min-entropy \mathcal{H} pre nezávislú diskretnú premennú X , ktorá môže nadobudnúť hodnoty z množiny $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ s pravdepodobnosťou $Pr(\mathcal{X} = x_i) = p_i$ pre $i = 1, \dots, k$ vypočítame podľa publikácie NIST SP 800 90b [10] ako :

$$\mathcal{H} = \min_{1 \leq i \leq k} (-\log_2 p_i) = -\log_2 \max_{1 \leq i \leq k} p_i$$

6 Implementácia generátora

Generátor implementujeme primárne tak, aby bol pre používateľa efektívny. To znamená, že generovanie jedného kľúčového páru bude mať trvanie rádovo v sekundách. V dôsledku tohto predpokladu je nutné implementovať veľmi rýchly generátor, nakoľko pri generovaní 256-bit bezpečnosti kľúča potrebujeme v závislosti od jeho maticovej reprezentácie vygenerovať 16,842,752 bitov.

$$m - \text{počet polynómov}, n - \text{počet neznámych} \\ m * [(n * n) + n + 0],$$

kde $(n * n)$ je počet bitov potrebných pre kvadratickú a n pre lineárnu časť jedného polynómu. Nakoľko je v tejto schéme absolútna časť nulová, nie je potrebné generovať náhodný bit.

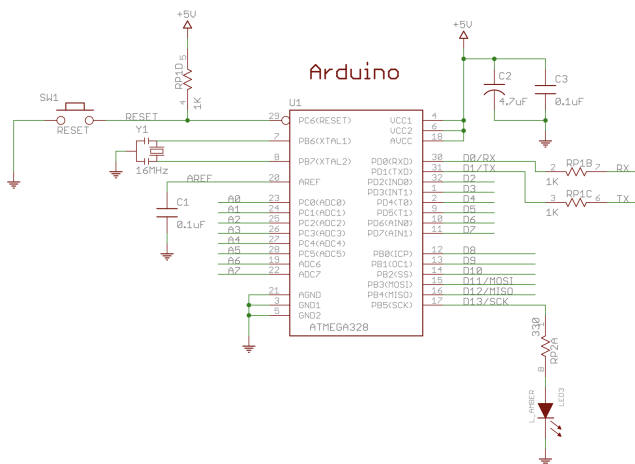
Na implementáciu použijeme Arduino Nano ako hardvérový generátor inicializačného seedu pre vybranú DRNG funkciu.

6.1 Arduino Nano

Tento mikrokontroler je vhodný na projekty, ktoré nie sú výrazne výpočtovo náročné, prípadne nepotrebujú veľké množstvo RAM pamäte. Doska obsahuje procesor ATmega328P s 2KB SRAM pamäte a 32KB flash pamäte pre nahratie zdrojového kódu. Disponuje niekoľkými digitálnymi, analógovými a špeciálnymi pinmi, ktoré sú programovateľné. Navyše séria procesorov ATmega328 obsahuje vstavaný teplomer. Ako programovací jazyk sa používa C, kvôli lepšej kontrole a prístupu ku hardvéru.

6.1.1 Analógové vstupy

Vývojová doska ponúka 8 analógových pinov, z ktorých je možné prečítať vstupné napätie. Arduino obsahuje 10



Obr. 2: Schéma Arduino Nano [1]

bitový analógovo digitálny konvertor čo znamená, že zo vstupu je možné prečítať napätie v rozpätí 0 - 3.3V, ktoré skonvertuje na celé číslo z intervalu 0 - 1023 pomocou funkcie `analogRead()`. Ak na tento vstup nepripojíme žiadne externé zariadenie a prečítame vstup, získame tak náhodný šum ovplyvnený pohybom či dotykom zariadenia. Túto vlastnosť sa pokúsime využiť pri implementácii generátora ako zdroj nepredvídateľného šumu.

6.1.2 Integrovaný teplomer

Procesor ATmega328P obsahuje integrovaný senzor, ktorý nám umožní prečítať teplotu. Senzor sa však nachádza vo vnútri procesora, takže čítanie bude ovplyvnené jeho aktuálnym zaťažením. Na prečítanie použijeme kód č. 1, pričom je potrebná tiež kalibrácia výstupu zo senzora. Táto kalibrácia a vplyv zaťaženia procesora vnáša do meraní určitú mieru nepresnosti avšak tento šum je pri použití v náhodnom generátore žiadaný. Uvádzaná presnosť takéhoto merania je $\pm 10^{\circ}C$.

Kód 1: Funkcia pre získanie teploty

```

unsigned long GetTemp(void)
{
    unsigned int wADC;
    // initialize ADC reading
    ADMUX =
        (_BV(REFS1) | _BV(REFS0) | _BV(MUX3));
    ADCSRA |= _BV(ADEN);
    delay(20);
    ADCSRA |= _BV(ADSC);
    while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC));
    wADC = ADCW;
    // calculate temperature
    return (wADC - 324.31) / 1.22;
}
    
```

6.2 HMAC DRBG

Jedná sa o deterministický generátor náhodných bitov založený na štandardizovanej HMAC (*hash-based message authentication code*) funkcii. Zvolená funkcia HMAC použitá v tomto generátore musí využívať hash funkciu, ktorej bezpečnosť je minimálne taká ako je očakávaná bezpečnosť výsledného generátora. Činnosť generátora pozostáva z niekoľkých funkcií, z ktorých najpodstatnejšie sú funkcie *instantiate*, *get_entropy*, *reseed* a *generate*.

instantiate - DRBG generátor je potrebné pred použitím inicializovať (znáhodniť) vstupným seedom. Funkcia *instantiate* skontroluje validitu vstupných parametrov, získa inicializačný seed pomocou funkcie *get_entropy* a nainicializuje generátor do počiatočného stavu.

get_entropy - slúži na získanie počiatočného seedu, ktorý by mal byť z bezpečnostných dôvodov výstup z TRNG generátora s dostatočnou dĺžkou a entropiou.

reseed - vykoná opätovnú inicializáciu generátora. Jedná sa o opakované vykonanie funkcie *instantiate* s iným seedom. Vykonanie *reseed* nie je nutné avšak je odporúčané po definovanom počte vygenerovaných reťazcov (Tab. 1).

generate - vykoná proces generácie pseudonáhodných reťazcov bitov na inicializovanom generátore. Jej výstup budeme používať ako finálne pseudonáhodné reťazce pre generovanie kľúčov.

Inicializačný seed

Veľmi podstatnou časťou celého procesu generovania náhodných sekvencií je inicializačný seed, ktorý celý proces znáhodní. Výsledná bezpečnosť reťazcov je závislá na tomto vstupnom seede, preto je potrebné aby spĺňal požiadavky špecifikované v publikácii NIST SP 800 90a [2]. V tabuľke 1 sú podľa tejto publikácie uvedené požadované dĺžky inicializačného seedu ako aj očakávaná entropia či maximálny počet reťazcov vygenerovaných z jedného seedu.

	SHA224	SHA-256	SHA-512
dĺžka výstupného bloku	224	256	512
min-entropy pre instantiate a reseed	224	256	512
Minimálna dĺžka seedu	224	256	512
Max. počet reťazcov medzi reseed	2 ⁴⁸		

Tab. 1: Požadované parametre seedu

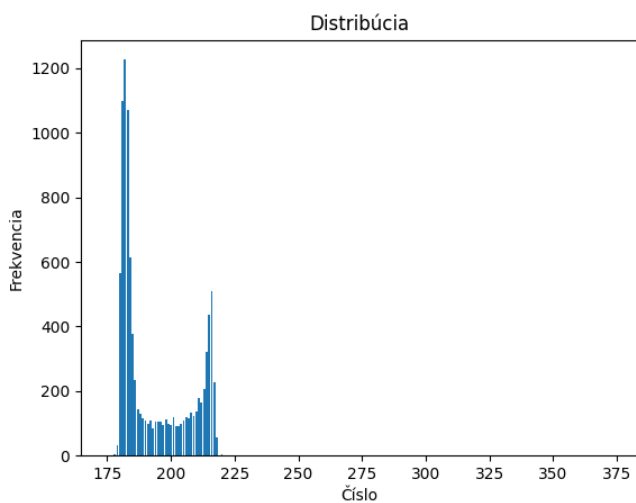
V našej podpisovej schéme sme zvolili 256-bitovú bezpečnosť kľúčov. Následne na dodržanie tejto bezpečnosti bola zvolená ako hashovacia funkcia používaná v HMAC DRNG funkcia SHA256 s veľkosťou výstupného bloku 256 bitov. Podľa tabuľky 1 preto potrebujeme použiť inicializačný seed s minimálnou veľkosťou 256 bitov a minimálnou entropiou rovnakej hodnoty.

6.3 Generátor seedu

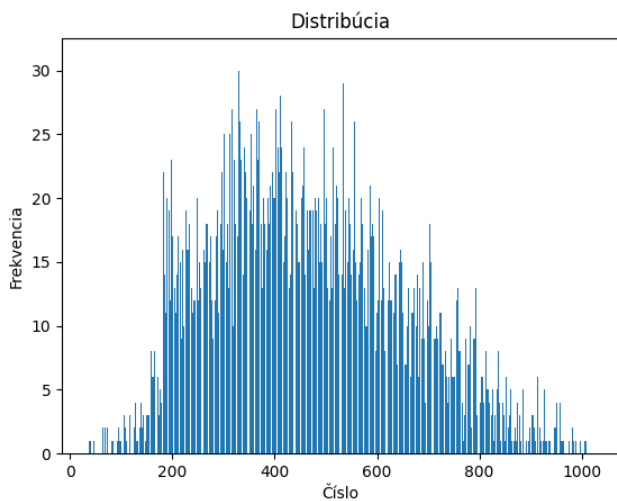
Pri návrhu algoritmu generátora budeme sekvenčne navrhovať kroky s prihliadnutím na výsledky analýzy náhodnosti vzoriek. Po prvotnej analýze samotného nespracovaného výstupu z funkcie *analogRead()* vytvoríme algoritmus, ktorého výstupom budú 8-bitové vzorky použité následnom pri konštruovaní *seedu*.

6.3.1 Analýza výstupu z analogRead()

Pre potvrdenie našich tvrdení o tom, že pohyb ovplyvňuje čítanie z *analogRead()* vykonáme experiment kedy z jedného pinu (0) prečítame 10000 hodnôt a štatisticky vyhodnotíme.



Obr. 3: Distribúcia hodnôt v statickej polohe



Obr. 4: Distribúcia hodnôt pri náhodných dotykoch

	Statická poloha	Dotyk a pohyb
Priemer	193.76	464.18
Medián	186.00	447.00
Modus	182 (1227x)	383 (31x)
Rozptyl	14.62	186.00
Min-entropia	3.03	8.33

Tab. 2: Štatistické vyhodnotenie výstupu *analogRead()*

Ako je už aj z grafu možné vidieť, pri statickej polohe generátora je priestor aj rozptyl vygenerovaných čísel veľmi malý. Vygenerovanými číslami sme pokryli 7.23% priestoru z intervalu 0-1023, pričom dosiahnutá *min-entropia* bola 3.03. Pri generovaní s náhodným dotykom a pohybom sme pokryli 87.01% priestoru a dosiahli sme *min-entropiu* 8.33.

Tento vplyv šumu na entropiu sa pokúsime využiť aj pri hardvérovej konštrukcii generátora, kedy piny napojíme na dosku plošných spojov, na ktorej budú náhodné vzory a súčiastky, ktoré budú vďaka nedokonalostiam zavádzať šum do procesu generovania.

6.3.2 Návrh algoritmu

Pri každom pripojení a reštarte zariadenia (Arduino Nano) sa vykoná funkcia *setup()*. V tejto funkcii nainicializujeme knižničný náhodný generátor *random* pomocou implementovanej funkcie *getTemp()*, ktorej činnosť je popísaná v sekcii 6.1.2. Následne je táto funkcia znáhodnená opäť pomocou prečítania hodnoty z *analogRead()* z náhodného pinu. Tieto kroky je nutné vykonať kvôli následnej činnosti generátora, ktorá by mala byť už do určitej miery náhodná. K dispozícii je implementovaná funkcia *generate_seed()*, ktorej výstupom je výsledný inicializačný *seed*.

Algoritmus 2 Generovanie inicializačného seedu

```

Require: n_samples, _delay
randomValue ← random(9) + PIN_OFFSET
for i ← 0 to n_samples - 1 do
    pin ← analogRead(randomValue) mod 8
    random_value ← analogRead(pin + PIN_OFFSET)
    lowByte ← random_value & 0xFF
    Serial.write(lowByte)
    delay(_delay)
end for
    
```

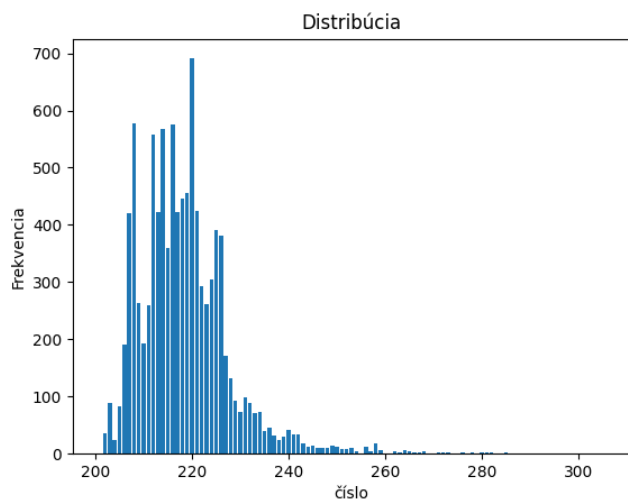
Vstupom do algoritmu 2 je hodnota *n_sequences*, ktorou je možné parametrizovať počet potrebných vzoriek v závislosti od požadovanej entropie (rovnica 6.3.3). Algoritmus sa skladá z kôl, kde počet kôl je definovaný počtom potrebných vzoriek. Pred začatím prvého kola sa vygeneruje náhodná hodnota *x*, ktorá ostáva statická a reprezentuje *pin*, z ktorého sa znáhodňuje čítanie. Jedno kolo algoritmu:

- Vygeneruj náhodnú hodnotu $y = analogRead(x)$
- Prečítaj vzorku $\mathcal{V} = analogRead(y)$

Aplikovaním algoritmu 2 sme pri statickej polohe dosiahli pokrytie priestoru 8.40% čo je iba o 1.17% viac ako pri výstupe bez algoritmu, pričom hodnoty vykazujú správanie bližšie Gaussovmu rozdeleniu(Obr, 5). Efekt algoritmu je premietnutý aj na obrázku 6, kde sme dosiahli pokrytie 91.11% a taktiež mierne väčší rozptyl.

	Statická poloha	Dotyk a pohyb
Priemer	218.51	520.26
Medián	217.00	510.00
Modus	220 (691x)	383 (31x)
Rozptyl	9.72	202.94
Min-entropia	3.86	8.38

Tab. 3: Štatistické vyhodnotenie výstupu algoritmu



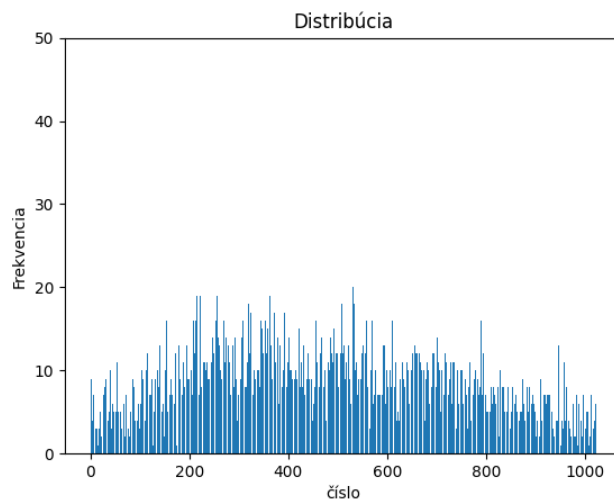
Obr. 5: Distribúcia čísel v statickej polohe (algoritmus)

Celkovo sa tak vplyv algoritmu premietol na miernom zlepšení *min-entropie* pri náhodnom pohybe aj pri statickej polohe.

Ak však vyhodnotíme distribúciu vygenerovaných čísel na Obr. 3 a Obr. 5, väčšina čísel je zoskupená do hodnoty 260. V takomto prípade budeme namiesto 10 bitovej vzorky používať konvenčnú vzorku 8 bitov (1 bajt) tak, že z generátora budeme vracat 8 spodných bitov z nameraného čísla. Po aplikovaní tejto úpravy sa pri oboch meraniach zlepšil pomer entropia na veľkosť vzorky (Tab. 4).

6.3.3 Skladanie seedu

Návrh algoritmu generátora upravíme tak, aby výstup aj v najhoršom prípade, teda keď dosiahneme najnižšiu možnú hodnotu entropie na jednu 8 bitovú vzorku, mal vo výsledku



Obr. 6: Distribúcia čísel pri manipulácií (algoritmus)

	Statická poloha	Dotyk a pohyb
Priemer	215.25	129.67
Medián	215.00	131.00
Modus	214 (828x)	255 (64x)
Rozptyl	6.71	75.23
Min-entropia	3.59	7.29
Pokrytie priestoru	17.58%	100%

Tab. 4: Štatistické vyhodnotenie výstupu algoritmu pre 8 bitové vzorky

požadovanú entropiu. Pri použití navrhnutého algoritmu v statickej polohe generátora dosahujeme entropiu 3.59 bitu na jednu vzorku. Aby sme s istotou dosiahli výslednú entropiu 256 bitov v inicializačnom *seede* potrebujeme aby algoritmus vygeneroval 86 8-bitových vzoriek.

$$entropia\ 256\ b = entropia\ na\ vzorku * počet\ reťazcov$$

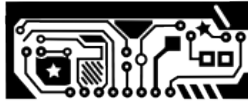
$$256 = 3 * 85.33$$

Týmto spôsobom dosiahneme požadovaných 256 bitov entropie aj v prípade, že používateľ nedodáva zariadeniu náhodnosť pomocou dotykov. Takáto konštrukcia zabezpečí, že v prípade použitia dotyku bude entropia vo výslednom inicializačnom *seede* ≥ 256 b.

6.3.4 Hardvérová implementácia

Finálnu softvérovú implementáciu sme nahrali na mikrokontroler Arduino Nano kde sa pokúsime využiť tiež fyzikálne vlastnosti súčiastok a dosky plošných spojov, na ktorú zariadenie pripojíme. Na túto dosku pripojíme 8 pinov, ktoré máme k dispozícii a vytvoríme na nej náhodné vzory, pričom na 2 z 8 pinov napojíme aj diódy 7. Táto súčiastka sama o sebe poskytuje zdroj šumu nakoľko je ovplyvniteľná napríklad teplotou priestoru, čo vyvoláva

kolísanie v napätí aj bez pripojenia súčiastky na aktívny zdroj.



Obr. 7: Vzory na plošnej doske

6.3.5 NIST SP 800-90B

Testovaním TRNG, resp. odhadom príslušnej entropie sa venuje aj dokument NIST SP 800-90B [10]. Tento dokument obsahuje popis požiadaviek na TRNG a obsahuje popis metodiky odhadu entropie takýchto generátorov.

Z hľadiska príslušného dokumentu je nami navrhnutý generátor, popísaný v časti 6.3.2 generátorom, ktorý neobsahuje tzv. post-processing (v dokumente [10] označený ako *conditioning*). Preto ako výstup z nášho TRNG považujeme priamo digitalizované merania z príslušných pinov, t.j. hodnoty, ktoré vráti volanie *analogRead()*.

Na odhad entropie nášho zariadenia sme použili metodiku popísanú v [10]. Ako prvé je potrebné určiť, či sú jednotlivé výstupy z nášho generátora nezávislé a z rovnakého rozdelenia pravdepodobnosti (tzv. IID - *independent and identically distributed*), keďže od tohto sa odvíja aj spôsob odhadu entropie. Pre tieto účely sme pomocou nášho generátora vygenerovali množinu 1 000 000 po sebe idúcich vzoriek vygenerovaných generátorom. Túto sme následne použili na otestovanie toho, či tieto vzorky sú / nie sú IID.

Na základe testov, ktoré sú popísané v dokumente [10] sme zistili, že jednotlivé vzorky, ktoré generuje náš generátor v statickej polohe nie sú IID.

Keďže podľa zistení vzorky pochádzajúce z nášho generátora nie je možné považovať za nezávislé a pochádzajúce z rovnakého rozdelenia pravdepodobnosti (non-IID), na odhad entropie sme použili testy popísané v kapitolách 6.3.1 - 6.3.10 dokumentu [10]. Výsledky testov uvedené v Tab. 5 všeobecne potvrdzujú náš odhad entropie avšak dokazujú, že generované čísla sú výrazne zoskupené s malým rozptylom, čo je možné vidieť aj z Obrázku 5.

Pre zaujímavosť sme aplikovali vyššie spomenuté testy aj na menšiu množinu čísel vygenerovaných generátorom s náhodným pohybom a dotykom, pričom v tomto prípade testy zlyhali v 11 z 19 IID testov a vykazovali entropiu 4.60972 / 8. Po aplikovaní navrhnutej hardvérovej implementácie popísanej v časti 6.3.4 sme zistili, že nedokonalosti na doske a použitie súčiastok sa výrazne odrazili na výsledkoch. Nami štatisticky odhadovaná entropia dosahovala hodnotu 7.02 pri statickej polohe generátora. Následným aplikovaním testov sme zistili, že vygenerované vzorky nie sú IID avšak z 19 testov zlyhal iba jeden test a konečný odhad entropie podľa

Test	Min Entropy
Bitstring Most Common Value	0.90627
Literal Most Common Value	3.68287
Bitstring Collision	1
Bitstring Compression	0.28875
Bitstring t-Tuple	0.07247
Bitstring LRS	0.00135
Literal t-Tuple	0.48709
Literal LRS	0.00983
Bitstring MultiMCW Prediction	0.90367
Literal MultiMCW Prediction	0.59532
Bitstring Lag Prediction	0.07246
Bitstring MultiMMC Prediction	0.07074
Literal MultiMMC Prediction	0.56697
Bitstring LZ78Y Prediction	0.90627
Literal LZ78Y Prediction	0.55375

Tab. 5: Výsledky testov odhadu entropie

daného dokumentu bol 5.520418, čo považujeme za výrazné zlepšenie správania generátora.

7 Použitie v KeyGen algoritme

KeyGen algoritmus vysvetlený v kapitole 3.1 sme implementovali v jazyku C++ a jeho výstupom je kľúčový pár kompatibilný s vybranou podpisovou schémou [9]. Vrámcami algoritmu generujeme vektor *SK* a sústavu *VK* pričom ako generátor potrebných 256 bitových reťazcov použijeme implementáciu HMAC DRBG podľa dokumentu NIST SP 800-90a [10], ktorého vstupným zdrojom entropie bude inicializačný *seed* vygenerovaný našim generátorom. Zvolenie tejto konštrukcie sa ukázalo ako vhodné nakoľko náš implementovaný generátor v porovnaní s DRBG generátorom produkuje čísla o 13564.7x pomalšie (Tab. 6).

	Generátor	DRBG
1000 vzoriek (8000 bitov)	51.89568	0.003824

Tab. 6: Trvanie generovania bitov v sekundách

Hardvér, na ktorom je implementovaný generátor je navrhnutý tak, že po pripojení do počítača sa spustí proces generovania náhodných čísel v nekonečnej slučke. Tieto čísla sú zároveň posielané ako 8-bitové celé číslo na sériový výstup cez USB pripojenie. Takto môžeme výstup z generátora prečítať v kóde a vyskladať ľubovoľne dlhý inicializačný *seed*. Výsledkom je konzolová aplikácia, ktorá po spustení používateľom vygeneruje kľúčový pár a uloží ho do súboru. Celá implementácia a dokumentácia je dostupná na GitHubu. Výslednú implementáciu sme otestovali rovnakým postupom ako v kapitole 6.3.5, pričom sme vygenerovali viac ako 1 000 000 vzoriek s DRBG s inicializačným *seedom* vyprodukovaným našim generátorom Tab 7.

IID/non-IID	Min-entropy	Trvanie (s)
IID	7.890958	6.606994

Tab. 7: Testovanie výstupov DRBG

8 Záver

Na základe tejto práce sme úspešne navrhli a implementovali hardvérový generátor náhodných čísel využívajúci mikrokontroler Arduino Nano. Výsledky našej štatistickej analýzy a testovania entropie podľa normy NIST SP 800 90B napomohli úprave algoritmu generovania tak, aby aj v štatisticky najhoršom prípade bola dodržaná požadovaná entropia vo vygenerovanom reťazci. Implementácia hardvérového generátora je schopná poskytovať kvalitné postupnosti bitov s entropiou minimálne 256 bitov. Dokázali sme, že je efektívnejšie použitie navrhnutého generátora v kombinácii s DRBG vzhľadom na potrebný počet bitov. Následne sme úspešne implementovali *KeyGen* algoritmus zvolenej podpisovej schémy kde sme integrovali aj navrhnutý generátor čím sme demonštrovali jeho praktické využitie.

Podakovanie

Týmto chcem poďakovať Ing. Viliamovi Hromadovi PhD. za jeho cenné rady a spoluprácu pri tvorbe tohto príspevku.

Literatúra

- [1] Arduino nano-rev3.2 schematics.
- [2] Elaine Barker and John Kelsey. Recommendation for random number generation using deterministic random bit generators, Jun 2015.
- [3] L E Bassham, A L Rukhin, J Soto, J R Nechvatal, M E Smid, E B Barker, S D Leigh, M Levenson, M Vangel, D L Banks, N A Heckert, J F Dray, and S Vo. *A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications*. 2010.
- [4] Information Technology Laboratory Computer Security Division. Nist sp 800-22: Documentation and software - random bit generation: Csrc.
- [5] Erik Dahmen Daniel J. Bernstein, Johannes Buchmann. *Post-Quantum Cryptography*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [6] Harry R. Lewis. Michael r. garey and david s. johnson. computers and intractability. a guide to the theory of np-completeness. w. h. freeman and company, san francisco1979, x 338 pp. *Journal of Symbolic Logic*, 48(2):498–500, 1983.

- [7] Christof Paar and Jan Pelzl. Understanding cryptography.
- [8] Albrecht Petzoldt, Stanislav Bulygin, and Johannes Buchmann. A multivariate based threshold ring signature scheme. *Cryptology ePrint Archive, Paper 2012/194*, 2012. <https://eprint.iacr.org/2012/194>.
- [9] Albrecht Petzoldt, Stanislav Bulygin, and Johannes Buchmann. A multivariate based threshold ring signature scheme. *Cryptology ePrint Archive, Paper 2012/194*, 2012. <https://eprint.iacr.org/2012/194>.
- [10] Meltem Sönmez Turan, Elaine Barker, John Kelsey, Kerry A McKay, Mary L Baish, and Mike Boyle. *Recommendation for the entropy sources used for random bit generation*. January 2018.

Edukačná aplikácia na lúštenie historických šifier pomocou slovníkového útoku

Bc. Adam Hamara, Ing. Eugen Antal, PhD.

Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave

xhamara@stuba.sk

Klasické šifry predstavujú dôležitú časť histórie kryptografie, ktorá sa zaoberá skrytým prenosom informácií prostredníctvom manipulácie s textom. Tieto šifry, využívané už stáročia, sa zakladajú na rôznych princípoch transformácie textu, aby bol nečitateľný bez poznania správneho dešifrovacieho kľúča. Jedna z najznámejších metód klasických šifier je jednoduchá substitúcia, ktorá zachováva tzv. vzory, pomocou ktorých je možné vo väčšine prípadov vylúštiť danú šifru. Jednoduchú substitúciu vieme v modernej dobe vylúštiť relatívne jednoducho a viacerými rôznymi metódami. V tejto práci si predstavíme návrh a implementáciu jednej metódy ako modul Angular aplikácie pre edukačné účely.

1 Úvod

Táto práca sa zameriava na návrh a implementáciu samostatného modulu Angular aplikácie, ktorá sa nachádza na voľne dostupnej študentskej edukačnej doméne www.hcportal.eu [1, 2].

V nasledujúcich kapitolách popíšeme rôzne metódy a algoritmy pre vyhľadávanie opakovaní symbolov (vzorov) v texte, následne predstavíme a zhrnieme celkové výsledky našej implementácie.

2 Práca so vzormi

V tejto sekcii si predstavíme vybrané metódy transformácie reťazcov na vzory. Zjednodušene povedané, *vzor* sa definuje ako transformácia symbolov ľubovoľného vstupného textu, ktorá systematicky identifikuje a zachytáva konkrétnu vlastnosť opakovania symbolov v danom texte [3, 4].

2.1 Číselný vzor

Jeden z najviac používaných algoritmov je tzv. *číselný vzor*. Táto metóda transformuje vstupný text tak, že každý symbol nahradí číslom [3]. Algoritmus začína `counter = 1`, pri výskyte nového symbolu ktorý predtým nebol zaznamenaný sa zvýši `counter++`. V opačnom prípade sa použije posledné číslo použité pri prvom výskyte daného symbolu, vid' Tab 1.

Je dôležité poznamenať, že rovnakým vzorom je možné reprezentovať viaceré/rôzne reťazce, napr. reťazom *Freedom, Calling, Matters* prislúcha rovnaký vzor $\{1, 2, 3, 3, 4, 5, 6\}$, ktorý je podmnožinou vzoru z príkladu v Tab 1. Dôsledkom

Tab. 1: Číselný vzor

Reťazec	P	A	T	T	E	R	N	A	T
Číselný vzor	1	2	3	3	4	5	6	2	3

toho vieme reťazce zoskupiť podľa výsledku, aký vzor alebo podmnožinu vzoru generujú a následne efektívne zúžiť priestor možností potrebných na dosadenie slov do textu. Toto nám umožňuje konštrukciu špeciálnej metódy automatického lúštenia.

2.2 Významový vzor

Druhý, veľmi populárny druh vzoru je tzv. *významový vzor* [4], ktorý si najlepšie ukážeme na porovnaní s prvou metódou generovania *číselného vzoru*. Na rozdiel od *číselného vzoru*, *významový vzor* zachytáva len konkrétne indexy, kde sa vyskytuje opakovanie rovnakých symbolov.

Poznámka: pozície sa indexujú od 1.

Tab. 2: Významový vzor

Reťazec	P	A	T	T	E	R	N	A	T
Významový vzor					2-8,	3-4-9			

Vidíme, že *významový vzor* obsahuje menej informácií. Každá postupnosť symbolov je oddelená čiarkou a každý výskyt v danej postupnosti je oddelený pomlčkou. V Tab 2 sa na 2-8 opakujú tie isté symboly, na 3-4-9 pozícií sa taktiež opakujú symboly, avšak iné, ako z predošlej sekvencie.

Táto metóda predstavuje menej agresívnu verziu prvej metódy, pričom sa daný priestor možností zredukuje, ale nie je presne určené, aký predpis musia zvyšné neoznačené symboly dodržiavať. Zameriava sa výlučne na opakujúce sa symboly.

V prípade, že sa v slovníku nachádzajú rôzne tvary slova (v jednotnom aj množnom čísle), obe metódy sú schopné nájsť správne riešenie. Avšak v prípade, keď chýba v slovníku tvar v mn. čísle, *významový vzor* je výhodnejší.

2.3 Zvyšné vzory

Menej využívané metódy generovania vzorov sú napríklad *Frekvenčný vzor* a *Vzdialenosť vzor*.

Frekvenčný vzor zachytáva iba samostatné frekvencie symbolov vyskytujúce sa v texte.

Vzdialenostný vzor je podobný významovému vzoru, pričom nezachytáva konkrétne indexy výskytov týchto opakovaní, ale, iba zachytáva vzdialenosť medzi týmito výskytmi. V konečnom dôsledku táto metóda vracia ešte širšiu množinu potenciálnych výsledkov pre konkrétny vzor, ako iné metódy. Porovnanie frekvenčného a vzdialenostného vzoru uvádzame v Tab 3.

Tab. 3: Frekvenčný a vzdialenostný vzor

Reťazec	P	A	T	T	E	R	N	A	T
Frekvenčný vzor	1	2	3	3	1	1	1	2	3
Vzdialenostný vzor	6, 1-5								

Podobne ako pri významovom vzore, výsledok obsahuje veľmi málo informácií, kvôli čomu bude množina možných riešení väčšia. Symbol čiarka predstavuje koniec jednej postupnosti a symbol pomlčka predstavuje oddelenie symbolov v danej postupnosti.

V vzdialenostnom vzore číslo 6 napovedá, že existujú dva symboly ktoré sú vzdialené práve 6 pozícií od seba (symbol 'A'). Podobne, čísla 1-5 naznačuje, že existujú tri rovnaké symboly, ktoré sú vzdialené najprv 1 a následne 5 pozícií od seba (symbol 'T').

3 Návrh

Cieľom tejto práce bolo navrhnuť a implementovať interaktívnu webovú aplikáciu, ktorá demonštruje lúštenie historických šifier pomocou vzorov, čiže využitie špecializovaného slovníkového útoku.

Pri návrhu riešenia sme definovali nasledovné požiadavky:

1. Interaktívne prostredie pre používateľa.
2. Manuálne lúštenie šifier.
3. Automatické (polo-automatické) lúštenie šifier.

Kvôli edukačnému charakteru tejto práce sme sa zamerali aj na implementáciu pomocnej webovej aplikácie, ktorá interaktívne demonštruje transformáciu vstupných reťazcov na všetky typy vzorov.

3.1 Interaktívne prostredie

Interaktívne prostredie bude zabezpečovať používateľské prostredie ktoré po načítaní vstupného textu daný text rozdelí na jednotlivé symboly. Následne sa vytvorí tabuľka reprezentujúca vstupný text, pričom každý symbol vstupného textu bude reprezentovaný jedným boxom, na ktorý sa bude dať kliknúť a zároveň bude tento box meniť farbu podľa stavu v akom sa nachádza. Tieto stavy môžu byť nasledovné:

- Transparentná - Nový box.
- Slabo-zelená - Kliknutý box.
- Slabo-červená - Vyriešený box.
- Šedá - Box predstavujúci medzeru.

Používateľské prostredie bude obsahovať okrem tabuľky boxov vstupného textu aj druhú tabuľku, reprezentujúcu výsledky po vykonaní manuálneho lúštenia danej sekvencie zvolených boxov (reprezentujúcich vstupný text).

3.2 Manuálne lúštenie

Užívateľ si zvolí ľubovoľnú postupnosť boxov (neoddelenú medzerou). Po ukončení výberu stlačí tlačidlo na vyhľadanie všetkých vhodných riešení podľa číselného vzoru a v druhej tabuľke sa mu zobrazia všetky vhodné riešenia. Riešenia sú tiež interaktívne a používateľ si zvolí výsledok, ktorý potvrdí tlačidlom, ktoré nahradí všetky výskyt symbolov z daného výberu v celom texte.

3.3 Automatické luštenie

V nasledujúcej poslednej sekcii webovej aplikácie bude možnosť dokončiť dané luštenie automaticky. V prípade, že používateľ nahradil v danej inštancii aplikácie niektoré symboly v časti manuálneho lúštenia, tak budeme hovoriť o automatickom doľúštení, teda o polo-automatickom ľúštení.

Automatické lúštenie je podmienené rekurzívne algoritmu, ktorý každej vetve výpočtu vytvorí ohodnotenie a z množiny konečných výsledkov vyberie ten s najvyšším ohodnotením.

Veľký vplyv na plynulé ukončenie automatického lúštenia môže mať viacero faktorov, ako napr.:

- Dĺžka textu.
- Existuje oddelovač slov alebo nie.
- Hĺbka a šírka rekurzívneho prehľadávania.

4 Implementácia

V tejto sekcii si predstavíme konkrétne implementované riešenie spomenutého návrhu. Budeme sa zaoberať algoritmiami použitými na automatické prehľadávanie a lúštenie textu s medzerami alebo bez medzier.

4.1 Používateľské prostredie

Používateľské prostredie obsahuje spomínané interaktívne rozhranie, spoločne s možnosťou manuálneho alebo automatického lúštenia zvoleného vstupného textu.

4.2 Manuálne lúštenie

Po zvolení ľubovoľnej postupnej sekvencie boxov nám táto sekcia ponúka možnosť hľadať výsledky obsahujúce jedno alebo dve slová v celkovej zvolenej postupnosti, tj. zobrazíme výsledky podľa zvolených slov obsahujúce jedno alebo dve slová (v prípade dvoch sú tieto slová oddelené pomlčkou). Predvolené je vyhľadávanie jedného slova.

Užívateľ si môže pomocou ďalších prepínačov modifikovať zobrazenie boxov podľa potreby. Na výber sú okrem spomenutého prepínača ešte prepínač na zobrazenie vstupných

boxov, pričom vieme zobrazit' namiesto symbolov zadaného vstupu, čísla číselného vzoru, ktorý daný vstup nasleduje. Dalším prepínačom vieme výsledky zotriedit' podľa názvu (od A po Z).

4.3 Vyhľadávanie jedného slova

Predvolená možnosť manuálneho lúštenia ponúka vyhľadávanie jedného slova, ktorú chceme namapovať na zvolený podreťazec - na celú sekvenciu zvolených boxov.

Proces vyhľadávania výsledkov má nasledujúce časti:

1. Vytvor číselný vzor zo sekvencie zvolených boxov.
2. Nájdi všetky slová zo slovníka, ktorých číselný vzor sa zhoduje s vytvoreným vzorom.
3. Ak niektoré boxy obsahujú vyriešený box potom nájdi všetky výsledky v ktorých sa zhodujú príslušné symboly s vyriešenými boxmi.
4. Inak vráť všetky výsledky pre danú sekvenciu.

4.4 Vyhľadávanie dvoch slov

Užívateľ si môže zvolit' manuálne lúštenie v režime vyhľadávania výsledkov pre dve súvislé slová.

V tomto režime sa používateľovi zobrazia všetky výsledky všetkých existujúcich podreťazcov pre výsledky, ktorými by sme vedeli zaplnit' užívateľom vybranú sekvenciu boxov. Princíp je podobný ako v časti 4.3., pričom prehadávame všetky možnosti výskytov dvoch podreťazcov pomocou posúvneho okna i :

$$i \in \langle 1, \text{dlzkaS} \text{ekvencie} \rangle$$

Posuvným oknom sa rozdelí vstupna sekvencia boxov na dve pod-sekvencie:

$\text{sekvencia1} \in \langle 1, i \rangle$ a $\text{sekvencia2} \in \langle i, \text{dlzkaS} \text{ekvencie} \rangle$. Pomocou tejto metódy postupne nájdeme všetky existujúce možnosti.

V zozname výsledkov sa zobrazia len tie výsledky, ktoré zachovávajú kandidátov sekvencie1 a sekvencie2 v prípade zdieľaného vzoru.

Príkladom z Tab 4 vidíme, že ak by sme rozdelili daný vstup na dve sekvencie $s1$ a $s2$ predstavujúce momentálne prehadávané pod-sekvencie, vedeli by sme vytvorit' kombinácie slov $s1=PATTERN$ a $s2=IN$. V takom prípade nie je splnená podmienka zachovania spoločného vzoru v oboch kandidátoch (pretože po spojení oboch sekvencií a vytvorení číselného vzoru by nový vzor nezachovával predchádzajúci vzor vytvorený zo zašifrovanej správy), danú kombináciu nemôžeme uznať za vhodnú, teda ani zobrazit' medzi výsledkami.

Tab. 4: Príklad nezachovania vzoru vyhľadávania dvoch slov

	s1							s2	
Správa	P	A	T	T	E	R	N	I	N
Číselný vzor	1	2	3	3	4	5	6	7	6

4.5 Automatické lúštenie

Táto metóda ponúka automatické dokončenie lúštenia pokiaľ ešte máme boxy, ktoré neboli vyriešené. V takom prípade si musíme zvolit' parametre pehl'adávanie do hĺbky a šírky. Tieto parametre priamo zasahujú do komplexity a efektivity hlavného rekurzívneho algoritmu, ktorý je použitý na automatické doľúštenie po stlačení príslušného tlačidla. Druhým vplyvným faktorom na rýchlosť výpočtu je, či používateľom zadaný vstup je oddeliteľný separátorom alebo nie. Pokiaľ nie je oddelený žiadnym separátorom a používateľ nevypočítat' aspoň jednu sekciu boxov, daný výpočet bude veľmi zložitý a nájdené výsledky budú oveľa menej presné.

Proces automatického lúštenia sa v oboch prípadoch začne vygenerovaním masky, ktorá reprezentuje vyriešené boxy, teda rozlúštené fragmenty v texte. Následne sa vytvorí množina vhodných kandidátov, ktoré sú bližšie popísané v príslušných pod-sekciách.

4.6 Automatické lúštenie s oddelovačom

Vstupný text sa najprv rozdelí na podreťazce (slová) na základe zadaného oddelovača. Pre každý podreťazec (slovo) sa vyráta jeho vzor a nájde sa množina vhodných kandidátov zo slovníka. Podreťazce sú najprv ohodnotené skóre funkciou a do textu sa dosadzujú kandidáti podreťazcov v poradí podľa ich skóre.

4.7 Automatické lúštenie bez oddelovača

Vhodný kandidát automatického lúštenia bez oddelovača je taký, ktorého číselný vzor sa zhoduje s číselným vzorom v podreťazci, ktorá je určená posuvným oknom s rozsahom:

$$i \in \langle 5, 15 \rangle$$

Pomocou posuvného okna a ohodnotenia vzniknú vhodný kandidáti (čo najviac opakovaní symbolov v sekvencii), ktorý sa pomocou rekurzívnych parametrov použijú na nájdenie takej kombinácie kandidátov, ktorá ma najvyššie ohodnotenie. Táto kombinácia bude vrátená používateľovi na konci výpočtu.

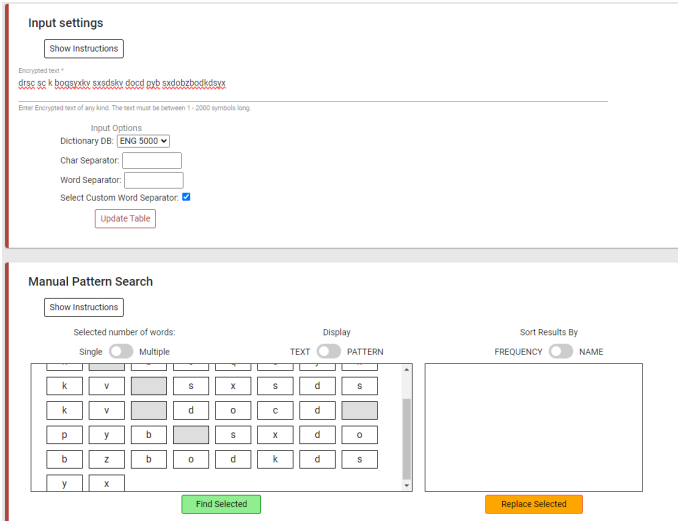
5 Výsledky

V nasledujúcej sekcii si predstavíme výsledky, ktoré boli predmetom zadania tejto práce.

5.1 Zadanie vstupu

Na Obr. : 1 vidíme vstupnú sekciu pre používateľa. Zvolili sme si zašifrovaný text oddelený medzerou. Po stlačení tlačidla "Update Table" sa nám vstup preniesie do interaktívnej časti manuálneho lúštenia, kde si používateľ môže zvolit' ľubovoľnú sekvenciu boxov.

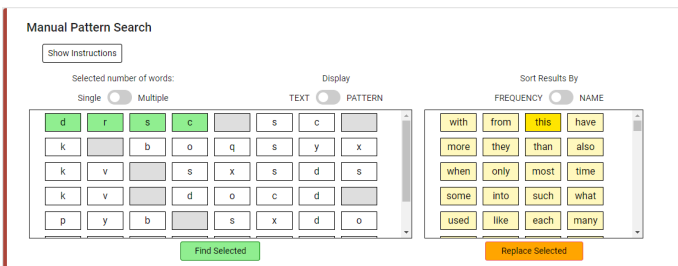
V nasledujúcich sekciiach si interpretujeme interaktívne lúštenie.



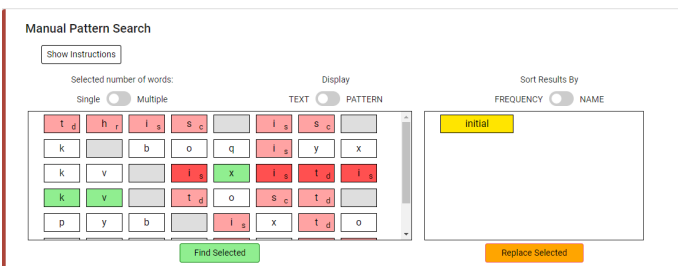
Obr. 1: Vstup od používateľ'a

5.2 Manuálne lúštenie

Obr. 2 reprezentuje stav interaktívnych okien, v momente keď si používateľ zvolil prvé štyri boxy (znázornené zelenou farbou) a následne používateľ stlačil zelené tlačidlo pod ľavým interaktívnym oknom "Find Selected". Po stlačení tohto tlačidla sa na pravej strane zobrazia interaktívne výsledky (slabo-žltá farba), ktoré sú výsledkom výpočtu podľa a sekcie 4.3 a 4.4. Používateľ si vyberie výsledok (silno-žltá farba) a po stlačení tlačidla "Replace Selected" sa vybraný výsledkom vyplnia všetky boxy (slabo-červená farba), ktorých vzor korešpondoval s vzorom jednotlivých symbolov zvoleného výsledku, ako na obrázku Obr. 3. Tento cyklus môže používateľ opakovať viac krát.



Obr. 2: Manuálne lúštenie

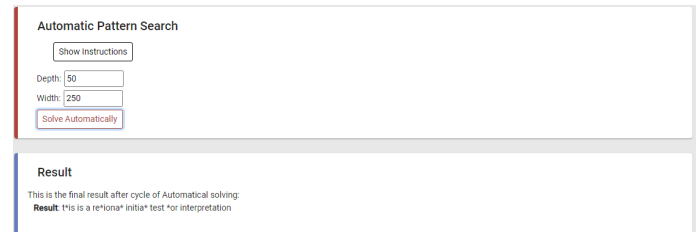


Obr. 3: Manuálne lúštenie

5.3 Automatické lúštenie

V prípade, že sa používateľ rozhodne dokončiť dané lúštenie automaticky, môže tak urobiť, pričom by mal spĺňať predpoklady z časti 4.5, 4.6 a 4.7. Pokiaľ tieto predpoklady používateľ nedodrží, daný výpočet nemusí v dostatočne krátkom čase skončiť.

Na Obr.4 vidíme výsledok po automatickom dolúštení. V našom prípade je vstup krátky a oddelený medzerou, výsledkom čoho sme si mohli zvoliť vyššie parametre rekurzívneho algoritmu a výpočet bol okamžitý.



Obr. 4: Automatické lúštenie

6 Záver

Výsledkom jednej z častí mojej diplomovej práce je interaktívna webová aplikácia ponúkajúca manuálne aj automatické lúštenie jednoduchých šifier s využívaním slovníka slov, zároveň využíva vzory pri hľadaní správneho riešenia. Aplikácia je funkčná, spĺňa stanovené požiadavky a je vhodným edukačným nástrojom, ktorý bude využívaný vo výučbe predmetu B-KŠIF.

Pod'akovanie

Chcel by som vyjadriť hlbokú vd'aku môjmu skoliteľ'ovi, Eugenovi Antálovi, za neustále usmerňovanie, odborné rady a podporu počas celého obdobia príprave a práci na mojej diplomovej práci a príprave tejto práce.

Literatúra

- [1] ANTAL, Eugen; ZAJAC, Pavol. HCPortal overview. In: MEGYESI, Beáta. HistoCrypt 2020. Linköping: University Electronic Press, 2020, s. 18–20. ISBN 978-91-7929-827-2.
- [2] ANTAL, Eugen; ZAJAC, Pavol. HCPortal modules for teaching and promoting cryptology. In: DAHLKE, Carola. HistoCrypt 2021. Linköping: University Electronic Press, 2021, s. 1–11. ISBN 978-91-7929-026-9.
- [3] BAUER, Friedrich L. Decrypted Secrets. Methods and Maxims of Cryptology Springer Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-540-24502-5.
- [4] LYNCH, Frederick D. Pattern-word list (A Cryptographic series) Aegean Park Press, 1977.

Modernizácia portálu historických šifier

Bc. Ľubomír Ševčík, Ing. Eugen Antal, PhD.

Ústav informatiky a matematiky FEI STU v Bratislave

xsevci1@stuba.sk

Archivácia historickej kryptografie je kľúčová pre zachovanie historickej komunikácie, ktorá sa nejakým spôsobom snažila byť utajovaná. Je dôležité systematicky zaznamenávať rôzne kryptografické metódy, techniky a ich vývoj, aby sme mohli lepšie porozumieť histórii šifrovania správ. Rovnako dôležitá je digitalizácia a sprístupnenie historických šifrovaných správ a šifrovacích kľúčov, ktoré sa nachádzajú v rôznych archívoch v papierovej podobe. Rovnaký cieľ má vytýčený aj HCPortal, ktorý sa vyvíjal na pôde FEI STU. V tejto práci sa zameriavame na vytvorenie novej webovej aplikácie na sprístupnenie a prezentáciu historických šifier. Naším cieľom bolo rozšírenie portálu o modernú aplikáciu, ktorá posluží na edukačné účely a na sprístupnenie dát širokej verejnosti.

1 Úvod

Portál historických šifier (HCPortal) pozostáva z viacerých aplikácií a modulov, pričom dve aplikácie sa venujú prezentácii a manažmentu historickej kryptografie [1, 2]. Tieto aplikácie obsahujú zastaralé a rozdielne užívateľské rozhranie (UI), čo negatívne ovplyvňuje návštevníkov portálu. Touto prácou chceme zjednotiť a navrhnúť nové užívateľské rozhranie, ktoré svojím dizajnom a funkcionalitou prispeje k všeobecnému záujmu o historickú kryptografiu. Hlavným cieľom tejto práce je navrhnúť a implementovať novú webovú aplikáciu, ktorá bude slúžiť na prezentáciu a manažment historických kryptogramov a šifrovacích kľúčov. Pri tomto procese sa budeme zameriavať na vylepšenie užívateľského rozhrania (UI) a užívateľského zážitku (UX), pričom integrujeme pripomienky a odporúčania od medzinárodných expertov v oblasti kryptografie.

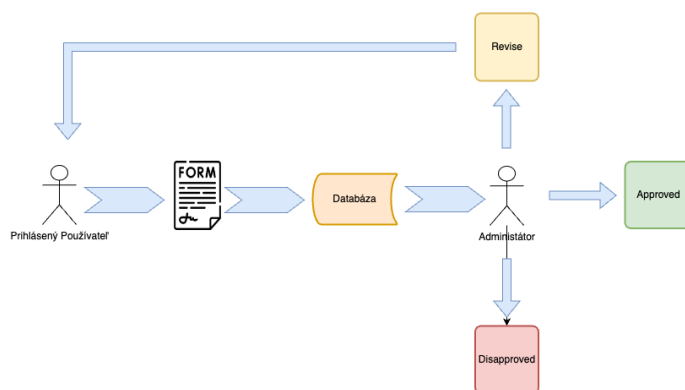
2 Analýza existujúcich riešení

Prvá aplikácia pre manažment a prezentáciu kryptogramov vznikla v roku 2017, ako súčasť tímového projektu [3]. Na tento projekt nadväzoval ďalší tímový projekt [4], ktorý sa zaoberal rovnakou problematikou a priniesol vylepšenú aplikáciu pre manažment a prezentáciu kryptogramov. V roku 2021 vznikla diplomová práca, ktorá rožírila kryptogramy o šifrovacie kľúče. O rok neskôr sa začal paralelný vývoj nových aplikácií, ako súčasť tímových projektov [5, 6], kde jeden tímový projekt vyvíjal administrátorské rozhranie pre šifrovacie kľúče, druhý tímový projekt vyvíjal administrátorské rozhranie pre kryptogramy. Cieľom týchto aplikácií bolo

vytvorenie rozhrania, pomocou ktorého sa dalo jednoduchšie manipulovať s dátami v databáze, keďže do tohto momentu sa akcie ako odstránenie záznamu vykonávali ručne pomocou SQL príkazov. Tieto aplikácie mali veľa podobných črt, ako napríklad databázove modely, ktoré si boli veľa podobné, alebo akcie, ktoré sa vykonávali nad týmito modelmi. V roku 2023, Ing. Mucska [7] vytvoril jednotné administrátorské rozhranie a zjednotil databázove modely do jedného a optimalizoval API pre prezentáciu a manažovanie dát zo strany návštevníka portálu. Súbežne, tímový projekt vyvíjal aplikáciu s novým zjednoteným rozhraním pre kryptogramy a šifrovacie kľúče zo strany návštevníka, ktorý však skončil neúspechom kvôli zvoleniu nevhodnej technológie.

2.1 Use case a role v aplikáciách

V súčasnosti, aplikácia používa schvaľovací proces, ktorým musí prejsť každá entita, ktorá bola pridaná používateľom. Na nižšie uvedenom diagrame (Obr. 1), je znázornený tok entity aplikáciou. Na začiatku používateľ vyplní dáta a odošle formulár. Server uloží entitu do databázy a tá následne prechádza kontrolou administrátorom. Po schvaľovacom procese sa entita nachádza v jednom z troch stavov: *approved* je stav schválenej entity, *revise* je stav, v ktorom je nutné skontrolovať a opraviť dáta a *rejected* je stav, kde je entita neschválená a nie je možné s ňou vykonať ďalšiu akciu.



Obr. 1: Priebeh nahrávania modelu

Aplikácie rozdeľujú používateľov do troch rolí: bežný používateľ, prihlásený používateľ a administrátor. Bežný používateľ má prístup ku štatistickému webu a schváleným záznamom, ktoré si môže prehliadať alebo zobrazovať ich detail. Prihlásený používateľ disponuje rozšíreným právomociam, tetno

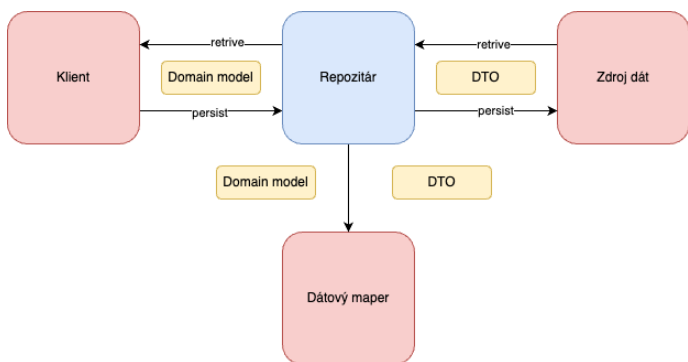
typ používateľ a môže prispievať svojimi vlastnými príspevkami, jeho entity však prechádzajú schvalovacím procesom. Posledná rola je administrátor, ktorý vykonáva nad entitami schvalovací proces. Navyše tento typ používateľ a je oprávnený pridávať a manipulovať s databázou bez nutnosti kontroly.

3 Implementácia

Na základe preferencií a predošlých skúseností, sme sa rozhodli implementovať aplikáciu v knižnici React. Používateľ je na začiatku smerovaný na hlavnú stránku, kde nachádza všeobecné informácie ohľadom používania aplikácie. Z tohoto bodu existuje možnosť prejsť do prehľadávania kryptogramov, šifrovacích kľúčov alebo štatistického webu. V rámci vyhľadávania entít, existuje možnosť zobrazenia detailu a export detailu do PDF. Pre prihláseného používateľ a sa otvára plná funkcionálna aplikácia. Tento typ používateľ a, dokáže pridávať kryptogramy a šifrovacie kľúče. V prípade že je používateľ vlastníkom entity a entita je v stave approved, pending alebo revise, môže entitu editovať alebo klonovať. V prípade, že nie je vlastníkom entity, môže ju len klonovať.

3.1 Repozitár

Repozitár je návrhový vzor, pomocou ktorého dokážeme optimalizovať čas načítavania obsahu. Pre dosiahnutie lepšieho používateľského zážitku sme sa rozhodli implementovať takýto repozitár (Obr. 2). Aplikácia tak vytvára dojem rýchlejšej reakcie na používateľskú akciu. Konkrétna implementácia v našej aplikácii spočíva v tom, že na inicializáciu aplikácie do repozitáru načítame 50 kryptogramov a 50 šifrovacích kľúčov. Tie sú uložené v service provider a sú pripravené na distribúciu do zvyšku aplikácie. Hneď ako zobrazíme používateľovi prvý obsah, spustí sa dopyt pre dočítanie zvyšných kryptogramov a šifrovacích kľúčov uložených v databáze. Pri ktorejkoľvek akcii, ako je klonovanie, alebo edícia, je repozitár stále aktualizovaný, a tak drží vždy najnovšie dáta.

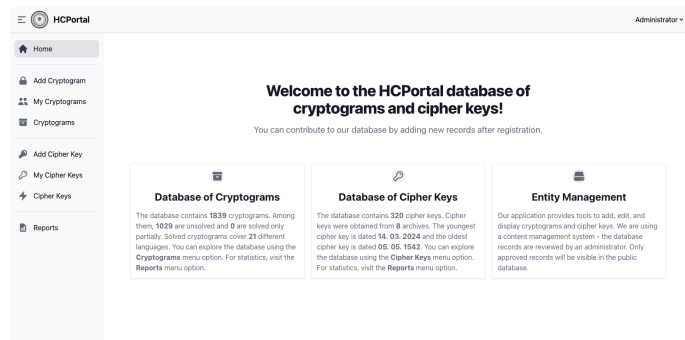


Obr. 2: Repozitár

3.2 Rozloženie a hlavná stránka

Uvodná web stránka, je prvá stránka, ktorá sa zobrazí návštevníkovi portálu. Táto stránka zobrazuje základné informácie

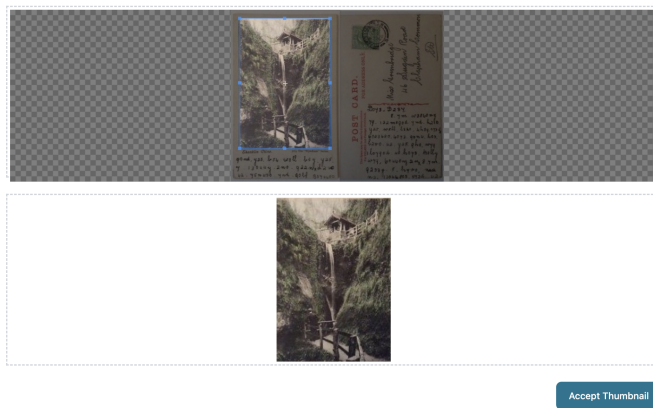
o databázach historických kryptogramov a šifrovacích kľúčov (Obr. 3). Na ľavej a vrchnej časti aplikácie je pripojená navigácia, ktorá obsahuje prechody do ostatných častí aplikácie. V ľavom hornom rohu sa nachádza tlačidlo, pomocou ktorého je možné zmeniť bočnú navigáciu. V prípade mobilného zariadenia, sa prechody zobrazujú v hornej časti navigácie. V pravej časti navigácie, sa nachádza informácia o aktuálne prihlásenom používateľovi. Po kliknutí na toto tlačidlo sa zobrazí jeho celé meno, email a tlačidlo s možnosťou odhlásenia sa.



Obr. 3: Úvodná web stránka

3.3 Formulár pre vytvorenie, editáciu a klonovanie entity

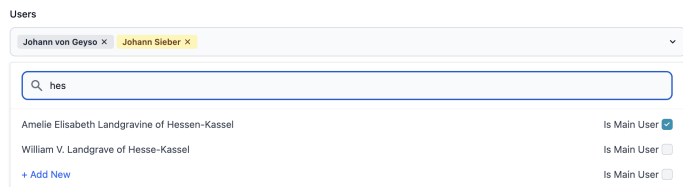
Pre formulárove vstupy, používame nasledovné komponenty. Pre vytvorenie náhľadového obrázku sme vytvorili komponent, pomocou ktorého používateľ dokáže orezať obrázok (Obr. 4). Súčasťou tohoto komponentu je zobrazovanie orezanej časti v reálnom čase tak, ako bude vyzerat tento obrázok v detaile entity.



Obr. 4: Komponent na orezanie obrázkov

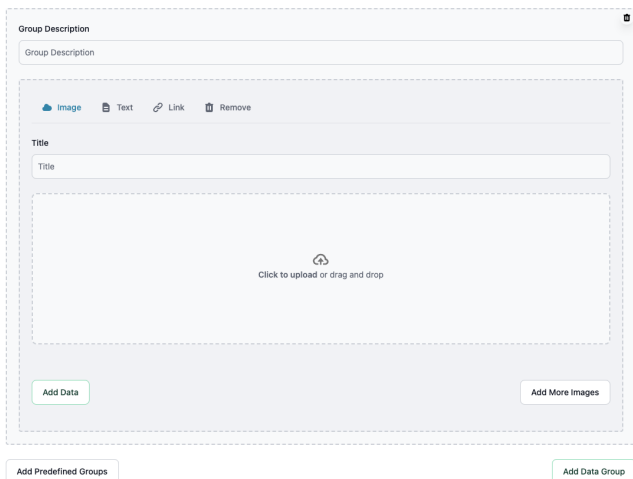
Ďalším komponentom je dropdown (Obr. 5), ktorý obsahuje viacero možností konfigurácie. Dropdown obsahuje textový vstup, pomocou ktorého sa filtrujú jednotlivé položky v dropdown. V prípade, že žiadna z položiek nevyhovuje hľadaniu, existuje možnosť pridania novej položky. Táto funkcionálna sa dá zapnúť alebo vypnúť pre jednotlivé vstupy

podľa potreby. Ďalšou voliteľnou funkciou je prídanie metadát k jednotlivým položkám dropdown. Každá položka obsahuje check box, kde sa po zaškrtnutí pridajú metadáta k hodnote dropdown. Dropdown môže byť konfigurovaný ako multiselect alebo ako select s jednou možnosťou. V prípade multiselectu, sa hodnoty ukladajú vedľa seba, kde v prípade pridaných metadát hodnotu rozlišujeme farebne.



Obr. 5: Dropdown

Ostatné časti formuláru sú tvorené základnými formulárovými vstupmi. Formulár pre kryptogramy obsahuje zložený komponent *datagroup*, ktorý v sebe obsahuje komponenty *data* (Obr. 6). Datagroup obsahuje textový vstup pre nadpis. Komponent data je zložený z textového vstupu a ďalšieho vstupu podľa výberu používateľa, ktorý môže byť typu *image*, *link* alebo *text*. Jedna datagroup môže obsahovať viacero komponentov typu data. Používateľ má možnosť v rámci jednej datagroup nahráť viacero obrázkov zo súboru, pričom sa nadpis automaticky predvyplní z názvu súboru s obrázkom. Okrem toho formulár umožňuje pridať aj preddefinované datagroupy, kde sa vygenerujú tri datagroupy s jedným komponentom data v každom z nich.

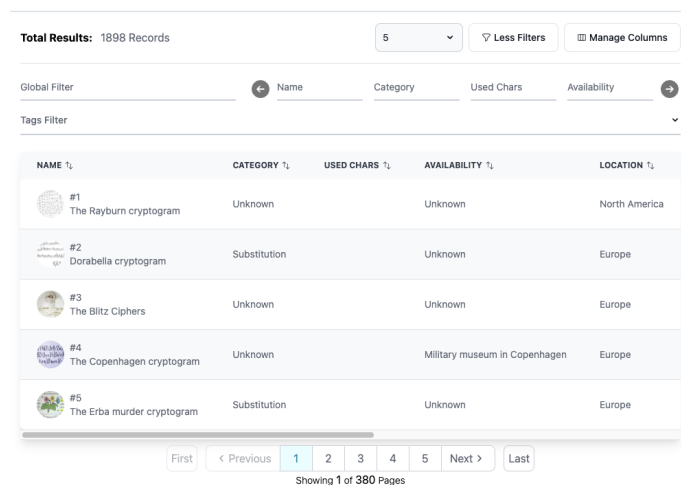


Obr. 6: Komponenty datagroup a data

Pre vkladanie obrázkov pre šifrovacie kľúče, sme vytvorili podobný komponent, ku ktorému sa pridávajú ďalšie metadáta a to textový vstup *key structure* a checkbox *has instructions*. Formulár pre šifrovacie kľúče disponuje rovnakou funkcionalitou nahratia viacerých obrázkov zo súboru, kde sa pre každý obrázok vygeneruje samostatný komponent spolu s možnosťou zadania metadát.

3.4 Filtrovanie entít

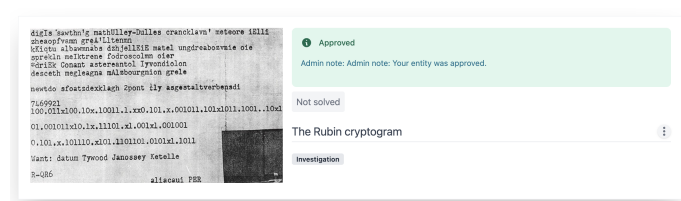
Filtrovanie entít sme sa rozhodli implementovať zaujímavejšou cestou. Vytvorili sme tabuľku (Obr. 7), ktorá má defaultne zobrazený obmedzený počet stĺpcov. V pravom hornom rohu tabuľky, sa vygeneruje pre každý stĺpec filter, kde môže používateľ vyhľadávať v rámci konkrétneho stĺpca. Pridanou funkcionalitou je, že existuje možnosť vytvoriť si vlastnú konfiguráciu zobrazenia stĺpcov, kde používateľ v modálnom okne zadá konkrétne stĺpce pre zobrazenie. Tieto stĺpce môže ľubovoľne zoradovať a filtrovať. Používateľ je taktiež schopný obmedziť alebo zvýšiť počet vylistovaných entít na jednu stranu.



Obr. 7: Hlavná tabuľka a filtrovanie entít

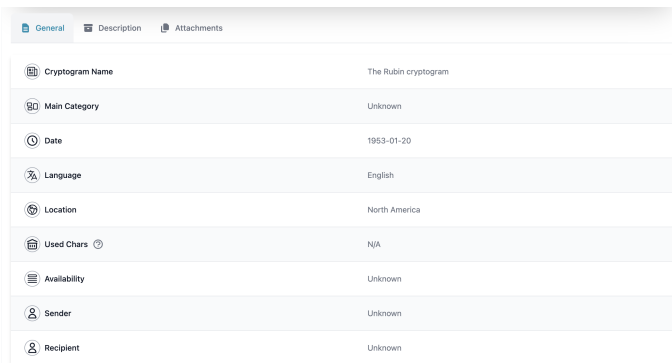
3.5 Zobrazenie detailu

Detail entity sa skladá zo štyroch častí: *hlavička* (Obr. 8), *všeobecné informácie* (General tab, vid' Obr. 9), *popis* (Description tab) a *prílohy* (Attachments tab, vid' Obr. 10). Na ľavej strane hlavičky, sa nachádza klikateľný náhľadový obrázok. Po kliknutí na obrázok sa otvorí modálne okno, v ktorom používateľ dokáže priblížiť detail náhľadového obrázku. Ďalej sa v detaily nachádza políčko pre zobrazenie stavu kryptogramu, toto políčko mení farbu na základe stavu. Zelená farba prislúcha stavu *approved*, modrá *pending*, červená *rejected*, a žltá *revise*. Pod políčkom na zobrazenie stavu, sa nachádza nadpis a sortovacie tagy. Na pravo od nadpisu, sa nachádza menu s možnosťami klonovať, editovať, alebo exportovať entitu do PDF súboru.

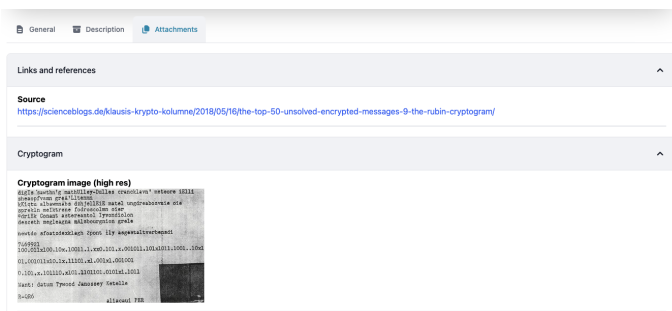


Obr. 8: Hlavička detailu

Ďalšou časťou detailu je zobrazenie všeobecných informácií entity. Tieto informácie sa zobrazujú v prvom tabe, v tabuľkách, kde riadok tabuľky sa skladá z ikony, názvu a hodnoty. Nad každým obrázkom sa zobrazuje tooltip, ktorý presnejšie popisuje význam daného riadku. Druhý tab prislúcha popisu zadávanému cez html editor. Posledný tab zobrazuje datagroups a obrázky priložené k šifrovacím kľúčom. Dáta sa rozdelujú do akordeónov na základe typu. V prípade obrázkov, existuje možnosť zobraziť náhľadový obrázok v modálnom okne, podobne ako v hlavičke detailu. Poslednou možnosťou v menu je zobrazenie galérie, kde sa zobrazujú všetky priložené obrázky k detailu, vrátane náhľadového obrázku z detailu.



Obr. 9: Všeobecné informácie

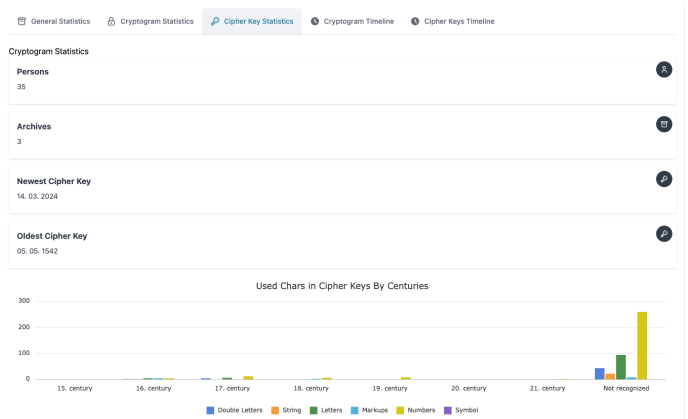


Obr. 10: Prílohy

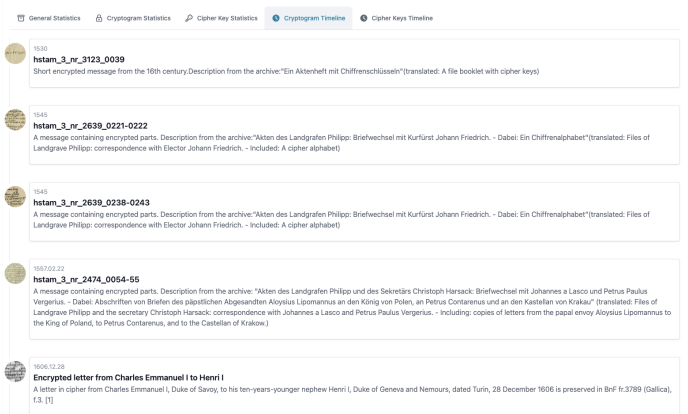
3.6 Štatistický web

Štatistický web slúži na prehľad rôznorodých informácií (štatistík) o záznamoch z databázy. Na zobrazenie štatistík sme využili dva hlavné komponenty: histogram a komponent na zobrazenie počtov. Web obsahuje päť záložiek, do ktorých sme štatistiky rozdelili. Prvá záložka obsahuje všeobecné štatistiky, ktoré zahŕňajú počty kryptogramov, šifrovacích kľúčov a dostupných archívov. V histograme sú zobrazené počty entít podľa storočia, krajiny, jazyka a použitých znakov. Ďalšie dva taby sú zamerané na konkrétny typ entity. V záložke pre kryptogramy zobrazujeme počty odosielateľov a príjemcov kryptogramov, najnovší a najstarší kryptogram. V histograme sú kryptogramy rozdelené podľa storočia a kontinentov. V záložke pre šifrovacie kľúče (Obr. 11) zobrazujeme podobné informácie: počet osôb, počet dostupných archívov kľúčov,

najnovší a najstarší kľúč. V histograme je rozdelenie podľa storočia a použitých znakov v kľúčoch. Posledné dva taby sú implementácia časovej osi (Obr. 12), kde sú zoradené entity podľa dátumu používania.



Obr. 11: Štatistika záznamov - záložka pre šifrovacie kľúče



Obr. 12: Štatistika záznamov - časová os kryptogramov

4 Záver

V závere mojej práce, by som chcel zdôrazniť úspešnú implementáciu aplikácie, ktorá zohľadňuje navrhnuté požiadavky, pripomienky a odporúčania od medzinárodných expertov v oblasti kryptografie. Nová aplikácia prináša vylepšenia v oblasti používateľského rozhrania a používateľského zážitku, poskytuje vylepšené vyhľadávanie v záznamoch a správu entít v databáze.

Prvým cieľom práce bolo navrhnuť nové používateľské rozhranie, ktoré sme navrhovali v dizajnerskom nástroji Figma. Pri návrhu a implementácii sme použili knižnicu Flowbite, ktorá obsahuje predštylované komponenty. Pre implementáciu aplikácie sme použili knižnicu React a najnovšie štandardy formátovania komponentov pomocou hooko-v. Súčasťou implementácie bolo upravenie existujúcej API, kde sme optimalizovali niektoré z koncových bodov.

Vedľajšími cieľmi práce bolo implementovať niektoré z požadovaných vylepšení administrátorského rozhrania, ktoré

sa nám takisto podarilo úspešne implementovať a tak zvýšiť kontrolu nad údajmi uloženými v databáze.

Pod'akovanie

Touto cestou by som sa chcel poďakovať za pomoc a rady pri písaní tejto práce, Ing. Eugenovi Antalovi, PhD.

Literatúra

- [1] ANTAL, Eugen; ZAJAC, Pavol. HCPortal overview. In: MEGYESI, Beáta. HistoCrypt 2020. Linköping: University Electronic Press, 2020, s. 18–20. ISBN 978-91-7929-827-2.
- [2] ANTAL, Eugen; ZAJAC, Pavol. HCPortal modules for teaching and promoting cryptology. In: DAHLKE, Carola. HistoCrypt 2021. Linköping: University Electronic Press, 2021, s. 1–11. ISBN 978-91-7929-026-9.
- [3] SOVIČ, Tomáš a kol. Portál historických šifriero, Tímový projekt, FEI STU, 2017.
- [4] GRECH, Erik a kol. HCPortal 2.0 Tímový projekt, FEI STU, 2018.
- [5] MUCSKA, Attila a kol. Spracovanie šifrovacích kľúčov pre HCPortal, Tímový projekt, FEI STU, 2022.
- [6] LAPČÁK, Juraj a kol. Spracovanie šifrovaných správ pre HCPortal, Tímový projekt, FEI STU, 2022.
- [7] MUCSKA, Attila. Integrácia nových funkcionalít do HCPortal. Diplomová práca. 2023.

Rýchly heuristický algoritmus pre optimálne farbenie 3D mriežkových grafov s rôznymi diagonálnymi uhlopriečkami

Noémi Herbrik

Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave

xherbrik@stuba.sk

Abstrakt – Príspevok sa zaoberá problémom vrcholového farbenia 3D mriežkových grafov s rôznymi diagonálnymi uhlopriečkami. Práca zahŕňa opis dvoch už existujúcich algoritmov (DSATUR a Pažravý algoritmus) a návrh vlastného riešenia, založeného na výpočte farieb vrcholov pomocou vektorových operácií. Vzájomné porovnanie všetkých algoritmov je vyhodnotené experimentálnym testovaním. Výsledky testov dokazujú, že medzi skúmanými metódami nový algoritmus vypočíta optimálne riešenie najefektívnejšie.

1 Úvod

Farbenie grafov je kombinatorický problém, ktorý je známy už vyše sto rokov. Ako algoritmická optimalizačná metóda našlo farbenie viaceré aplikácie, najčastejšie napr. v oblasti plánovania a rozdeľovania zdrojov ekonomickej, príp. technickej povahy [1], alebo v oblasti efektívneho numerického riešenia parciálnych diferenciálnych rovníc [4].

Optimálne zafarbenie daného grafu sa formuluje ako najmenší počet farieb, ktorými je možné zafarbiť všetky vrcholy uvedeného grafu tak, že žiadne dva susedné nemajú rovnakú farbu. Opísaný problém patrí medzi tzv. NP-úplné problémy. Znamená to, že všetky známe optimálne exaktné algoritmy farbenia pre všeobecné grafy majú exponenciálnu časovú zložitosť, ak $P \neq NP$. (Otvorený problém P versus NP patrí medzi tzv. Millennium Prize Problems; za správne riešenie každého je vypísaná odmena 1 mil. dolárov, pozri [5].)

Existujú však triedy grafov, pre ktoré je možné navrhnúť polynomiálny a súčasne optimálny algoritmus farbenia vrcholov. Konkrétne, ak pre graf existuje optimálne zafarbenie s 2 farbami, tak tento graf sa dá zafarbiť (optimálne) algoritmom s polynomiálnou časovou zložitosťou. Všetky takéto grafy sú tzv. bipartitné – obsahujú dve disjunktné množiny vrcholov, nazývané bipartície. Každá bipartícia sa dá zafarbiť jedinou farbou, lebo medzi jej vrcholmi neexistujú žiadne hrany. Špeciálnym prípadom bipartitných grafov sú kružnice párne dlžky (teda s párnym počtom vrcholov), ktoré sú tým pádom optimálne zafarbiteľné rovnako, ako bipartitné grafy.

Ak sú na optimálne zafarbenie grafu potrebné aspoň 3 farby, tak algoritmus pre takýto graf vo všeobecnosti nie je polynomiálny (ak $P \neq NP$). Výnimkou sú iba kružnice s nepárnou dlžkou a dvojrozmerné (t.j. 2D) mriežkové grafy s diagonálnymi hranami (pozri [4]).

Z uvedeného vyplýva, že štruktúra grafov ovplyvňuje správanie sa grafových algoritmov, napr. aj v otázke ich časovej zložitosti. V ideálnom prípade sa problém farbenia, pôvodne NP-úplný, môže zjednodušiť na problém, patriaci do triedy P , a to obmedzením množiny vstupov na špecifickú triedu grafov.

V tejto práci sa zameriame na hypotézu, či uvedenú vlastnosť (t.j. príslušnosť k triede P vzhľadom na problém farbenia) majú aj trojrozmerné (skrátene 3D) mriežkové grafy s rôznym rozložením diagonálnych hrán. Uvedenú triedu opíšeme v tomto článku. V práci navrhujeme experimentálne riešenie, konkrétne algoritmus, nazvaný „Algebraický“ (skrátene AA). Princíp činnosti AA je založený na tom, že pre farbenie 3D mriežkových grafov s diagonálnymi hranami je možné cyklicky opakovať vhodný vzor zafarbenia vrcholov. Využitie takejto myšlienky implikuje dobré vlastnosti aj vzhľadom na optimalitu riešenia aj vzhľadom na časovú zložitosť, čo bolo overené experimentálne. Navyše v porovnaní s dvoma známymi algoritmi (DSATUR a Pažravý algoritmus) vychádza náš algoritmus ako najlepší pre úlohu farbenia horeuvedenej triedy grafov.

Táto práca je rozdelená na 5 kapitol. V kapitole 2 sú spomenuté a vysvetlené teoretické pojmy súvisiace s danou problematikou. Kapitola 3 obsahuje opis dvoch už existujúcich algoritmov farbenia grafov a návrh a opis vlastného riešenia pod názvom „Algebraický algoritmus“. Výsledky testovania a porovnávaní skúmaných algoritmov sú uvedené v kapitole 4.

2 Definície

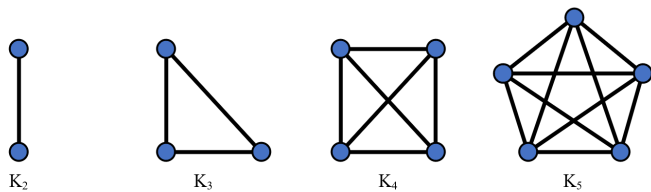
2.1 Teória grafov

Neorientovaný graf, alebo stručne len graf, je usporiadaná dvojica $G = (V, E)$. Prvky množiny V sa nazývajú *vrcholy* grafu G . Prvky množiny E sa nazývajú *hrany* grafu G a zodpovedajú dvojprvkovým podmnožinám množiny V .

Ak $h = \{u, v\}$ je hrana, (čiže hrana h spája vrcholy u a v) tak hovoríme, že tieto vrcholy *incidujú* s hranou h a aj naopak, hrana h *inciduje* s vrcholmi u a v . Ak $h = \{u, v\}$ je hrana, tak tieto vrcholy sa nazývajú *susedné*. Množina susedných vrcholov patriace k vrcholu v sú označené $\Gamma(v)$.

Stupeň vrchola u v grafe G je počet hrán, ktoré s vrcholom u incidujú. Stupeň vrchola u označujeme $\deg(u)$.

Kompletný (úplný) graf na n vrcholoch sa označuje K_n , a je to graf s n vrcholmi, ktorý obsahuje hranu medzi ľubovoľnými



Obr. 1: Kompletné grafy

dvoma rôznymi vrcholmi. Kompletný graf K_n má $n \cdot (n - 1)/2$ hrán. Príklad je uvedený na obrázku 1. Graf $G' = (V', E')$ sa nazýva *podgraf grafu* $G = (V, E)$, ak platí $V' \subseteq V$ a $E' \subseteq E$. *Klika* je taká podmnožina vrcholov $C \subseteq V$, v ktorej všetky vrcholy spolu susedia: $\forall u, v \in C, \{u, v\} \in E$.

Podmnožina N množiny V sa nazýva *nezávislá množina vrcholov* grafu G , ak žiadne dva vrcholy z množiny N nie sú susedné.

2.2 Farbenie grafov

Ak $G = (V, E)$ je graf, tak k -farbenie grafu G je zobrazenie $c : V \rightarrow \{1, \dots, k\}$. Farbenie c sa nazýva *regulárne*, ak pre každú hranu $e \in E, e = uv$ platí $c(u) \neq c(v)$. *Chromatické číslo* $\chi(G)$ grafu G je minimálne číslo k také, že existuje regulárne k -farbenie G . Problém optimálneho zafarbenia grafov je NP-ťažký, ak $P \neq NP$ [1].

Dolný odhad chromatického čísla reprezentuje také číslo, ktoré je menšie alebo sa rovná minimálnemu počtu farieb, potrebných na zafarbenie grafu G . Na určenie dolných odhadov existujú nasledujúce spôsoby.

V prípade, že G obsahuje kompletý graf K_j , potom na regulárne zafarbenie grafu G je potrebné použiť aspoň j farieb. Nech $\omega(G)$ označuje počet vrcholov, ktoré sa nachádzajú v najväčšej klike v G . V niektorých prípadoch sa $\omega(G)$ nazýva aj *klikové číslo*. Pretože na zafarbenie tejto kliky bude potrebných $\omega(G)$ rôznych farieb, platí nerovnosť $\chi(G) \geq \omega(G)$.

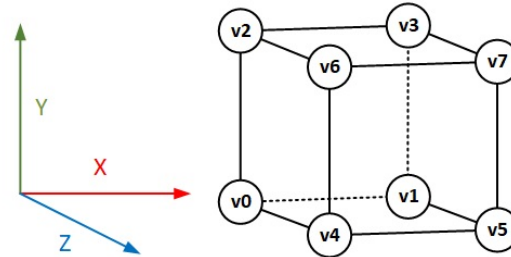
Ďalší spôsob je z pohľadu nezávislých množín. Nech $\alpha(G)$ označuje číslo vrcholevej nezávislosti grafu G , definované ako počet vrcholov v najväčšej nezávislej množine v G . V tomto prípade $\chi(G)$ musí byť aspoň $\lceil n/\alpha(G) \rceil$. Vyššie spomenuté odhady je možné skombinovať do nasledujúcej nerovnosti:

$$\chi(G) \geq \max\{\omega(G), \lceil n/\alpha(G) \rceil\}. \quad (1)$$

2.3 3D mriežkový graf

V teórii grafov je *mriežkový* alebo *siet'ový* graf takým grafom, ktorého kresba (grafické zobrazenie), vložená do nejakého euklidovského priestoru \mathbb{R}^t ($t \geq 2$), tvorí pravidelnú mriežku. Ak m, n, r sú kladné celé čísla, tak označenie tohto typu grafov v priestore \mathbb{R}^3 je $G_{m,n,r}$, kde dolné indexy zodpovedajú počtu vrcholov použitých pre karteziánsky súčin.

V tejto práci sa zaoberáme konkrétne 3D mriežkami $G_{m,n,r}$. Množinu vrcholov $V(G_{m,n,r})$ tvoria usporiadané trojice (i, j, k) , kde $0 \leq i \leq m-1, 0 \leq j \leq n-1$ a $0 \leq k \leq r-1$. Ak $u = (u_i, u_j, u_k)$ a $v = (v_i, v_j, v_k)$ sú dva vrcholy z $V(G_{m,n,r})$, tak Hammingova



Obr. 2: Základná 3D mriežka, kde súradnice jednotlivých vrcholov sú nasledovné: $v_0 = (0,0,0), v_1 = (1,0,0), v_2 = (0,1,0), v_3 = (1,1,0), v_4 = (0,0,1), v_5 = (1,0,1), v_6 = (0,1,1), v_7 = (1,1,1)$.

vzdialenosť vrcholov u, v je definovaná nasledovne:

$$dist_H(u, v) = |u_i - v_i| + |u_j - v_j| + |u_k - v_k|. \quad (2)$$

Prvkami množiny hrán $E(G_{m,n,r})$ sú všetky neusporiadané dvojice $\{u, v\}$ medzi vrcholmi u, v , vtedy a len vtedy ak $dist_H(u, v) = 1$.

Najmenšia možná mriežka je ilustrovaná na obrázku 2, kde vrcholy grafu sú číslované v_0 až v_7 . Základnú 3D mriežku je možné rozšíriť rôznymi diagonálnymi uhlopriečkami, ďalej nazývané ako *aditívne* uhlopriečky. Zoznam týchto hrán a ich označenie je uvedený v tabuľke v dodatku. Spomenuté hrany sú ešte rozdelené do 2 skupín:

- "stenové", označené " F_i ",
- a "diagonálne", označené " D_j ".

Použitím *aditívnych* uhlopriečok je možné vytvoriť 1024 rôznych možností (obmien) 3D mriežkových grafov.

3 Algoritmy na farbenie grafov

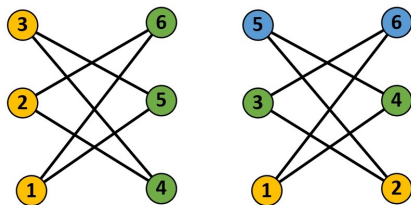
Prehľad existujúcich algoritmov vrcholevého farbenia grafov je uvedený napr. v literatúre [1, 3].

Najpoužívanejšie algoritmy sú napr. DSATUR, pažravý algoritmus, farbenie s opakovaným odstraňovaním vrcholov, prehľadávanie so spätným návratom, farbenie grafov zlepovaním vrcholov, sekvenčné farbenie grafov s výmenou farieb, farbenie úplným prehľadávaním, Matulov algoritmus a farbenie pomocou nezávislých množín. Algoritmus DSATUR sa súčasnosti považuje za jeden z najlepších heuristických algoritmov.

Algoritmus pre vstupný graf G vráti optimálne riešenie k , ak $k = \chi(G)$. V prípade ak $k > \chi(G)$, riešenie nazýva suboptimálne. V tejto práci navrhne nový algoritmus pre farbenie 3D mriežkových grafov s diagonálnymi hranami, nazvaný „Algebraický algoritmus“. Jeho vlastnosti porovnáme s pažravým algoritmom a s algoritmom DSATUR.

3.1 Pažravý algoritmus

Pažravý (*Greedy*) algoritmus je jedným z najjednoduchších, ale najzákladnejších heuristických algoritmov na farbenie grafov.



Obr. 3: Farbenie toho istého grafu pomocou pažravého algoritmu s použitím rôznych poradí vrcholov. Vľavo je znázornené optimálne zafarbenie.

Funguje tak, že berie vrcholy jeden po druhom podľa nejakého usporiadania a každému vrcholu priradí uje prvú dostupnú farbu. Usporiadanie vrcholov môže byť podľa nejakého princípu alebo aj ľubovoľné.

Pretože metóda je heuristická, riešenie ktoré produkuje, môže byť suboptimálne. Pažravý algoritmus dokáže vypočítať optimálne riešenie pre akýkoľvek graf, ak je daná správna postupnosť vrcholov. V dôsledku toho boli navrhnuté rôzne algoritmy farbenia grafov, ktoré sa snažia nájsť optimálne usporiadanie vrcholov.

Na obr. 3 je možné vidieť, aký je význam výberu správneho poradia vrcholov pri použití pažravého algoritmu.

3.2 Algoritmus DSATUR

Algoritmus DSATUR (skrátene z anglického "degree of saturation") funguje na základe pažravej metódy v tom, že berie každý vrchol postupne podľa nejakého usporiadania, potom priradí tento vrchol do prvej vhodnej farebnej triedy a v prípade potreby vytvorí nové farebné triedy. Rozdiel medzi pažravým algoritmom a algoritmom DSATUR spočíva v spôsobe, ako sú vrcholy usporiadané. DSATUR sa rozhoduje heuristicky pri výbere vrchola, ktorý sa má zafarbiť, a to na základe charakteristík aktuálneho čiastočného farbenia grafu. Táto voľba je založená na úrovni nasýtenia vrcholov, čo je definované nasledovne.

Nech $c(v) = NULL$ pre akýkoľvek vrchol $v \in V$, ktorý ešte nie je priradený do farebnej triedy. Vzhľadom na takýto vrchol v , jeho úroveň nasýtenia, označená $sat(v)$, je počet rôznych farieb priradených susedným vrcholom. To znamená, že:

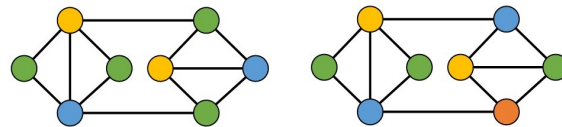
$$sat(v) = |\{ c(u) : u \in \Gamma(v) \wedge c(u) \neq NULL \}|. \quad (3)$$

Napriek tomu, že DSATUR je optimálny pre určité typy grafov, skutočnosť, že problém farbenia grafov je NP-tiažký znamená, že DSATUR nie je schopný vypočítať optimálne riešenie pre všetky grafy. Príklad je uvedený na obr. 4.

3.3 Algebraický algoritmus

Vlastný algoritmus farbenia 3D mriežkových grafov s diagonálami, nazvaný „Algebraický algoritmus“ (skrátene AA), bol implementovaný na základe nájdenia vhodného multiplikačného vektora $\mathbf{mv} = [m0, m1, m2]$.

Získanie možných multiplikačných vektorov bolo uskutočnené pomocou algoritmu 1, ktorý pracuje s vygenerovanými



Obr. 4: Optimálne 3-farbenie (vľavo) a suboptimálne 4-farbenie (vpravo) vytvorené pomocou algoritmu DSATUR (prevzaté z [1]).

Algoritmus 1 VygenerujVektor($G \leftarrow 3D$ mriežkový graf)

```

 $vl \leftarrow [1, 2, 3, 4, -1, -2, -3, -4]$ 
for all  $[i, j, k] \leftarrow (vl \times vl \times vl)$  do
    Zafarbi  $G$  pomocou vektora  $[i, j, k]$ 
    if  $G$  je správne zafarbené then
        return  $[i, j, k]$ 
    end if
end for

```

trojprvkovými variáciami celých čísel. Algoritmus 1 bol otestovaný všetkými možnými obmenami 3D mriežkových grafov (1024) a výsledný zoznam možných multiplikačných vektorov obsahuje 33 jedinečných vektorov. Ako príklad uvádzame vektor $\mathbf{mv} = [1, -2, 3]$, ktorý sa používa pri zafarbení 3D mriežkových grafov s 4 rôznymi množinami diagonálnych hrán. Kvôli stručnosti uvádzame iba jeden z týchto prípadov, a to s množinou diagonálnych hrán $[F0, F1, F2, F3, F4, F5, D0, D2, D3]$.

Algebraický algoritmus pozostáva z dvoch častí:

- predvýpočet - nájdenie správneho multiplikačného vektora,
- zafarbenie vstupného grafu.

Predvýpočet algoritmu obsahuje tri kroky. Jeho neformálny opis je uvedený v nasledujúcom odstavci.

Vstup: graf $G_{n,m,r}$, ktorý treba zafarbiť

Výstup: multiplikačný vektor $\mathbf{mv} = [m0, m1, m2]$

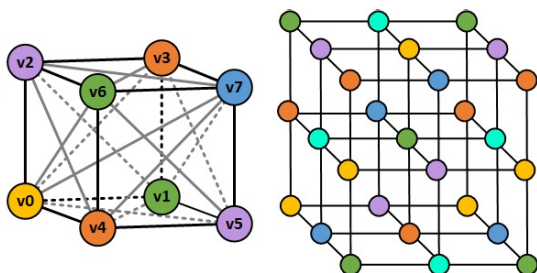
- vytvorí 3D graf $G_{2,2,2}$ s rovnakými hranami (aj diagonálnymi) ako vstupný graf,
- zistí povolený počet farieb ℓ pomocou nájdenia najväčšej kliky v grafe a vypočíta $\omega(G_{2,2,2})$,
- pomocou algoritmu 2 nájde vhodné farbenie vo vytvorenom grafe.

Tri prípady (A, B, C), ktoré je potrebné rozlišovať v algoritme 2 vysvetlíme podrobnejšie. Nech T je množina, ktorá obsahuje 5 prípadov diagonálnych hrán. Uvedené sú v tabuľke 1.

- Prípad A predstavuje všetky možnosti diagonálnych hrán okrem tých, ktoré sú zahrnuté v množine T . Spolu je to 1019 prípadov.
- Prípad B predstavuje 4 prípady s diagonálnymi hranami v tvare $[F0, F1, F2, F3, F4, F5, X]$, kde $X \in \{D0, D1, D2, D3\}$.

Tab. 1: Špeciálne prípady diagonálnych hrán

Zoznam diagonálnych hrán	Prípád v Alg. 2
[F0, F1, F2, F3, F4, F5, D0]	B
[F0, F1, F2, F3, F4, F5, D1]	B
[F0, F1, F2, F3, F4, F5, D2]	B
[F0, F1, F2, F3, F4, F5, D3]	B
[F0, F1, F2, F3, F4, F5]	C



Obr. 5: Farbenie 3D mriežkového grafu, v ktorom sú použité pridané hrany [F0, F1, F2, F3, F4, F5, D3].

- Prípád C predstavuje jedínú možnosť, a to so zoznamom diagonálnych hrán [F0, F1, F2, F3, F4, F5].

Algoritmus ďalej používa zoznam multiplikačných vektorov M , ktorý obsahuje všetkých 33 vektorov, ktoré boli vypočítané algoritmom 1.

Algoritmus 2 NájdenieSprávnehoVektora($G_{2,2,2}$)

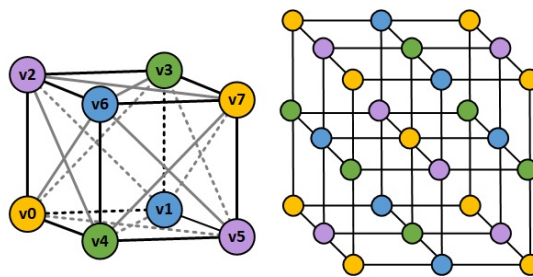
```

 $\ell \leftarrow \omega(G_{2,2,2})$ 
if prípad A then
  for all  $\mathbf{mv} \leftarrow M$  do
    zafarbi  $G_{2,2,2}$  použitím vektora  $\mathbf{mv}$  a rovnice (4)
    if  $G_{2,2,2}$  je správne zafarbené then
      return  $\mathbf{mv}$ 
    end if
  end for
else if prípad B then
   $\ell \leftarrow \omega(G_{2,2,2}) + 1$ 
  for all  $\mathbf{mv} \leftarrow [[1, 2, 3], [1, -2, 3]]$  do
    zafarbi  $G_{2,2,2}$  použitím vektora  $\mathbf{mv}$  a rovnice (4)
    if  $G_{2,2,2}$  je správne zafarbené then
      return  $\mathbf{mv}$ 
    end if
  end for
else if prípad C then
  zafarbi  $G_{2,2,2}$  použitím vektora [3, 2, 1] a rovnice (5)
  return [3, 2, 1]
end if

```

V prípade A algoritmus 2 iteruje cez zoznamu možných multiplikačných vektorov, kým nenájde vhodné farbenie v grafe $G_{2,2,2}$. Farba jednotlivých vrcholov v grafe je vypočítaná pomocou vzťahu:

$$c(v) = (x * m2 + y * m1 + z * m0) \text{ mod } \ell, \quad (4)$$



Obr. 6: Farbenie 3D mriežkového grafu, v ktorom sú použité pridané hrany [F0, F1, F2, F3, F4, F5].

kde vrchol $v = (x, y, z)$, $\mathbf{mv} = [m0, m1, m2]$ a ℓ označuje číslo povoleného počtu farieb, určeného v algoritme v závislosti na konkrétnom prípade (buď A alebo B).

Prípád B sa týka zafarbenia 3D mriežok, v ktorých graf obsahuje všetky "stenové" hrany a iba jednu (ľubovoľnú) "diagonálnu" hranu. Uvedený problém je možné ďalej rozdeliť na základe veľkosti grafu:

- ($G_{2,2,2}$) - nemá vhodný multiplikačný vektor. V tomto prípade sa optimálne farbenie grafu získa buď vopred definovaným (fixným) farbením alebo pomocou Pažrávého algoritmu.
- ($G_{r,r,r}$), kde $r > 2$ - farbu vrchola je vypočítané pomocou vzťahu (4), ale na rozdiel od prípadu A platí $\ell = \omega(G_{2,2,2}) + 1$ a zoznam možných multiplikačných vektorov pozostáva iba z dvoch prvkov (pozri Algoritmus 3).

Na obrázku 5 je vidieť, že $G_{2,2,2}$ má správne farbenie použitím 5 farieb čo sa rovná $\omega(G)$, kým $G_{3,3,3}$ vyžaduje aspoň 6 farieb.

Prípád C sa vzťahuje k optimálnemu farbeniu iba jedného prípadu, a to ak sú v grafe obsiahnuté všetky "stenové" hrany, t.j. [F0, F1, F2, F3, F4, F5]. Optimálne farbenie 3D mriežky je zobrazené na obrázku 6, pričom je použitý vzťah:

$$\begin{aligned}
 a &= (x * m2) \text{ mod } (2 * m2) \\
 b &= (y * m1) \text{ mod } (2 * m1) \\
 c &= (z * m0) \text{ mod } (2 * m0) \\
 c(v) &= (c + (a + b) * i) \text{ mod } \ell,
 \end{aligned} \quad (5)$$

kde $v = (x, y, z)$, $\mathbf{mv} = [m0, m1, m2]$ a $\ell = \omega(G_{2,2,2})$ a pre i platí:

$$i = (-1)^{(z \text{ mod } 2)}. \quad (6)$$

Znamená to, že i reprezentuje kladné alebo záporné znamienko tak, že i je kladné, ak z je párne a opačne.

Použitím uvedených podmienok algoritmus AA dokáže nájsť správne multiplikačné vektory a zafarbiť graf s minimálnym počtom farieb. Samotný algoritmus cyklicky farbí všetky vrcholy podľa jednotlivých prípadov A, B, C. Schematickým zápisom je vyjadrený v algoritme 3.

Kvôli efektívnejšiemu fungovaniu bol tento algoritmus implementovaný tak, že algoritmus 2 a algoritmus 3 boli zlúčené do jediného celku. Kvôli prehľadnosti sme jeho vysvetlenie ponechali v dvoch častiach.

Algoritmus 3 Farbenie Grafu(G , mv)

```

for all  $v \leftarrow V(G)$  do
  if prípad A then
     $\ell = \omega(G_{2,2,2})$ 
    zafarbi  $v$  použitím vektora  $mv$  podľa (4)
  end if
  if prípad B then
     $\ell = \omega(G_{2,2,2}) + 1$ 
    zafarbi  $v$  použitím vektora  $mv$  podľa (4)
  end if
  if prípad C then
     $\ell = \omega(G_{2,2,2})$ 
    zafarbi  $v$  použitím vektora  $mv$  podľa (5)
  end if
end for
    
```

4 Experimentálne výsledky

Testovanie a porovnanie algoritmov DSTATUR, Pažravý a AA je uvedené v tejto kapitole.

4.1 Korektnosť a optimálnosť

Na dosiahnutie relevantných výsledkov vo všetkých 1024 prípadoch boli testované grafy s 8, 27 a 64 vrcholmi, teda $G_{2,2,2}$, $G_{3,3,3}$ a $G_{4,4,4}$. Príslušné výsledky sú uvedené v tabuľkách 2, 3 a 4.

Na základe testov vieme, že pomocou nájdenia najväčšej kliky v grafe a vypočítaním $\omega(G)$, je možné overiť minimálny počet farieb, potrebných na optimálne zafarbenie vstupných grafov. Sumarizácia výsledkov ukazuje, že Algebraický algoritmus dáva vždy optimálne riešenie, DSATUR rieši problém s priemernou úspešnosťou 97,43%. Pažravý algoritmus vypočíta optimálne riešenie priemerne v 43,86% prípadoch. Kvôli veľkej náročnosti testovania pre väčšie grafy už výsledky pre $G_{5,5,5}$ a algoritmy DSATUR a Pažravý nie sú uvedené. Algoritmus AA bol otestovaný aj pre všetky prípady $G_{5,5,5}$ a $G_{6,6,6}$ a vo všetkých bolo výsledkom optimálne riešenie. Vzhľadom na princíp činnosti tohto algoritmu je možné predpokladať, že aj pre ešte väčšie grafy by malo byť vypočítané riešenie optimálne.

Tab. 2: Výsledky testovania v grafe $G_{2,2,2}$

Algoritmus	Optimálne riešenie	Suboptimálne riešenie
Greedy	662	362
DSATUR	1022	2
AA	1024	0

Tab. 3: Výsledky testovania v grafe $G_{3,3,3}$

Algoritmus	Optimálne riešenie	Suboptimálne riešenie
Greedy	343	681
DSATUR	1009	15
AA	1024	0

Tab. 4: Výsledky testovania v grafe $G_{4,4,4}$

Algoritmus	Optimálne riešenie	Suboptimálne riešenie
Greedy	342	682
DSATUR	962	62
AA	1024	0

4.2 Časová zložitosť

V druhej časti testovania boli všetky tri algoritmy porovnané na základe časovej zložitosti. Počas týchto testov už boli použité väčšie grafy s rozmermi od $G_{10,10,10}$ do $G_{200,200,200}$. Pri týchto testoch boli použité iba vybrané prípady 3D mriežkových grafov, ktoré sú nasledovné:

- [F0, F1, F2, F3, F4, F5, D0] - Pažravý algoritmus používa 10-11 farieb, DSATUR 8 a AA používa 6,
- [F0, F1, F2, F5, D1] - Pažravý algoritmus potrebuje 9 farieb, DSATUR a AA zhodne 4,
- [F0, F2, F4, D0, D1, D2] - Pažravý algoritmus používa 9-10 farieb, DSATUR 7 a AA potrebuje 6.

Tabuľky 5, 6 a 7, zobrazujú trvanie výpočtov pre jednotlivé algoritmy. Rozdelenie do tabuliek je vykonané na základe rôznych prítomností diagonálnych hrán. Časy boli určené tak, že každý algoritmus bol spustený pre tie isté vstupy 10-krát za sebou. Experimentálne a výpočtom sme zistili, že závislosť medzi počtom vrcholov vstupu a priemerným časom behu algoritmu AA je približne lineárna (teoretická analýza vedie k rovnakému výsledku). Na základe údajov z tabuliek vychádza, že Pažravý algoritmus a AA majú približne rovnaký čas výpočtu, ale AA vychádza pre dané merania vždy ako rýchlejší. Algoritmus DSATUR vychádza ako najpomalší pre uvedené testy.

Tab. 5: Výsledky testovania v prípade [F0, F1, F2, F3, F4, F5, D0]

Graf	Greedy	DSATUR	AA
$G_{10,10,10}$	0:00:00.03	0:00:00.24	0:00:00.02
$G_{20,20,20}$	0:00:00.22	0:00:02.40	0:00:00.16
$G_{50,50,50}$	0:00:03.60	0:00:50.87	0:00:02.38
$G_{100,100,100}$	0:00:30.20	0:08:35.77	0:00:19.36
$G_{200,200,200}$	0:03:59.46	1:23:44.22	0:02:38.37

Tab. 6: Výsledky testovania v prípade [F0, F1, F2, F5, D1]

Graf	Greedy	DSATUR	AA
$G_{10,10,10}$	0:00:00.02	0:00:00.19	0:00:00.02
$G_{20,20,20}$	0:00:00.16	0:00:01.74	0:00:00.13
$G_{50,50,50}$	0:00:02.49	0:00:33.58	0:00:02.07
$G_{100,100,100}$	0:00:19.36	0:05:03.33	0:00:16.61
$G_{200,200,200}$	0:02:39.88	0:45:33.92	0:02:17.36

Tab. 7: Výsledky testovania v prípade [F0, F2, F4, D0, D1, D2]

Graf	Greedy	DSATUR	AA
$G_{10,10,10}$	0:00:00.02	0:00:00.22	0:00:00.02
$G_{20,20,20}$	0:00:00.27	0:00:02.17	0:00:00.14
$G_{50,50,50}$	0:00:03.46	0:00:43.45	0:00:02.25
$G_{100,100,100}$	0:00:25.86	0:06:45.78	0:00:18.09
$G_{200,200,200}$	0:03:25.56	1:04:14.38	0:02:28.45

5 Záver

Cieľom nášho výskumu bolo opísať triedu 3D mriežkových grafov s rôznym rozložením diagonálnych hrán ako aj charakterizovať túto triedu vzhľadom na problém regulárneho vrcholového farbenia. Uvedená nekonečná trieda grafov obsahuje spolu 1024 rôznych možností prítomnosti diagonálnych hrán. Navrhli sme vlastný algebraický algoritmus, ktorý dokáže korektné zafarbiť uvedenú 3D grafovú štruktúru v polynomiálnom čase. Pre všetky testované prípady náš algoritmus dokázal nájsť optimálne zafarbenie. Z toho v 1020 prípadoch išlo o zafarbenie, pre ktoré bol počet použitých farieb rovný klikovému číslu daného grafu, teda $\omega(G)$, a v 4 prípadoch bol počet použitých farieb $\omega(G) + 1$.

Navyše sme náš algoritmus porovnali so známymi heuristickými algoritmi (DSATUR a Pažravý algoritmus). Na základe experimentov sme zistili, že ani Pažravý algoritmus, ani DSATUR nevypočítajú optimálne riešenie vo všetkých prípadoch pre uvedenú triedu 3D mriežkových grafov, a teda nie sú lepšie ako náš algoritmus. Súčasne, aj vzhľadom na časovú zložitosť, sa náš algoritmus zdá byť ako najlepší.

Z uvedených výsledkov vyplýva, že skúmaná 3D mriežková grafová štruktúra je pravdepodobne novou nekonečnou triedou, ktorá je optimálne zafarbitel'ná v polynomiálnom čase. Potvrdiť túto domnienku je ale možné, až na základe formálneho matematického dôkazu.

Literatúra

- [1] R. M. R. Lewis. A Guide to Graph Colouring: Algorithms and Applications. 1. vydanie. Springer Cham, ISBN 978-3-319-25730-3, 2015.
- [2] J. Kollár a M. Polakovič. Diskrétna matematika pre študentov aplikovanej informatiky FEI STU. 1. vydanie, 2019.
- [3] L. Kučera. Kombinatorické algoritmy. SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983.
- [4] M. Nehéz. Minimization of parallel phases performed in the numerical computation of a certain type of PDE. In: *Mathematics, Information Technologies and Applied Sciences 2022*, NOVÁK, Michal; HRUBÝ, Miroslav (Editors). Brno: University of Defence, 2022, s. 62–69. ISBN 978-80-7582-185-0. <https://mitav.unob.cz/data/MITAV2022.pdf#page=62>
- [5] Clay Mathematics Institute: The Millennium Prize Problems <https://www.claymath.org/millennium-problems/>

Dodatok

Vizualizácia	Označenie	Vektor
	F0	(1,-1,0), (-1,1,0)
	F1	(1,1,0), (-1,-1,0)
	F2	(0,1,-1), (0,-1,1)
	F3	(0,1,1), (0,-1,-1)
	F4	(1,-1,0), (-1,1,0)
	F5	(1,1,0), (-1,-1,0)
	D0	(1,-1,1), (-1,1,-1)
	D1	(1,1,-1), (-1,-1,1)
	D2	(-1,1,1), (1,-1,-1)
	D3	(1,1,1), (-1,-1,-1)

Sekcia 2

Mechatronika

Elektromechanický návrh batériového modulu pre elektrickú formulu

Alexander Lazorík¹

¹ Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave

xlazorik@stuba.sk

Abstrakt – V článku sa zameriavame na návrh modulu pre batériový systém elektrickej formule, s dôrazom na zlepšenie výkonu, spoľahlivosti a vyrobiteľnosti. Analyzovali sme technické požiadavky monopostu, poznatky z predošlého batériového systému a dostupné batériové články, aby sme vytvorili čo najvhodnejší návrh. Zvolili sme vhodnú metódu zvárania kontaktov článkov a navrhli obal optimalizovaný pre 3D tlač. Na základe návrhu sme modul vyrobili a zhodnotili výsledok.

1 Úvod

Zvýšený dopyt po elektrických autách viedol k výraznému pokroku v batériových systémoch a batériách ako takých. Ako napreduje vývoj, nové batérie sú ľahšie, kompaktnější, bezpečnejšie, poskytujú vyššiu hustotu energie a dlhšiu životnosť. Batériový systém výrazne ovplyvňuje výkon, cenu, jazdné vlastnosti a aj hmotnosť auta. V konečnom dôsledku sú tieto veci veľmi dôležité pre celkový dojazd vozidla, podľa ktorého sa dnešné autá porovnávajú.

Pri návrhu takéhoto systému je dôležité určiť, na čo bude daný systém slúžiť a čo by mal splňať. Podľa toho sa volí typ batérií, materiály použité na konštrukciu, konfigurácia a následný tvar mechanického obalu (boxu) systému, ktorý by mal byť praktický uložený a dostupný kvôli výmene alebo servisovateľnosti. [1]

1.1 Lítium-iónové batériové články

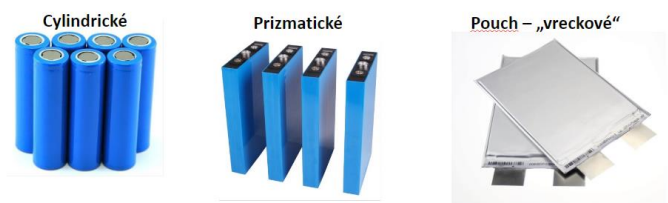
V súčasnosti dominujú v oblasti mobilnej elektroniky, elektromobilov a skladovania energie lítium-iónové články. Ich výhodou je, že dosahujú oveľa vyššiu hustotu energie ako porovnateľné články na trhu. Zvyčajne pracujú pri väčšom nominálnom napätí v porovnaní s inými (3,2 V až 3,8 V). Lítium-iónové články majú okrem vyššieho napätia a hustoty energie aj nižšiu rýchlosť samo-vybíjania. [2] Ich nevýhodou je vyššia cena, nižšia úroveň bezpečnosti a citlivosť na prevádzkové podmienky, kedy pri ich nedodržaní môže dôjsť k poškodeniu, prípadne výbuchu.

1.1.1 Typy článkov

Existujú tri hlavné typy lítium-iónových článkov (Obr. 1), čo sa týka ich fyzického formátu: cylindrické, prizmatické a vreckové články.

Cylindrické môžu byť mechanicky zaťažiteľné, kvôli ich pevnému obalu, avšak nevyužívajú priestor batériového

systému tak efektívne. Prizmatické a vreckové články majú plochý tvar, čím vedú efektívnejšie využiť priestor a vďaka ich tvaru sú aj jednoduchšie na chladenie. Vreckové články sú však kvôli ich tenkému obalu menej odolné voči nárazom a vibráciám. Pokiaľ ide o plug-in hybridy (PHEV) a batériové elektrické vozidlá (BEV) väčšina výrobcov používa buď prizmatické alebo vreckové články. [2] [3]



Obr. 1 Tri formáty lítium-iónových článkov. [4]

1.2 Batériové systémy v elektrických vozidlách

Batériový systém v elektromobiloch je zodpovedný za poskytovanie elektrickej energie potrebnej na pohon vozidla.

Nachádzajú sa v ňom batériové články, ktoré uchovávajú elektrickú energiu a dodávajú ju do elektrického motora. Môžu mať rôzne chemické zloženie pre dosiahnutie požadovaných vlastností. Taktiež musí obsahovať systém riadenia batérie (BMS), ktorý monitoruje napätie, teplotu a riadi stav batérie aby boli články dobíjané a vybíjané v bezpečnom rozsahu. Ďalšie súčasti zahŕňajú teplotný manažment, elektroniku, elektrotechnické, mechanické a bezpečnostné prvky, ktoré kontrolujú prevádzku vozidla a udržiavajú optimálnu teplotu batérií. Vodiče a konektory sú tiež súčasťou systému, zabezpečujú prenos energie medzi jednotlivými komponentmi.

Batériové systémy môžu byť nízkonapäťové, strednonapäťové alebo vysokonapäťové, podľa využitia. Články sú vždy zapojené v sériovo-paralelných topológiách, ktoré si rozoberieme v kapitole 1.3.2. [2]

1.3 Kritéria a postup pri návrhu

Pri návrhu batériového systému, je potrebné definovať o aký typ aplikácie ide. Aplikácie v ktorých využívame batérie môžu byť buď energeticky náročné, výkonovo náročné, alebo požadovať kompromis medzi týmito dvoma základnými vlastnosťami. Následne je potrebné zvážiť niekoľko faktorov, ako napríklad veľkosť, typ, maximálnu a minimálnu kapacitu batériového článku, spotrebu energie, a podobne. [2]



Obr. 2 Ukážka batériového systému firmy BYD [2]

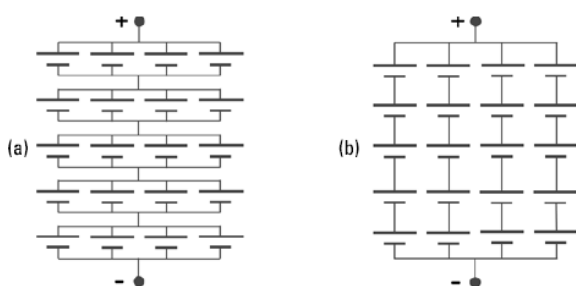
1.3.1 Mechanická časť

Batériové systémy musia byť vo vozidle umiestnené v tzv. batériovom boxe tak, aby odolávali mechanickému zaťaženiu a vibráciám počas bežného používania vozidla a boli bezpečné v prípade zrážky. Batériový box by mal byť odolný proti vniknutiu vody, prachu a externému poškodeniu. Mal by byť schopný efektívne odvádzať teplo a tým zabrániť prehriatiu batérií. [3] V praxi sa systémy častokrát kvôli servisovateľnosti a ľahšej manipulácii delia na moduly, čo bude aj náš prípad.

1.3.2 Elektrická časť

Pri návrhu je potrebné určiť napätie, ktoré požaduje naša aplikácia, aby sme mohli späťne určiť, koľko článkov potrebujeme na dosiahnutie daného napätia. Požadované menovité napätie, spolu s nominálnym napätím článku určuje počet článkov, ktoré sa musia kombinovať v sériovom zapojení. Po určení najvhodnejšieho počtu sériových článkov pre potreby danej aplikácie, môžeme určiť počet článkov potrebných paralelne, na splnenie celkovej potrebnej energie.

Poznáme dve základné topológie prepojenia článkov. V elektromobiloch je štandardom najprv prepojiť články paralelne a následne do série. Toto je takzvaná topológia P pred S, ako je znázornené na obrázku Obr. 3(a). Opačná topológia S pred P je znázornená na obrázku Obr. 3(b). [5]



Obr. 3 Príklad topológií prepojenia článkov [5]

1.3.3 Teplotný manažment

Ako bolo spomenuté, batériový systém je vybavený systémom riadenia teploty, ktorý musí udržiavať batériu v rámci prevádzkových teplotných limitov článku, pre čo najlepší výkon, životnosť a bezpečnosť. Pri návrhu teplotného systému je potrebné zvážiť jeho efektívnosť, vzhľadom na dodatočné náklady a hmotnosť, ktorú pridá do batériového systému. Ak teplota článku príliš stúpe, systém môže znížiť výkonové limity, aby sa obmedzila rýchlosť nabíjania/vybíjania, čo zníži tvorbu tepla v článkoch.

Pri výbere typu chladenia je potrebné zvážiť, či bude výkon chladenia dostatočný. Chladenie vzduchom je lacnejšie a jednoduchšie. Chladenie kvapalinou je zložitejšie, ťažšie a náchylnejšie na netesnosti, ale chladí články efektívnejšie a rovnomernejšie vďaka vysokej tepelnej kapacite kvapaliny v porovnaní so vzduchom. [5]

2 Návrh batériového systému elektrickej formule

STUBA Green team je tím študentov Slovenskej Technickej univerzity, ktorý reprezentuje Slovensko na medzinárodnej súťaži Formula Student Electric, pre ktorú konštruje elektrickú pretekársku formulu. Účasť v tíme študentov učí inžinierskemu uvažovaniu a k práci v automobilovom priemysle. Súťaž ako taká je rozdelená do statických a dynamických disciplín. Endurance, jedna z dynamických disciplín, je 22 km trať jazdená dynamickým tempom, ktorá otestuje rýchlosť, efektívnosť, aj spoľahlivosť monopostu, tým pádom jej zvládnutie je cieľom návrhu batériového systému.



Obr. 4 Monopost STUBA Green Team – sezóna 2022

Návrh vychádza z požiadaviek elektrického systému monopostu, pravidiel, v ktorých sú spomenuté dôležité konštrukčné limitácie a našich cieľov, aby bol batériový systém jednoduchší na výrobu, mal čo najnižšiu hmotnosť a kompaktné rozmery.

2.1 Požiadavky a pravidlá

Diely vyrobené a použité v monopostoch sa musia riadiť pravidlami, ktoré sú jasne stanovené pred každou sezónou. Preto aj pri návrhu batériových systémov monopostov existuje niekoľko dôležitých pravidiel, ktoré treba brať do úvahy.

Každý modul batériového systému nesmie prekročiť maximálne statické napätie 120 VDC, maximálnu energiu 6 MJ a maximálnu hmotnosť 12 kg.

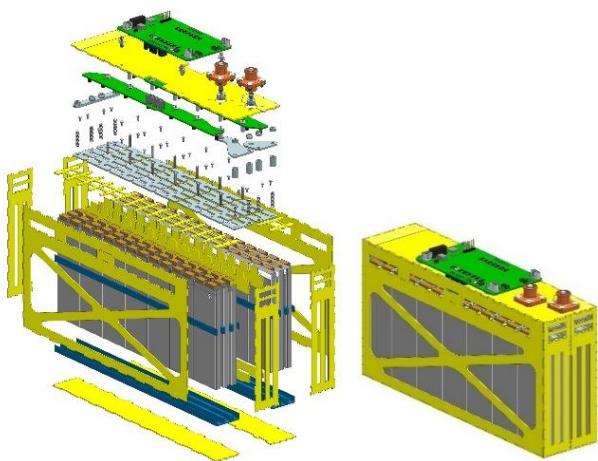
Všetky materiály systému ako aj všetky konštrukčné časti musia byť ohňovzdorné. Box musí byť vyrobený z ocele alebo hliníka. Moduly systému musia byť oddelené pevnou, elektricky izolujúcou a ohňovzdornou bariérou.

Samotný systém a montáž každého článku musí byť navrhnutá tak, aby vydržala nasledujúce zrýchlenia: 40 g v pozdĺžnom/laterálnom smere a 20 g vo vertikálnom smere (hore/dole). Vodivé kontakty vreckových článkov nesmú niesť mechanické zaťaženie. Vreckové články musia prenášať mechanické zaťaženie len na veľkých plochách.

Keďže sa pravidlá menia každý rok a na postavenie monopostu má tím len pár mesiacov, batériový systém musí byť jednoduchý a realizovateľný, pričom jeho životnosť môže byť nižšia ako pri komerčných vozidlách. Systém je uložený za jazdcom, v zadnej časti monopostu, čo limituje jeho rozmery. Na základe simulácií a skúsenosti s minuloročnými monopostami bolo určené, že výsledná energia batériového systému by sa mala pohybovať okolo 8kWh, aby sme splnili dojazd 22km. Jeho maximálne napätie vychádza z použitého pohonného systému, ktorý umožňuje až 720V, pravidlá ho však limitujú na 600V, pričom výkon je obmedzený na 80kW. Keďže jazdíme len v lete, nie je potrebné vyhrievanie, ale články musia byť chladené, aby sa zabránilo ich prehriatiu.

2.2 Analýza predošlého batériového systému

Analýzou predošlého batériového systému, resp. modulu (Obr. 5) sme zistili, aké boli jeho nedostatky a v ďalšej kapitole ukážeme ako sme tieto nedostatky v novom návrhu riešili. V roku 2022 sme vybrali článok Melasta SLPB694513HV, s konfiguráciou 140 sériovo a 3 paralelne, takže 420 článkov celkovo. Podrobnejšie informácie sú uvedené v Tab. 1. Systém sa skladal z 10 modulov s obalom z nehorľavého kompozitového materiálu FR4. Tento materiál je vyrobený z vrstvených sklenených vlákien impregnovaných živcou a používa sa prevažne na výrobu dosky plošných spojov(PCB). Jeho výhodou je odolnosť voči teplu a vlhkosti, mechanická pevnosť a schopnosť izolovať prúd. FR4 je relatívne jednoduchý na spracovanie čo nám pomohlo so skladaním dielov. Nevýhodou tohto materiálu bolo, že sme boli limitovaní 2D návrhom rovinných dielov a skladanie veľa dielov do 3D konštrukcie bolo prácne a vznikali nepresnosti.



Obr. 5 Batériový modul, sezóna 2022 – rozložený pohľad

Do zlepenej konštrukcie modulu boli následne osadené články s medzerou vymedzenou nehorľavou penou, aby sme zabezpečili prechod vzduchu medzi článkami.

Prepojenie článkov medzi sebou sme zabezpečili ultrazvukovým zváraním vodivých kontaktov článku na medené prípojnice. Tento typ zvárania funguje na princípe trenia a poskytuje kvalitné spoje, avšak je mechanicky namáhajúci a priestorovo náročný. Zároveň sa ukázalo, že pri zváraní 6 kontaktov na jednu prípojnicu sme narážali na limity ultrazvukového zvárania, a kontakt, ktorý bol najdlhšie vystavený vibráciám sa častokrát uvoľnil. Preto sme

prepojenia boli nútení dodatočne zväzať aj laserom. Vyrobený modul je na Obr. 6.

Batériový systém nám po otestovaní energeticky postačoval. Zistili sme, že bol mierne teplotne predimenzovaný a medzery pre chladenie medzi článkami neboli až tak potrebné. Konštrukcia z plochých FR4 dielov bola lacná a dostupná, ale limitujúca a prácna na výrobu. Ultrazvukové zváranie bolo náročné na implementáciu a svojimi priestorovými požiadavkami pridávalo objem a hmotnosť. Tieto nedostatky sme preto chceli novým návrhom odstrániť.



Obr. 6 Vyrobený modul batériového systému, sezóna 2022

2.3 Výber článku

Najdôležitejší krok pri návrhu batériového systému je výber správneho článku, ktorý ovplyvní všetky vlastnosti systému. Monopost, ako pretekárske vozidlo, má vyššie odoberané výkony v porovnaní s osobnými vozidlami, čo znamená, že články budú viac zaťažované. Vysokú prúdovú zaťažiteľnosť vieme dosiahnuť nízkym vnútorným odporom článkov resp. celého batériového systému. To taktiež prinesie menšie zahrievanie článkov a menší pokles napätia. Pri výbere chemického zloženia batérie, nízkym vnútorným odporom najviac vynikali lítium polymérové články (LiPo). Tie majú schopnosť poskytnúť vysoký výstupný prúd, pri zachovaní vyššej energetickej hustoty a nízkej rýchlosti samo-vybíjania, čím si dlhšie uchovávajú svoju energiu.

Ďalším krokom bol výber formátu článku. Prizmatický sme vylúčili kvôli veľkostiam článkov, celkovej hmotnosti systému, horšej dostupnosti a menšiemu výberu na trhu. Cylindrické články nám nevyhovovali kvôli ich limitovanému výberu kapacít, vďaka čomu sme sa nevedeli dostať na požadovanú energetickú hodnotu tak, aby sme mali hmotnostnú a rozmerovú výhodu v porovnaní s vreckovými článkami. Cylindrický článok je síce jednoduchší na mechanické uloženie a poskytuje lepší priestor na chladenie ale pre objemovú efektívnosť sme zvolili vreckové články. Ich výhodou je lepšia manipulácia a rovnomerné rozloženie tepla po celej ploche batérie. Nevýhodou môže byť, že tenký obal nedostatočne udrží tvar článku a postupnou degradáciou môže dôjsť k jeho rozpínaniu. Pri návrhu to je potrebné zohľadniť a navrhnúť dostatočujúce chladenie a priestor na rozpínanie, resp. mechanické uloženie, ktoré udrží tlak rozpínania. Prieskum ostatných popredných tímov v súťaži potvrdil tento výber.

Po prieskume ponúk niekoľkých výrobcov vreckových článkov sme nakoniec vybrali medzi výrobcami Melasta a Grepow, vid' Tab. 1. Článok Melasta 2022 sme použili v minuloročnom systéme, Grepow, Melasta V1 a V2 boli nami vytypované články, ktoré nám najviac vyhovovali pre aktuálny návrh. Zamerali sme sa na zníženie počtu paralelných článkov na 2, pre zníženie celkového počtu článkov a tým aj práci.

Tab. 1 Porovnanie doposiaľ použitých a zvažovaných LiPo batérií

Článok	Melasta (2022)	Grepow	Melasta V1	Melasta V2
Kapacita (mAh)	5200	7450	7450	7600
Hmotnosť (g)	88	124	124	122
Energ. hustota (Wh/kg)	224,55	228,31	228,31	236,72
Článkov paralelne	3	2	2	2
Max. napätie systému(V)	599,9	599,9	599,9	609
Max. prúd (A)	156	160,92	120	121,6
Pokles napätia (V)	12,76	17,39	14,30	16,01
Energia (kWh)	7,96	7,60	7,60	7,75
Hmotnosť celkovo (kg)	36,96	34,72	34,72	34,16

V Tab. 1 sme v rôznych konfiguráciách porovnávali kapacitu, energetickú hustotu, rozmery a hmotnosť článku tak aby nám návrh vyhovoval výkonovo, ale aj konštrukčne. Pri výbere sme snažili nájsť kompromis medzi hmotnosťou, výkonom a výslednými rozmermi batériového systému. Zvolili sme lítium-polymérový článok GRPA74214-15C 7450 mAh od firmy Grepow s konfiguráciou 140 článkov sériovo a 2 paralelne. Technickými parametrami bol skoro identický ako článok Melasta V1, avšak podstatne lacnejší.

2.4 Návrh modulu

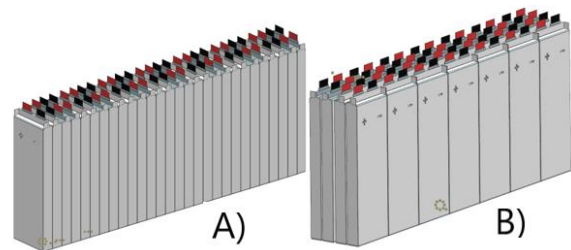
Cieľom návrhu bolo aby bol batériový systém oproti predošlej generácii jednoduchší na výrobu, tým pádom sme zvažovali aj iný druh zvárania, inú montáž modulu, menej článkov paralelne a snažili sa dosiahnuť nižšiu hmotnosť a rozmery. Pri konfigurácii 140 sériovo a 2 paralelne sme rozdelili systém na 10 modulov, ktoré budú sériovo prepojené a každý modul bude obsahovať jednu BMS riadiacu jednotku.

Návrh sme začali vhodným usporiadaním článkov, ktoré budú uložené v rámci jedného modulu. Zvažovali sme 2 možnosti usporiadania článkov v module (Obr. 7). Usporiadanie B) bolo inšpirované minuloročným modulom, pričom ale predstavuje viac podlhovastý tvar, ktorý nie je taký vhodný pre 3D tlač. Zároveň vyžaduje viac materiálu prípojnic na vytvorenie elektrických prepojení. Pri usporiadaní A) sme mohli vytvoriť oveľa menšie a ľahšie elektrické prepoje, a zároveň rozdeliť modul na polovicu a tým vytvoriť dva pol-moduly. Tým vznikla kompaktnější verzia (Obr. 8), s vyváženejšou dĺžkou strán. Jeden pol-modul zároveň tvorí základnú vymeniteľnú jednotku systému, čo zlepšuje servisovateľnosť.

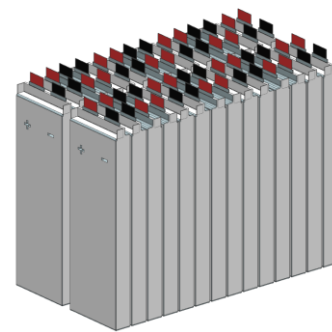
Ako kompenzáciu krehkosti vreckových článkov sme medzi články použili 1mm hrubú silikónovú penu od firmy Schlegel, typ S30-65-08F.

Ďalším krokom bolo vyriešiť prepojenie článkov. Prepojenie možno vyriešiť skrutkovým spojom alebo zváraním

vodivých kontaktov dokopy. Pri skrutkovom spoji môže vibráciami dôjsť k uvoľneniu spoja alebo nedostatočnému priľnutiu kontaktov a pridáva to extra komponenty, hmotnosť a s tým spojenú prácnosť výroby. V prípade poruchy je však článok ľahko vymeniteľný. [2] V našom prípade však nie je servisovateľnosť až tak dôležitá, preto sme primárne zvažovali zváranie. Nami zvažované možnosti boli predtým používané ultrazvukové a laserové zváranie. Laserové zváranie na rozdiel od ultrazvukového funguje na princípe žiarenia, bez priameho dotyku, jednostranne, čo znamená jednoduchšiu implementáciu aj proces výroby.

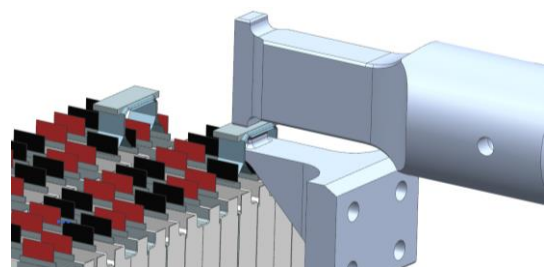


Obr. 7 Typy možných konfigurácií článkov



Obr. 8 Finálna rozdelená konfigurácia modulu

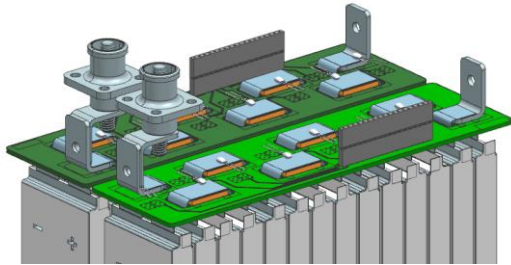
CAD modelovaním sme navrhli možnosti ako by sa mohli zvary vykonať a aké by mohli byť ich nedostatky. Pri ultrazvukovom zváraní (Obr. 9) by nastalo riziko, že zváracia nákovka nevojde pod medenú prípojnicu, alebo by prišla do kontaktu s článkom, čo by mohlo viesť ku skratu alebo poškodeniu článku. Táto možnosť je celkovo náročná na celý proces výroby.



Obr. 9 Návrh ultrazvukového zvárania

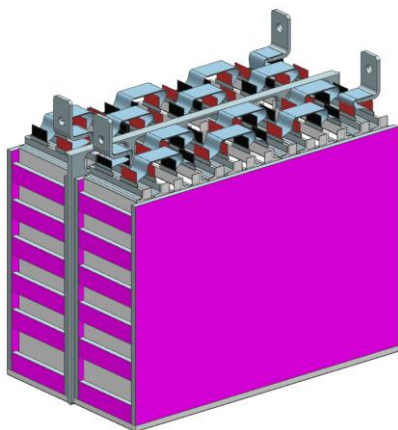
Pri laserovom zváraní by sme ostali pri rovnakom návrhu s použitím plochých medených prípojnic, ktoré by sa ale dajú jednoducho zapracovať do PCB (Obr. 10). Nie je totiž potrebné pevné podopretie a zváranie je bezkontaktné. Preto bol tento spôsob prepojenia vyhodnotený ako vhodnejší.

Po zvážení usporiadania a zvárania článkov prišiel na rad návrh obalu modulu, ktorý bude osadený v hliníkovom obale (boxe) batériového systému. Pred samotným návrhom sme do modelu ešte zapracovali predpokladaný tvar prepojovacej PCB a výstupný konektor Amphenol Surlok 120A (Obr. 10).



Obr. 10 Návrh možného zapojenia výstupných konektorov

Pre ochranu článkov pred mechanickým poškodením bola okolo nich navrhnutá silikónová pena s hrúbkou 3mm (rovnaká ako medzi článkami), ktorá bude na steny prilepená páskou PPI, typ TC 250B s hrúbkou 0,25mm (Obr. 11). Obe spĺňajú požadovanú normu nehorľavosti materiálu UL94 V-0.

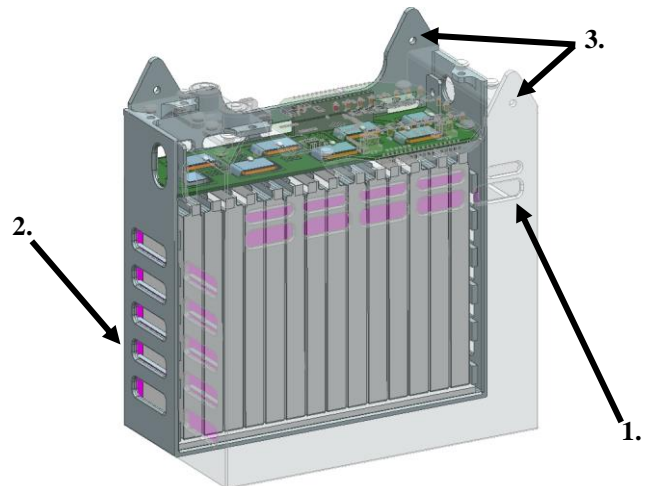


Obr. 11 Zobrazenie peny (sivá farba) a pásky (ružová farba) na module

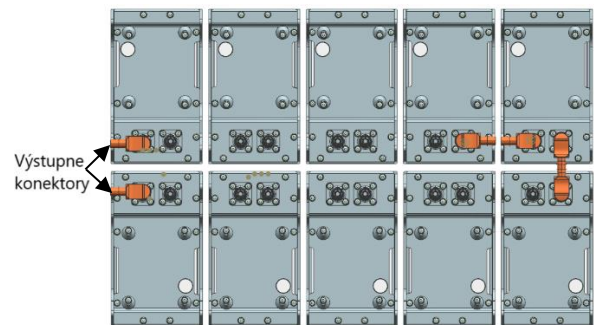
Tým sme prešli na návrh samotného 3D tlačeneho obalu modulu. Návrh obalu modulu bol primárne realizovaný kolegom, s ktorým sme spolupracovali. Obal modulu sa skladá zo 4 častí - ľavá a pravá zrkadlová časť, deliaca doska a horný kryt. Najprv sme začali hrubým návrhom a následne podľa modelu na Obr. 10 boli zapracované prechody na aktívne chladenie, umiestnenie BMS, úchyty na manipuláciu s modulom, diery na priskrutkovanie medených pripojníc a uchytenie krytu. Navrhnutý obal je vidieť na Obr. 12.

Diery na aktívne vzduchové chladenie ventilátormi sme umiestnili tak, aby vzduch chladil primárne PCB a kontakty článkov, kde by podľa našich skúseností malo vznikajú najväčšie teplo. Diery na užšej strane sú kvôli odľahčeniu a pevnostne nebudú ovplyvňovať integritu modulu. Pre manipuláciu sme taktiež vytvorili úchyty v každom rohu. Úchyty poslúžia aj na ukotvenie modulu v boxe a zamedzia samovoľnému pohybu.

Posledným krokom bolo navrhnuť celkové rozmiestnenie modulov v boxe (Obr. 13). Spojenie modulov do série je vyriešené už spomínanými konektormi Surlok.



Obr. 12 Finálny návrh modulu so zvýraznením pol-modulu (1.Otvory na aktívne chladenie; 2. Optimalizačné otvory; 3. Otvory na uchytenie modulu)



Obr. 13 Návrh rozloženia a pospájania segmentov v boxe

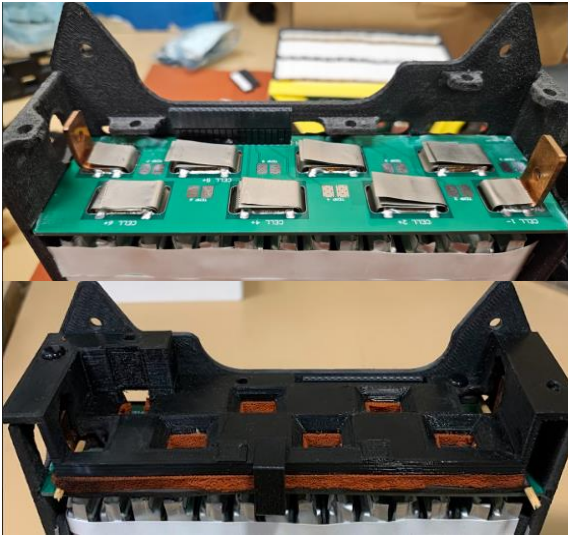
2.5 Výroba a montáž modulu

Ako bolo spomenuté na začiatku, rozhodli sme sa pre 3D tlačný obal modulu, pre ktorý bola podmienka ohňovzdornosti, ako predpisujú pravidlá. Výber týchto materiálov je obmedzený a súvisí s technológiou tlače. Kvôli dostupnosti a ceny materiálu sme vybrali materiál Z-240 od spoločnosti DIC Corporation. Tlačí sa FDM technológiou, ktorá materiál roztaví a nanáša ho vrstvu po vrstve. Nevýhodou je dlhší čas a nižšia kvalita tlače. V našom návrhu sme preto museli po prvom teste niektoré výrezy zväčšiť, keďže tlač zmenšila ich navrhované proporcie. Taktiež sme museli zväčšiť podporný materiál okolo úchytov na kryt, ktoré sa pri menšej záťaži ľahko odlomili (Obr. 14).



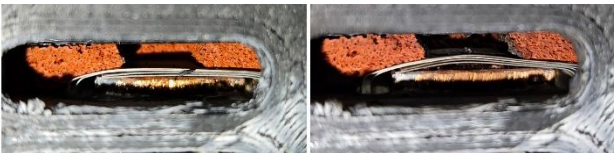
Obr. 14 Detail úchyty na obale s nízkou mechanickou pevnosťou (nutnosť dodatočného prilepenia)

Montáž modulu sme začali zlepením článkov do zostavy. Medzi články sme vložili 1mm izolačnú penu a nasadili prepojovacie PCB dosky. Vodivé kontakty článkov sme orezali, aby presne sedeli na medené prípojnice na PCB doske. Pre účely laserového zvárania sme navrhli prípravok, ktorý bol uchytený namiesto krytu a počas zvárania pritlačil vodivé kontakty o prípojnicu (Obr. 15).



Obr. 15 Modul pred a po osadení prípravku na zváranie

Pri zváraní sa odhalili nedostatky prípravku, keďže lúč pri zváraní páliť plastový materiál prípravku, ako aj oranžovú silikónovú penu, čo spôsobovalo sadze na kontaktoch a opotrebovanie prípravku. Ďalším nedostatkom bola slabá pritlačná sila prípravku na plochu kontaktov. Kvôli nej sa medzi kontakty a prípojnicu miestami dostal roztavený materiál a kontakty nadvihol, čím zmenšil plochu dotyku kontaktov o prípojnicu, ako je vidieť na Obr. 16.



Obr. 16 Detail na medenú prípojnicu pred a po zváraní

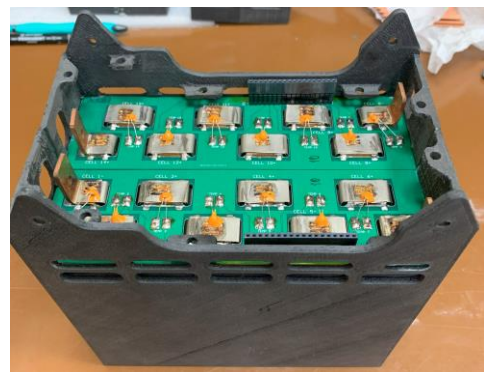
Po zváraní boli na kontakty článkov doplnené teplotné senzory a pol-moduly boli zlepené epoxidovým štruktúrnym lepidlom MG Chemicals 9200 FR. Po zlepení sme zistili, že moduly sú užšie, čo vyžadovalo úpravu šírky medeného prepojenia pol-modulov, ako aj konektorov BMS. Po úprave sme prepojili časti modulu, vložili kryt, osadili výkonové konektory, medenú prípojnicu na vnútorné prepojenie, a spoje zaskrutkovali poistnými maticami. Finálna podoba modulu bez krytu a BMS je zobrazená na Obr. 17.

3 Záver

V tomto článku bol opísaný komplexný elektromechanický návrh batériového modulu pre špecifickú a náročnú aplikáciu študentskej pretekárskej formuly STUBA Green Team. Najskôr sme zo špecifik aplikácie a pravidiel súťaže stanovili

požiadavky na návrh. Následne sme postupovali od výberu článku, cez konceptuálne rozloženie, až po detailný CAD návrh, vypracovaný a konzultovaný aj s ostatnými členmi projektu. Navrhnutý modul sa nám následne podarilo vyrobiť. Ďalej nás bude čakať testovanie modulu z elektrickej a teplotnej stránky, sfunkčnenie BMS, a nasadenie do vozidla.

Pri výrobe sme zistili niekoľko nedostatkov, na ktoré sa chceme zamerať pri ďalšej generácii. Materiál 3D tlače sa ukázal ako nedostatočný, keďže neposkytuje dostatočnú presnosť tlače a je náchylný na oddeľovanie vrstiev. Okrem toho sme pri laserovom zváraní zistili, že prípravok, ktorý používame, vytvára nedostatočnú pritlačnú silu a preto si bude vyžadovať vylepšenia. Použitú penu a pásku sa budeme snažiť nahradiť jedným materiálom, ktorý spĺňa ich vlastnosti. Návrh napriek tomu považujeme za jeden z najinovatívnejších v rámci histórie tímu a mal by spĺňať svoj účel.



Obr. 17 Finálna podoba vyrobeného modulu bez krytu

Pod'akovanie

Za pomoc pri vypracovaní návrhu a odborné rady ďakujem Ing. Martinovi Baťovi, za pomoc pri návrhu 3D tlačeného obalu Roderikovi Bakóvi, taktiež firme ZF, za 3D tlač obalu, firme Prvá Zváračská za laserové zváranie modulov a firme PPI, ktorá nám poskytla ohňovzdorné pásky.

Literatúra

- [1] JIUCHUN JIANG, C. Z. 2015. *Fundamentals and applications Handbook of Lithium-ion Batteries in electric drive vehicles*. ISBN 978-1-118-41478-1.
- [2] WARNER, J. 2015. *The Handbook of Lithium-ion Battery Pack Design - Chemistry, Components, Types and Terminology*. ISBN: 978-0-12-801456-1.
- [3] BAĽA, M. *Prednášky z predmetu Zdroje Energie pre Elektromobily*. 2023.
- [4] GIANFRANCO PISTOIA, B. L. Green Energy and Technology. In: *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Battery Health, Performance, Safety, and* USA: Springer, 2018 [cit. 2024-Marec-08]. ISBN 1865-3529.
- [5] SHRIRAM S. K. S., J. N., G.H. K., M. K., A. P. 2015. *Design and Analysis of Large Lithium-ion Battery Systems*. ISBN-13: 978-1-60807-713-7.

Edukačná aplikácia v programe MATLAB: Modelovanie dejov v PEMFC

Hortenzia Wollentová¹, Michal Miloslav Uličný¹

¹Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave

xwollentova@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa venuje vývoju edukačnej aplikácie v prostredí MATLAB zameranej na modelovanie vybraných dejov v palivových článkoch s polymérnou elektrolytickou membránou (PEMFC). Skúma polarizačnú krivku, napäťové straty, ktoré ovplyvňujú výkon palivového článku, hmotnostný transport a pokles tlaku v kanálikoch. Pomocou aplikácie môžu používatelia interaktívne študovať vplyv rôznych prevádzkových parametrov. Aplikácia tiež poskytuje nástroje pre vizualizáciu výsledkov simulácií, čím uľahčuje analýzu a interpretáciu údajov.

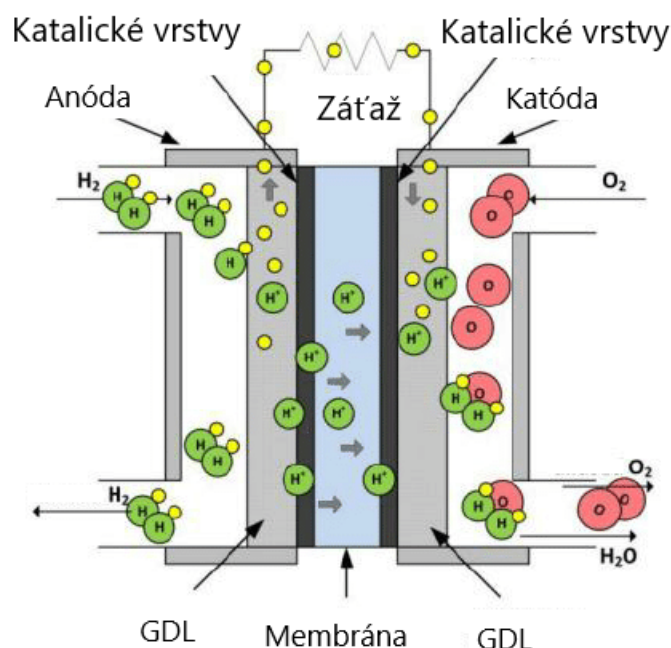
1 Úvod

Palivový článok je elektrochemické zariadenie na konverziu energie. Priamo premieňa chemickú energiu paliva (najčastejšie vodíka), čo sa dá vyjadriť Gibbsovou voľnou energiou, na elektrickú energiu [1].

Súčasný typy palivových článkov sa najčastejšie klasifikujú podľa druhu použitého elektrolytu. Patria sem metanolové palivové články (DMFC – Direct Methanol Fuel Cell), alkalické palivové články (AFC – Alkaline Fuel Cell), palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells), palivové články s uhličitanovou taveninou (MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell), palivové články s pevnými oxidmi (SOFC - Solid Oxide Fuel Cell), palivové články s polymérnou elektrolytickou membránou (PEMFC - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), ktorým sa práca venuje. Rôzne typy palivových článkov používajú rôzne typy iónov pre prenos náboja.

Tento príspevok sa venuje palivovému článku s polymérnou elektrolytickou membránou, ktorý používa pevný typ elektrolytu - naíon. Prevádzková teplota PEMFC je medzi 50 až 90 °C. Typicky nevydrží vysoké teploty, a nízka prevádzková teplota má za následok pomalé rýchlosti reakcií. Pomalú rýchlosť reakcie je potrebné prekonať použitím vysoko aktívnych katalyzátorov, ako je platina. Palivom je čistý vodík a elektrický výkon, ktorý produkuje, je typicky menej ako 250 kW [2].

V porovnaní s konvenčnými zdrojmi energie prinášajú PEMFC niekoľko výhod. Produktom pri priamej premene energie je voda, a teda sa nevyrábajú skleníkové plyny. Ekologická účinnosť (vyhodnotená na základe energetickej účinnosti a vyprodukovaných emisií) PEMFC je 96 % v porovnaní s naftovým motorom, ktorý má účinnosť 51 %.



Obr. 1: Elektrochemická reakcia v PEMFC [11]

Z tohto dôvodu sa považuje PEMFC za zelenú technológiu. Celková energetická účinnosť elektromobilov využívajúcich PEMFC je približne 40 %, čo je výrazne viac ako sú napr. spaľovacie motory s účinnosťou 22 %. Ešte vyššia celková účinnosť je dosiahnuteľná v aplikáciách, v ktorých sa okrem elektrickej energie využíva aj tepelná energia [3, 4].

2 Princíp PEMFC

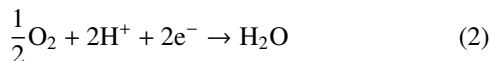
Základ PEMFC sa skladá z negatívne nabitej elektródy (anódy), pozitívne nabitej elektródy (katódy) a polymérnej elektrolytickej membrány. Vodík je oxidovaný na anóde a kyslík je redukovaný na katóde. Protóny vodíka sú transportované z anódy na katódu cez protónovo priepustnú membránu tvorenú skupinami peroxosírových kyselín s teflónovým základom. Elektróny sa pohybujú ku katóde cez vonkajší obvod, prúdia vodivým materiálom k záťaži. Na katóde reaguje kyslík s protónmi a elektrónmi vytvárajúc vodu a zároveň produkujú teplo.

Anóda aj katóda obsahujú katalyzátory (Pt_3Cr) k urýchleniu elektrochemických procesov [5, 6]. Reakcie na PEM palivovom článku opisujú nasledovné rovnice (1), (2) a (3) a schematicky sú zobrazené na Obr. 1:

Reakcia na anóde:



Reakcia na katóde:



Úplná reakcia:

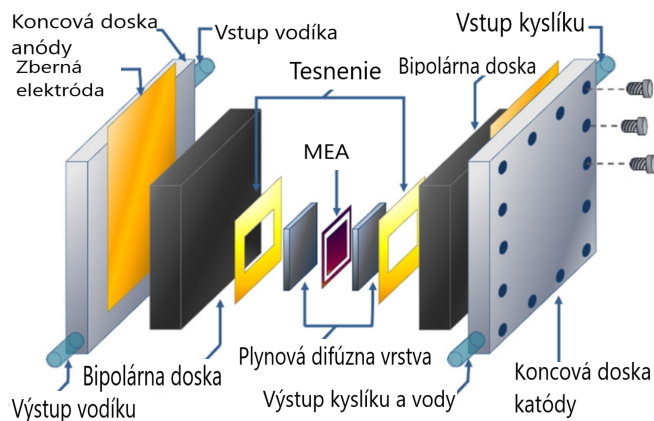


Vzniknutá voda a zbytkové teplo v palivovom článku, musia byť neustále odstraňované a môžu predstavovať kritické problémy pre PEM palivové články [5].

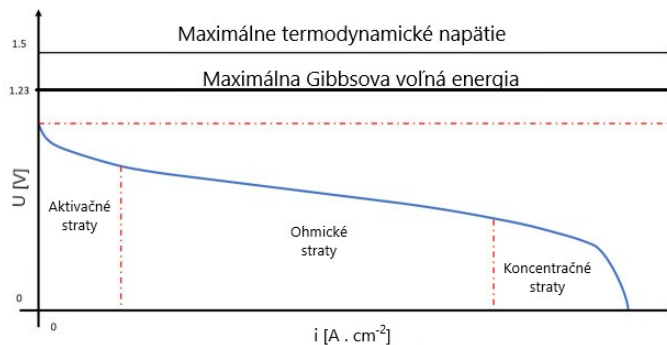
2.1 Komponenty

Ako ukazuje Obr. 2, jadrom PEM je elektrolyt - protónovo vodivá polymérna membrána. Tá je z oboch strán pokrytá katalytickou vrstvou často na báze platiny, kde prebieha hlavná chemická reakcia. Nasleduje plynovo difúzna vrstva (Gas Diffusion Layer - GDL), táto pórovitá vrstva tvorená uhlíkovým papierom alebo uhlíkovou tkaninou prepúšťa a plynové reaktanty ku katalytickej vrstve. Kombinácia polymérnej membrány, dvoch katalytických vrstiev a dvoch difúzných vrstiev sa nazýva Membrane Electrode Assembly (MEA). Vonkajšia vrstva palivového článku je tvorená bipolárnymi doskami s kanálikmi, ktoré slúžia pre rozvod plynových reaktantov smerom ku katalytickým vrstvám a tiež odvádzajú prebytočnú vodu.

Palivové články sa môžu zapájať do série a vytvárať tak palivový modul. Medzi palivové články sú vložené chladiace dosky, ktoré umožňujú prúdenie chladiacej kvapaliny a efektívne odvádzanie tepla. Palivový modul je z každej strany ohraničený koncovou doskou, ktorá plní mechanickú funkciu a drží jednotlivé palivové články pohromade. Tieto koncové dosky zabezpečujú stabilitu a celistvosť celého modulu [5].



Obr. 2: Komponenty PEM palivového článku [13]



Obr. 3: Polarizačná krivka PEMFC so znázornenými napät'ovými stratami [14]

2.2 Vybrané deje

PEMFC predstavuje zložitý systém, v ktorom prebieha množstvo dejov z rôznych oblastí, ktoré je možné rozdeliť na elektrochemické, tepelné a transportné. Vzhľadom na ich komplexnosť a rozmanitosť sa táto práca sústreďuje len na niektoré vybrané deje, ktoré majú kľúčový vplyv na výkon a efektívnosť palivového článku. Tieto deje boli namodelované a následne v edukačnej aplikácii v prostredí MATLAB.

Prvý vybraný dej je výkon PEMFC, ktorý je možné vyjadriť pomocou polarizačnej krivky, ktorá popisuje charakteristiku elektrického napätia článku voči elektrickému prúdu zaťaženiu a poukazuje tak na základné mechanizmy, ktoré obmedzujú výkon článku. Skutočné elektrické napätie článku klesá z teoretickej hodnoty elektrického napätia kvôli niekoľkým nevratným stratovým mechanizmom vyplývajúcim z termomechanických zákonov. Skutočné elektrické napätie (V_i) je definovaná ako rozdiel teoretického (reverzného) napätia (V_{rev}) a napät'ových strát článku (V_{irrev}) [5, 7].

$$V_i = V_{rev} - V_{irrev} \quad (4)$$

Tri hlavné typy strát, ktoré spôsobujú pokles napätia sú:

- aktivačné straty
- ohmické straty
- koncentračné straty

Jednotlivé napät'ové straty sú znázornené na polarizačnej krivke PEMFC, ktorú možno vidieť na Obr. 3. Pokles elektrického napätia možno vyjadriť súčtom všetkých typov strát:

$$V_{irrev} = v_{act_anode} + v_{act_cath} + v_{ohmic} + v_{conc_anode} + v_{conc_cath} \quad (5)$$

Kde v_{act} , v_{ohmic} , a v_{conc} reprezentujú aktivačnú, ohmickú, a koncentračnú napät'ovú stratu. Ako je vidieť v rovnici (5), aktivačné a koncentračné napät'ové straty sa vyskytujú na anóde aj katóde, zatiaľ čo ohmické napät'ové straty reprezentujú straty v celom palivovom článku. Aktivačné straty je možné vyjadriť aj jednoducho pomocou Tafelovej rovnice:

$$\Delta V_{act} = a + b \ln(j) \quad (6)$$

Kde j je prúdová hustota a a je konštanta, ktorá predstavuje pre-exponenciálny faktor v Tafelovej rovnici, ktorá je definovaná plynovou konštantou R , teplotou T , Faradayovou konštantou F , výmennou prúdovou hustotou j_0 a koeficientom prenosu náboja α , ktorý opisuje, aká časť elektrickej energie je použitá na prekonanie aktivačnej energie elektrochemickej reakcie:

$$a = -\frac{RT}{\alpha F} \ln(j_0) \quad (7)$$

b je Tafelov sklon, ktorý charakterizuje závislosť aktivačnej straty na hustote prúdu. Je definovaný vzťahom:

$$b = -\frac{RT}{\alpha F} \quad (8)$$

Rovnica pre aktivačný nadbytok anódy a katódy môže byť vyjadrená ako:

$$v_{act,anode} + v_{act,cath} = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{j}{j_0}\right)_{anode} + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{j}{j_0}\right)_{cath} \quad (9)$$

Kde n je počet vymenených protónov na mol reaktantu. [12].

Všetky komponenty palivového článku prispievajú svojim vnútorným elektrickým odporom k celkovému elektrickému odporu v palivovom článku. Ohmické straty zahŕňajú odpor v elektricky vodivých komponentoch (R_{elec}) a iónový odpor v elektrolyte (R_{ionic}). Toto možno zapísať ako:

$$v_{ohmic} = iR_{ohmic} = i(R_{elec} + R_{ionic}) \quad (10)$$

R_{ionic} dominuje v reakcii v rovnici (10), pretože iónový prenos je zložitejší ako prenos elektrického náboja. Ak sa zanedbá odpor v elektricky vodivých komponentoch (R_{elec}), tak je možné napísať:

$$\Delta v_{ohm} = iR_{ohmic} = jA_{cell}\left(\frac{\delta_{thick}}{\sigma A_{cell}}\right) = j\left(\frac{\delta_{thick}}{\sigma}\right) \quad (11)$$

Kde A_{cell} predstavuje aktívnu plochu palivového článku, δ_{thick} je hrúbka vrstvy elektrolytu a σ je vodivosť. Ako je vidieť z rovnice (11), ohmické straty je možné znížiť použitím tenšej vrstvy elektrolytu alebo použitím elektrolytu s vyššou iónickou vodivosťou. Koncentračné napät'ové straty vznikajú dôsledkom zníženia koncentrácie reaktantov [7]. Koncentračné straty palivových článkov môžu byť vyjadrené nasledujúcou rovnicou:

$$v_{conc} = c \ln \frac{j_L}{j_L - j} \quad (12)$$

Kde c je konštanta a má tvar:

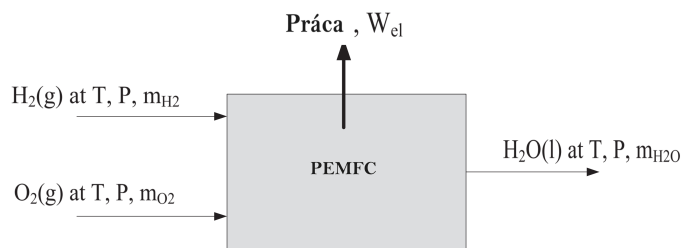
$$c = \frac{RT}{nF} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (13)$$

Kde j predstavuje hustotu elektrického prúdu, mieru elektrického prúdu produkovaného palivovým článkom na jednotku plochy. Táto hodnota je pevná pri štarte palivového článku a ukazuje, ako efektívne palivový článok prevádza chemickú energiu na elektrickú. Limitná hustota prúdu j_L je maximálna hustota prúdu, pri ktorej palivový článok môže efektívne pracovať bez toho, aby došlo k úplnému vyčerpaniu koncentrácie reaktantu. To znamená bod, pri ktorom palivový článok už nemôže

udržať produkciu elektrického prúdu kvôli nedostatku reaktantu, čo môže byť výsledkom rýchleho spotrebovania chemického paliva. Koncentračné straty sa objavujú pri vysokých hustotách prúdu a významné koncentračné straty môžu vážne obmedziť výkon palivového článku [5].

S koncentračnými napät'ovými stratami úzko súvisí aj hmotnostný transport reaktantov v palivovom článku. Výpočty toku, alebo hmotnostné bilancie, sú kritické pre určenie správnych prietokových rýchlostí pre palivový článok. Príklad tokového diagramu je znázornený na Obr. 4. Vodík vstupuje do článku pri teplote T , tlaku P , s hmotnostným prietokom m_{H_2} . Kyslík vstupuje do palivového článku z prostredia pri určitej T , P a m_{O_2} . Vodík a kyslík reagujú v článku, čím vzniká voda, ktorá vystupuje von z palivového článku tiež pri určitej T , P a m_{H_2O} . W_{el} je možná elektrická práca, ktorú je palivový článok schopný vykonať prostredníctvom chemickej energie [8]. Základným princípom hmotnostnej prietokovej rovnováhy je zachovanie celkového hmotnostného prietoku vstupujúceho do systému a vystupujúceho zo systému:

$$\sum (m_i)_{in} = \sum (m_i)_{out} \quad (14)$$



Obr. 4: Tokový diagram pre získanie rovnice hmotnostnej bilancie [8]

Výkon článku sa dá opísať:

$$W_{el} = n_{cell} V_{cell} I \quad (15)$$

kde n_{cell} je počet článkov, V_{cell} je napätie článku, a I je prúd.

Vstupné hmotnostné prietoky pre PEM palivový článok sú nasledovné [8]:

Hmotnostný prietok vodíka je:

$$m_{H_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (16)$$

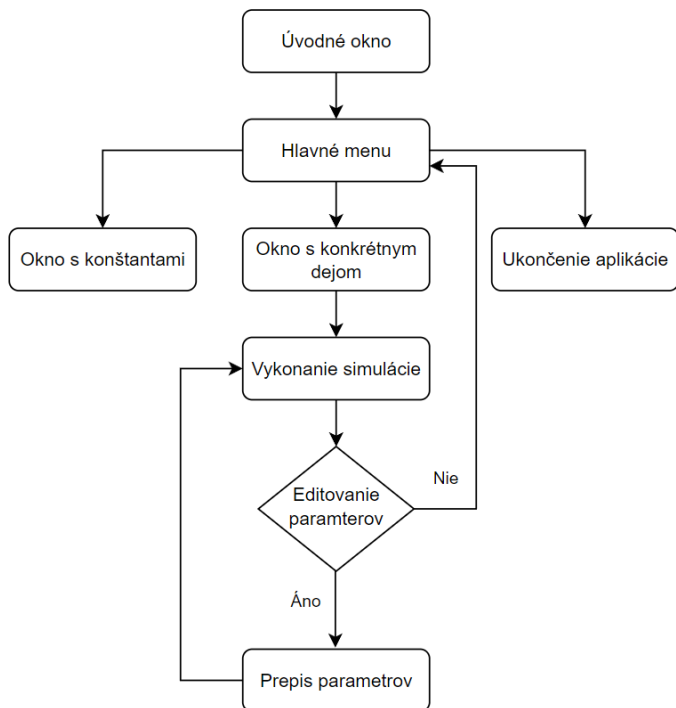
Hmotnostný prietok kyslíka:

$$m_{O_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{O_2}}{4F} I n_{cell} \quad (17)$$

Hmotnostný prietok vzduchu:

$$m_{air,in} = \frac{S_{O_2} M_{air}}{r_{O_2} 4F} I n_{cell} \quad (18)$$

Výkon PEMFC závisí aj od rozmerov kanálikov, ktoré ovplyvňujú prietokové rýchlosti paliva a taktiež pokles tlaku. Širšie kanáliky zabezpečujú menší pokles tlaku. V mnohých



Obr. 5: Vývojový diagram edukačnej aplikácie pre modelovanie PEM palivových článkov

typoch palivových článkov sú kanálky usporiadané paralelne, preto je pokles tlaku pozdĺž kanálik tiež poklesom tlaku v celom poli. Zvýšením poklesu tlaku medzi výstupom a vstupom sa zvyšuje rýchlosť toku, ktorý je typicky laminárny. Pokles tlaku možno aproximovať pomocou rovníc pre nestlačiteľný tok v potrubíach [9, 10].

$$\Delta P = f \frac{L_{chan}}{D_H} \rho \bar{v}^2 + \sum K_L \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (19)$$

kde f je faktor trenia, L_{chan} je dĺžka kanálik, D_H je hydraulický priemer, ρ je hustota kvapaliny, \bar{v}^2 je priemerná rýchlosť a K_L je lokálny odpor.

2.3 Edukačná aplikácia

Edukačná aplikácia vytvorená v prostredí MATLAB je zameraná na modelovanie vybraných dejov v PEMFC, a to sú výkon palivového článku, napätie palivového článku, pokles tlaku v kanálikoch a hmotnostný prietok. Význam a princíp týchto dejov bol podrobne opísaný v sekcii "Vybrané deje", ktorá slúži ako teoretický základ pre matematické modelovanie, pričom sa kladie dôraz na analýzu reálnych dejov vo vodíkovom palivovom článku H-20 od spoločnosti Horizon. To umožňuje aplikovať teoretické poznatky na model so skutočnými parametrami.

Pri vývoji edukačnej aplikácie v programe MATLAB je využitý nástroj App Designer, ktorý umožňuje kombináciu návrhu používateľského rozhrania s programovaním v prostredí MATLAB (využitá verzia - R2023b). Aplikácia bola tvorená so zámerom, aby bola interaktívna a používateľsky prívetivá. Ako je znázornené vo vývojovom diagrame (viď. Obr. 5),

Tab. 1: Editovateľné parametre v edukačnej aplikácii

Značka	Názov
T_{op}	operačná teplota PEMFC
P_{H_2}	tlak vodíka na vstupe do článku
T_{air}	teplota okolitého vzduchu
Rh_{air}	relatívna vlhkosť vzduchu
j	prúdová hustota
U	elektrické napätie článku

Tab. 2: Konštanty použité v edukačnej aplikácii

Značka	Názov	Hodnota
A	aktívna plocha PEMFC	5,88 cm ²
dc	hĺbka kanálik	0,15 mm
F	Faradayova konštanta	96 485 C/mol
j_L	limitná hustota prúdu	0,58 A/m ²
L	hrúbka membrány	50 μm
M_{air}	molárna hmotnosť vzduchu	28,97 g/mol
M_{H_2}	molárna hmotnosť vodíka	2,02 g/mol
M_{H_2O}	molárna hmotnosť vody	18,015 g/mol
N	močet článkov v module	13
P	mornálny atmosférický tlak	101 325 kPa
R	plynová konštanta	8,314 J/(mol·K)
wc	šírka kanálik	1 mm
x_{O_2}	pomer kyslíka vo vzduchu	0,21



Obr. 6: Úvodné okno edukačnej aplikácie v programe MATLAB

aplikácia vedie používateľov krok za krokom cez rôzne fázy modelovacieho procesu, od nastavenia parametrov až po analýzu a interpretáciu výsledkov. Tento prístup umožňuje používateľom nielen pasívne študovať teóriu, ktorá sa skrýva za technológiou PEMFC, ale aktívne sa zapájať do procesu učenia tým, že experimentujú s rôznymi vstupnými prevádzkovými parametrami, ktoré sú spísané v Tab. 1 a sledujú ich vplyv na výkon palivového článku.

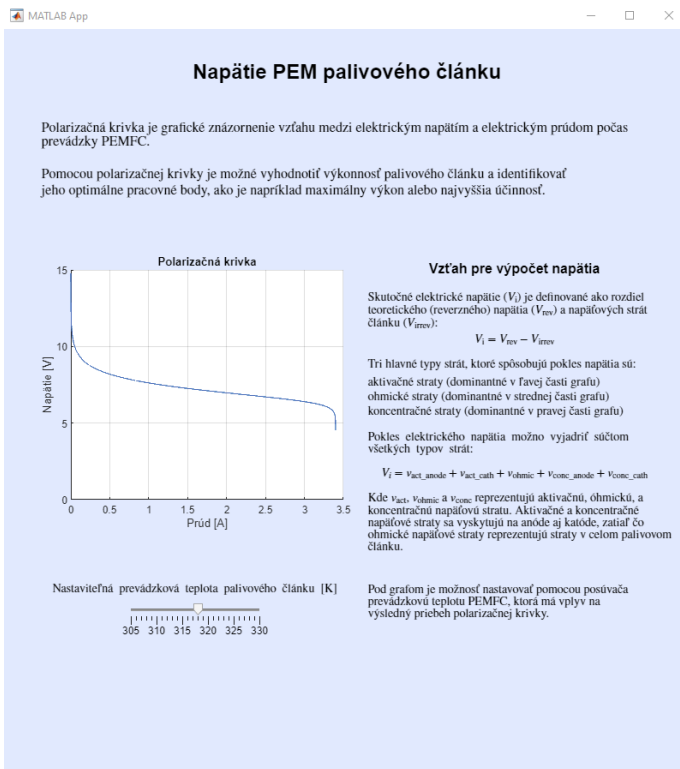
Po spustení aplikácie sa používateľom zobrazí úvodné okno, ktoré obsahuje krátky popis aplikácie (viď. Obr. 6). Následne má používateľ možnosť prejsť do hlavného menu (viď. Obr. 7), v ktorom si môže vybrať konkrétny dej, ktorý



Obr. 7: Hlavné menu edukačnej aplikácie v programe MATLAB

chce analyzovať. Z hlavného menu je možné zobrazit’ použité konštanty, ktoré sú spísané v Tab. 2 pre modelovanie dejov.

Výsledky simulácií sú prezentované prostredníctvom grafov alebo výpisov, ktoré poskytujú okamžitú spätnú väzbu na vplyv zmenených parametrov (vid’. Obr. 8).



Obr. 8: Konkrétna analýza deja (Napätie PEMFC) v edukačnej aplikácii v programe MATLAB

3 Záver

V tejto práci bola predstavená edukačná aplikácia v prostredí MATLAB, zameraná na modelovanie vybraných dejov v palivových článkoch s polymernou elektrolytickou membránou

(PEMFC). Aplikácia ponúka používateľom možnosť hlbšieho pochopenia a interaktívneho štúdia vybraných dejov v PEMFC, ako sú výkon palivového článku, napäťové straty, hmotnostný transport, a pokles tlaku v kanálikoch. Vďaka tejto práci môžu používatelia jednoducho analyzovať vplyv rôznych vstupných prevádzkových parametrov na výkon palivového článku, čím sa zvyšuje ich porozumenie týmto komplexným systémom. Aplikácia takisto podporuje aktívne učenie prostredníctvom experimentovania a poskytuje nástroje pre efektívnu vizualizáciu výsledkov, uľahčujúc tak analýzu a interpretáciu údajov. Táto aplikácia prispieva k lepšiemu vzdelávaniu v oblasti obnoviteľných zdrojov energie a pomáha rozvíjať praktické učenie a experimentovanie v edukačnom procese.

Literatúra

- [1] T.E. Lipman and A.Z. Weber. Fuel Cells and Hydrogen Production: A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition. Springer New York, 2018. ISBN 9781493977888.
- [2] Stefano Campanari and Giulio Guandalini. Fuel cells: opportunities and challenges. In Angelo Basile, Gabriele Centi, Marcello De Falco, and Gaetano Iaquaniello, editors, *Catalysis, Green Chemistry and Sustainable Energy*, volume 179 of *Studies in Surface Science and Catalysis*, pages 335–358. Elsevier, 2020. 10.1016/B978-0-444-64337-7.00018-5.
- [3] N.T. Stetson, S. McWhorter, and C.C. Ahn. Introduction to hydrogen storage. In Ram B. Gupta, Angelo Basile, and T. Nejat Veziroğlu, editors, *Compendium of Hydrogen Energy*, Woodhead Publishing Series in Energy, pages 3-25. Woodhead Publishing, 2016. DOI: 10.1016/B978-1-78242-362-1.00001-8.
- [4] Lúcia Bollini Braga, Jose Luz Silveira, Marcio Evaristo da Silva, Einara Blanco Machin, Daniel Travieso Pedrosa, and Celso Eduardo Tuna. Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects. *Applied Thermal Engineering*, 63(1):354–361, 2014.
- [5] C. Spiegel. An Introduction to Fuel Cells. In *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, pages 1–14. Academic Press, Burlington, 2008. ISBN 978-0-12-374259-9.
- [6] N. Rajalakshmi, K.S. Dhathathreyan. Catalyst layer in PEMFC electrodes—Fabrication, characterisation and analysis. *Chemical Engineering Journal*, 129(1):31-40, 2007.
- [7] B. Gou, W.K. Na, and Bill Diong. Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications. *Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications*, 1–234, 2017. ISBN 9781315218748.

- [8] C. Spiegel. Chapter 5 - Fuel Cell Mass Transport. In Colleen Spiegel, editor, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, pages 97–125. Academic Press, Burlington, 2008. ISBN 978-0-12-374259-9.
- [9] M. Mortazavi. Two-phase flow pressure drop in PEM fuel cell flow channel bends. *International Journal of Multiphase Flow*, 143:103759, 2021. ISSN 0301-9322.
- [10] C. Spiegel. Chapter 10 - Modeling the Flow Field Plates. In Colleen Spiegel, editor, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, pages 269–298. Academic Press, Burlington, 2008. ISBN 978-0-12-374259-9.
- [11] A. Abbaspour, N. Parsa, and M. Sadeghi, “A New Feedback Linearization-NSGA-II based Control Design for PEM Fuel Cell,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 97, pp. 25-32, July 2014, doi: 10.5120/17044-7354.
- [12] M.M. Mench, C. Wang, and S.T. Thynell. An Introduction to Fuel Cells and Related Transport Phenomena. In *Proceedings of the International Conference on Fuel Cells*, pages 1–10, 20XX.
- [13] M. M. Tellez-Cruz, J. Escorihuela, O. Solorza-Feria, and V. Compañ. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Challenges. *Polymers*, 13(18):3064, 2021.
- [14] D. Chanal, N. Y. Steiner, R. Petrone, D. Chamagne, and M.C. Péra. Online Diagnosis of PEM Fuel Cell by Fuzzy C-Means Clustering. In Luisa F. Cabeza, editor, *Encyclopedia of Energy Storage*, pages 359–393. Elsevier, Oxford, 2022. ISBN 978-0-12-819730-1.

Spracovanie a vyhodnocovanie dát z motion-capture obleku pre účely rozpoznávania gest

Bc. Anna Melekhova, doc. Ing. Erik Kučera, PhD.

Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave
Aplikovaná mechatronika a elektromobilita

xmelekhova@stuba.sk, erik.kucera@stuba.sk

Abstrakt – V neustále sa vyvíjajúcom prostredí informačných a komunikačných technológií sa táto práca zaoberá narastajúcimi výzvami interakcie človek-stroj (HMI) a interakcie človek-robot (HRI). Práca sa zameriava na interakciu riadenú gestami, ktorú zabezpečujú obleky na zachytávanie pohybu, a skúma spracovanie a hodnotenie dát s cieľom pripraviť cestu pre budúce aplikácie rozpoznávania gest na ovládanie mechatronických zariadení. Ciele projektu zahŕňajú skúmanie možností Rokoko SmartSuit Pro II, skúmanie jeho potenciálu pre získavanie dát a vývoj programu integrujúceho techniky výpočtovej inteligencie.

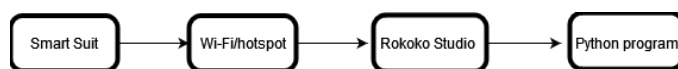
1 Úvod

Technológia snímania pohybu, známa svojou presnosťou pri snímaní ľudského pohybu, sa stala nástrojom v rôznych oblastiach a zmenila dynamiku ľudského zapojenia do technológie. V oblasti zábavy spôsobili obleky na snímanie pohybu revolúciu vo vytváraní realistických postáv a pohlcujúcich zážitkov v hrách, filmoch a animáciách. Okrem zábavy nachádza snímanie pohybu široké uplatnenie v zdravotníctve, kde uľahčuje rehabilitáciu a biomechanickú analýzu. Zachytením a analýzou zložitosti ľudského pohybu získajú lekári a výskumníci neoceniteľné poznatky o motorických funkciách, analýze chôdze a pokroku v rehabilitácii, čím sa posunú vpred metódy starostlivosti o pacienta a liečby. V oblasti športovej vedy slúži technológia snímania pohybu ako základný kameň pre optimalizáciu športového výkonu, predchádzanie zraneniam a zdokonaľovanie biomechanických techník. Športovci a tréneri využívajú údaje zo záznamu pohybu na doladenie pohybov, zmiernenie rizík zranení a získanie konkurenčnej výhody v rôznych športových disciplínach, od atletiky až po profesionálne ligy.

2 Cieľ projektu

Základným cieľom našej štúdie je vytvorenie vlastného programu prispôbeného jedinečným schopnostiam SmartSuit Pro II. Cieľom práce je vývoj sofistikovaného programu určeného na komplexné zachytenie a analýzu pohybov. Tento program by mal byť určený pre identifikáciu a kategorizáciu gest určených pre ovládanie mechatronického zariadenia. Abeceda gest používaná v našej štúdii obsahuje päť základných pohybov: *Posunúť*

sa dopredu, Posunúť sa dozadu, Odbočiť doprava, Odbočiť doľava a Vzlietnuť.



Obr. 1: Komunikácia medzi hardverovými a softvérovými komponentami

Program zahŕňa prepojenie obleku s počítačom buď cez Wi-Fi alebo cez hotspot pripojenie. Následne sa pomocou softvéru Rokoko Studio vytvorí live stream a zachytí dáta vo formáte JSON cez UDP alebo TCP protokoly (Obr. 1). Nakoniec Python program spracuje tieto údaje a doručí výsledky používateľovi.

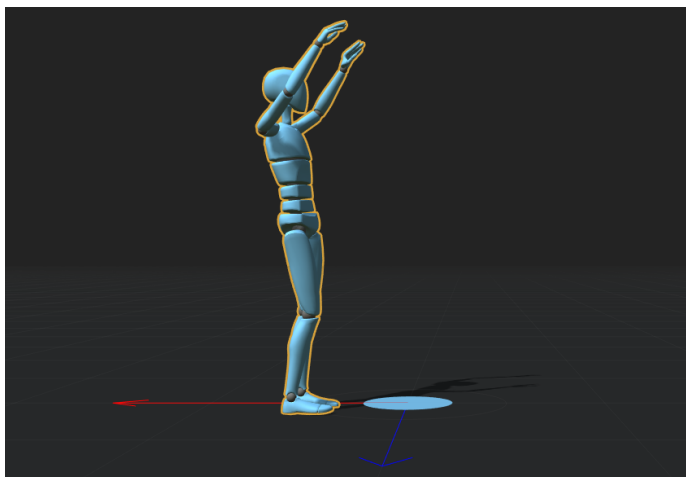
3 Metodológia

V tejto kapitole popíšeme súbor gest, ktorý sa použil pre rozpoznávanie, načrtne primárne nastavenie obleku na snímanie pohybu, opíšeme proces výberu základných vlastností, popíšeme metódy spracovania dát a objasníme štruktúru modelu použitého na klasifikáciu.

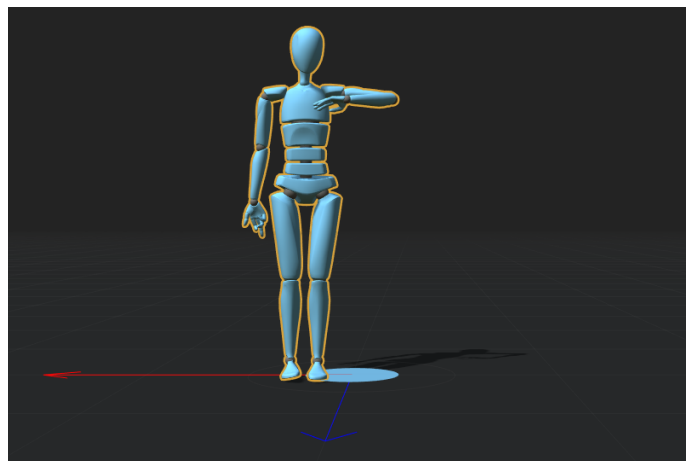
3.1 Abeceda gest

Abeceda gest sa vzťahuje na preddefinovaný súbor gest, ktorý zahŕňa pohyby tela, ktoré systém následne rozpoznáva a interpretuje na účel ovládania mechatronického zariadenia. Nasleduje opis využívaných gest:

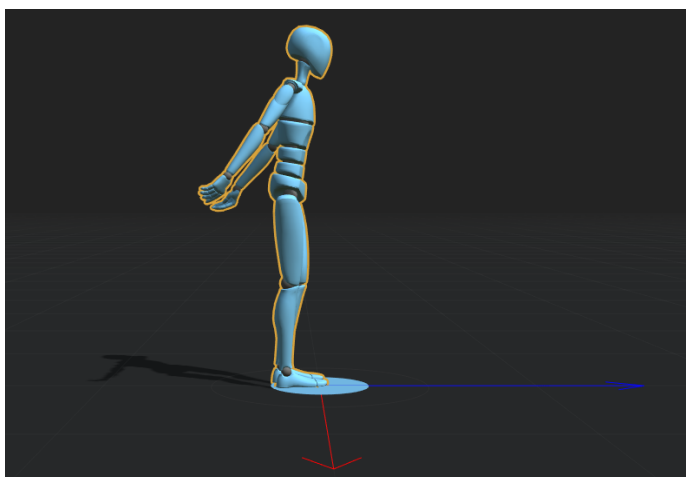
1. **Posunúť sa dopredu** - Toto gesto predstavuje pohyb vpred, ktorý sa vykonáva paralelným zdvihnutím rúk od pásu smerom nahor nad hlavou (Obr. 2).
2. **Posunúť sa dozadu** - Posun dozadu sa vykonáva pohybom paralelných rúk od bokov nahor smerom k chrbtu (Obr. 3).
3. **Odbočiť doprava / Odbočiť doľava** - Ak sa chcete otočiť doprava (Obr. 4) alebo doľava (Obr. 5), musíte zdvihnúť zodpovedajúcu ruku od bokov nahor, ohnúť ju v lakti a priblížiť zápästie k hrudníku.
4. **Vzlietnuť** - Gesto vzlietnutia sa vykonáva zdvihnutím pravej nohy a zohnutím kolena tak, aby sa vytvoril uhol 90 stupňov (Obr. 6).



Obr. 2: Pohyb dopredu

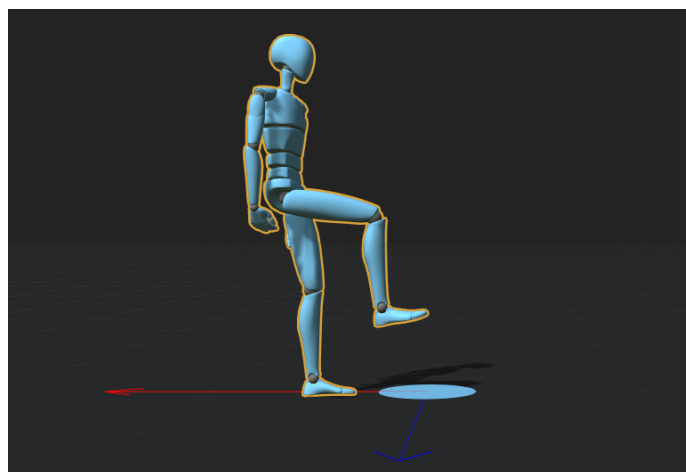


Obr. 5: Pohyb dolava

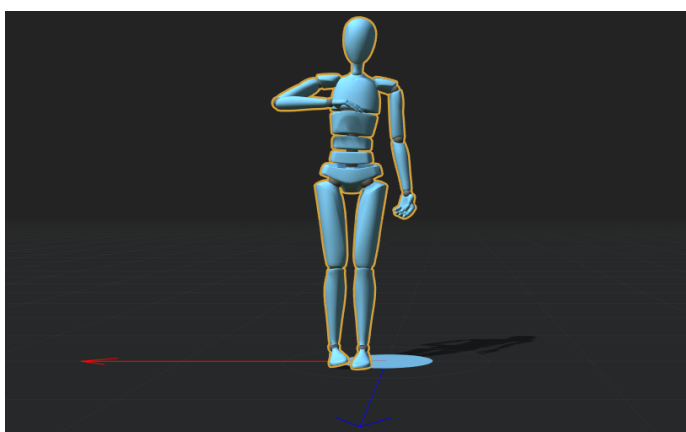


Obr. 3: Pohyb dozadu

využívame Rokoko SmartSuit Pro II. Tento pokročilý oblek na zachytávanie pohybu nám umožňuje zachytiť a analyzovať zložité pohyby s veľkou presnosťou, čím sa položí základ pre intuitívne a citlivé ovládacie rozhrania.



Obr. 6: Vzlietnuť



Obr. 4: Pohyb doprava

3.2 Rokoko Smartsuit Pro II

V tejto štúdií pre rozpoznávanie gest a následné ovládanie mechatronických zariadení ako primárny nástroj používame

Rokoko SmartSuit Pro II je špičkový oblek na zachytávanie, ktorý používa špeciálne snímače „9DOF“. Tieto snímače presne sledujú pohyb v troch dimenziách s pôsobivou úrovňou presnosti a zachytávajú aj jemne pohyby s odchýlkou len ± 1 stupeň. Dokáže zachytiť pohyb rýchlosťou 200 snímkov za sekundu, čím zaisťuje plynule streamovanie v reálnom čase bez akéhokoľvek oneskorenia, vďaka pokročilej funkcii sledovania nadmorskej výšky. Jednou z jeho výnimočných vlastností je schopnosť sledovať pohyb naprieč rôznymi terénmi, ako sú schody a rebríky, a to aj pri činnostiach s veľkým nárazom, vďaka širokému rozsahu detekcie sily G (až 16 g). SmartSuit Pro II využíva technológiu Sensor Fusion 2.0 na minimalizáciu chýb pri sledovaní, zlepšenie presnosti pohybov pri chôdzi a behu a odolnosť voči rušeniu z magnetických poli. To mu umožňuje presne sledovať pohyby až do vzdialenosti 100 metrov. Na rozdiel od tradičných systémov snímania pohybu, ktoré sa spoliehajú na kamery a špecifické sledovacie

prostredia, SmartSuit Pro II funguje bezdrôtovo pomocou Wi-Fi, čo dáva užívateľom väčšiu slobodu pohybu bez toho, aby ich obmedzovali káble alebo špecifické nastavenia. Jeho pokročilé algoritmy ďalej zlepšujú kvalitu sledovania pohybu znížením driftu o 24% v porovnaní so špičkovými optickými systémami a stabilizáciou proti magnetickému rušeniu. Tieto vylepšenia vedú k plynulejšiemu a presnejšiemu snímaniu pohybu, čo uľahčuje vytváranie realistických animácií bez potreby rozsiahleho postprodukčného čistenia. Okrem toho si SmartSuit Pro II zachováva integritu údajov aj v náročných prostrediach s kovovými štruktúrami a silnými magnetickými poľami, čím zaisťuje konzistentnú presnosť počas dlhých časových období.

3.3 Konfigurácia Rokoko SmartSuit Pro II

Rokoko SmartSuit Pro II potrebuje tri primárne komponenty: počítač, Wi-Fi router a USB power banku alebo batériu s výstupom 2A.

Používatelia majú k dispozícii softvér Rokoko Studio, ktorý slúži ako rozhranie medzi oblekom a programom v jazyku Python. Softvér umožňuje prenos dát pomocou komunikačných protokolov, ktoré sa následne zachytávajú programom. Zachytený JSON obsahuje informáciu o jeho verzii, aktérovi, fyzické umiestnenie aktéra v priestore a pozíciu a rotáciu každej časti, na ktorej sa príslušný snímač nachádza. Na spustenie spojenia kostýmu s počítačom je potrebné pripojiť sa cez WiFi pripojenie podľa názvu siete Wi-Fi, hesla, IP, portu, typu zabezpečenia, frekvenčného pásma a režimu DHCP. Na nadviazanie komunikácie medzi softvérom a programom Python využívame v knižnicu *socket* pre protokol UDP, čo je komunikačný koncový bod používaný na prenos dát po sieti. Zadaním rodiny adresy soku ako IPv4 (*AF_INET*) a jeho typu ako datagramu (*SOCK_DGRAM*) nastaví spojenie vhodné pre aplikácie streamovania v reálnom čase. Funkcia *bind()* potom spája socket s konkrétnou sieťovou adresou (*HOST*) a číslom portu (*PORT*). Táto väzba umožňuje programu odosielať a prijímať dáta cez určené sieťové rozhranie.

3.4 Datasetsy

Ako už bolo spomenuté, abeceda gest pozostáva z 5 rôznych gest. Pre návrh súboru dát na trénovanie pre každé gesto sme vytvorili 50 vzoriek s 90 snímkami, čo je približne 3 sekundy pre každé gesto. Každá takáto vzorka pozostáva zo 441 prvkov, ktoré predstavujú názvy rôznych kostí a informácie, či ide o polohu (*Pos*) alebo rotáciu (*Rot*). Napríklad: *leftHandPosX*, *rightShoulderRotY*, *rightUpLegRotW* atď. Hodnoty každej vlastnosti /kosti sú vektory postupností zodpovedajúcej snímky. Dataset na testovanie má podobnú štruktúru, odlišuje sa len počtom vzoriek, na tento účel ich bolo pripravených 20.

3.4.1 Výber vlastností

Zníženie počtu vlastností v množine dát môže výrazne znížiť výpočtovú zložitosť procesu modelovania a môže potenciálne zlepšiť výkon modelov. Zahnutie irelevantných vlastností do modelu môže viesť k pretrénovaniu (*overfitting*), pri ktorom sa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	hipPosX	hipPosY	hipPosZ	hipRotX	hipRotY	hipRotZ	hipRotW	spinePos)	spinePos)	spinePosZ	spineRotX
2	0.091051	0.872725	-0.18172	0.114411	-0.09731	-0.00524	0.988642	0.097234	0.958027	-0.19889	-0.0641
3	0.091323	0.872755	-0.18201	0.1154	-0.0966	-0.00515	0.988597	0.097438	0.958092	-0.19903	-0.06321
4	0.091758	0.872759	-0.18209	0.115835	-0.09635	-0.00522	0.98857	0.097865	0.958112	-0.19903	-0.06286
5	0.091758	0.872759	-0.18209	0.115835	-0.09635	-0.00522	0.98857	0.097865	0.958112	-0.19903	-0.06286
6	0.093574	0.872694	-0.18165	0.115694	-0.09334	-0.00722	0.988863	0.099852	0.958027	-0.19863	-0.0601
7	0.093661	0.872793	-0.18058	0.111357	-0.09029	-0.00854	0.989633	0.100055	0.957963	-0.19832	-0.05973
8	0.093939	0.873303	-0.17427	0.098698	-0.09531	-0.00751	0.990514	0.100632	0.957984	-0.19411	-0.06419
9	0.093939	0.873303	-0.17427	0.098698	-0.09531	-0.00751	0.990514	0.100632	0.957984	-0.19411	-0.06419
10	0.093949	0.874043	-0.16651	0.083911	-0.10683	-0.00433	0.990721	0.101028	0.958099	-0.18874	-0.07009
11	0.094939	0.874634	-0.15773	0.071506	-0.1167	-0.00239	0.990586	0.102516	0.958106	-0.18191	-0.07449
12	0.095609	0.874968	-0.14971	0.063612	-0.1218	-0.00192	0.990512	0.103574	0.958035	-0.17512	-0.0761
13	0.095747	0.875248	-0.14146	0.057631	-0.12411	-0.00173	0.990592	0.103944	0.957996	-0.16782	-0.07588
14	0.095472	0.87549	-0.13059	0.052051	-0.12301	-0.00189	0.991037	0.103737	0.957928	-0.15789	-0.07224
15	0.095109	0.875615	-0.12275	0.048998	-0.11971	-0.00187	0.991597	0.103218	0.957882	-0.15061	-0.06775
16	0.094318	0.875739	-0.11141	0.045348	-0.11129	-0.00157	0.992752	0.101904	0.957801	-0.14	-0.05946
17	0.094318	0.875739	-0.11141	0.045348	-0.11129	-0.00157	0.992752	0.101904	0.957801	-0.14	-0.05946
18	0.093357	0.875706	-0.10564	0.043818	-0.10589	-0.00162	0.993411	0.100626	0.957681	-0.13456	-0.05421
19	0.092163	0.875468	-0.09442	0.044551	-0.09615	-0.00112	0.994368	0.098703	0.957494	-0.12337	-0.04599
20	0.092163	0.875468	-0.09442	0.044551	-0.09615	-0.00112	0.994368	0.098703	0.957494	-0.12337	-0.04599
21	0.091044	0.87546	-0.09064	0.046624	-0.09235	-0.00039	0.994635	0.097186	0.957614	-0.11932	-0.04127
22	0.091044	0.87546	-0.09064	0.046624	-0.09235	-0.00039	0.994635	0.097186	0.957614	-0.11932	-0.04127
23	0.087573	0.875579	-0.08876	0.046473	-0.08642	-1.30E-05	0.995174	0.093271	0.957729	-0.11754	-0.03612

Obr. 7: Štruktúra súboru z datasetu

model naučí zapamätať si špecifické kombinácie hodnôt v tréningových dátach namiesto zachytávania základných.

Výber vlastností (významných dát) pre náš model sa uskutočnil na základe jednotlivých typov gest. Štyri gestá z piatich zahŕňali pohyby rúk, ramien a pliec a iba jedno malo pohyb nôh, toto nám umožnilo vybrať vlastnosti, kde sa hodnoty s najvyššou pravdepodobnosťou menia v každom časovom odseku, na rozdiel od vlastnosti *leftToeEndPosX*, kde každá hodnota vo všetkých 90 snímkach má len 0. Týmto spôsobom sa nám podarilo výrazne znížiť počet vlastností pre trénovanie zo 441 na 84.

3.5 Predspracovanie

Pre predspracovanie sme použili min-max scaler (1), ktorý je jedným z najpopulárnejších škálovacích algoritmov. Transformuje prvky škálovaním každého prvku na daný rozsah, ktorý je vo všeobecnosti [0,1]. Taktiež škáluje hodnoty na konkrétny rozsah hodnôt bez zmeny tvaru pôvodného rozloženia.

$$X_{\text{scaled}} = \frac{(X) - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

Od každej hodnoty odčíta priemer stĺpca a potom ho vydělí rozsahom, t. j. $\max(x) - \min(x)$.

Tento škálovací algoritmus funguje veľmi dobre v prípadoch, keď je štandardná odchýlka veľmi malá, alebo v prípadoch, ktoré nemajú gaussovské rozdelenie.

Taktiež pre predspracovanie bol použitý robust scaler (2), ktorý pri niektorých modeloch ukázal dobrú presnosť a viac *true positive* výsledkov na nových vzorkách.

$$X_{\text{scaled}} = \frac{X - \text{median}(X)}{\text{IQR}(X)} \quad (2)$$

robust scaler je metóda predbežného spracovania používaná v strojovom učení na zmenu škálovania numerických vlastností. Na rozdiel od standard scaler a min-max scaler je robust scaler navrhnutý tak, aby odolal vplyvu odľahlých hodnôt v rámci datasetu. Využitím mediánu a medzikvartilového rozsahu (IQR) namiesto priemeru a štandardnej odchýlky robust scaler

efektívne upravuje škály funkcií a poskytuje odolnosť voči vplyvu extrémnych hodnôt [2].

3.6 Modely

V našej štúdii sme si na rozpoznávanie gest vybrali neurónové siete LSTM (Long Short-Term Memory) s ohľadom na niekoľko kľúčových faktorov. Po prvé, siete LSTM vynikajú v zachytávaní časových závislostí, ktoré sú súčasťou sekvenčných údajov, vďaka čomu sú ideálne na analýzu vzorov gest v priebehu času. Po druhé, ich schopnosť zvládnuť sekvencie s premenlivou dĺžkou je rozhodujúca pri rozpoznávaní gest rôznej zložitosti a trvania bez potreby vstupov s pevnou dĺžkou alebo vypchávok. Okrem toho sú siete LSTM využiteľné v modelovaní dlhodobých závislostí, čo je nevyhnutné na pochopenie zložitých sekvencií gest. Navyše ich odolnosť voči šumu a variabilita signálov gest zaisťuje spoľahlivý výkon rozpoznávania. Nakoniec, stavové pamäťové mechanizmy sietí LSTM umožňujú uchovávanie dôležitých kontextových informácií z minulých pozorovaní, čo prispieva k presnejšej klasifikácii gest [1].

LSTM sa riadi nasledujúcimi rovnicami:

$$\begin{aligned}
 i_t &= \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}h_{t-1} + W_{ci}c_{t-1} + b_i) \\
 f_t &= \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1} + W_{cf}c_{t-1} + b_f) \\
 g_t &= \tanh(W_{xg}x_t + W_{hg}h_{t-1} + b_g) \\
 o_t &= \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1} + W_{co}c_{t-1} + b_o) \\
 c_t &= f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot g_t \\
 h_t &= o_t \odot \tanh(c_t)
 \end{aligned}$$

Kde:

- x_t je vstup v časovom kroku t ,
- h_{t-1} je skrytý stav z predchádzajúceho časového kroku,
- c_{t-1} je stav bunky z predchádzajúceho časového kroku,
- i_t, f_t, g_t a o_t sú aktivácie vstupnej brány, brány zabudnutia, brány bunky a aktivácie výstupnej brány,
- σ je funkcia aktivácie,
- \odot označuje násobenie po prvkoch,
- W a b sú váhové matice a vektory odchýlky, ktoré sa treba naučiť počas tréningu.

3.6.1 Architektúra modelov

Architektúra všetkých troch modelov (Obr. 8), ktoré sme vytvorili, zostáva konzistentná, obsahuje rovnaké vrstvy a štruktúru. Architektúra začína obojsmernou dlhou krátkodobou pamäťou (Bidirectional LSTM), ktorá umožňuje efektívne zachytávanie dlhodobých vzorov analýzou sekvencií v oboch smeroch. Na zvýšenie stability a rýchlosti tréningu sa použila dávková normalizácia (Batch Normalization). Nadmerné tréningovanie (overfitting) bolo zmiernené zavedením vrstvy Dropout, náhodne deaktivujúcej neuróny počas tréningu. Ďalšia obojsmerná vrstva LSTM bola zahrnutá na zachytenie ďalších sekvenčných

vzorov, po ktorej nasledovala ďalšia vrstva Dropout na ďalšiu reguláciu. Model sa potom pohybuje cez husto prepojenú vrstvu s aktiváciou ReLU (3), aby sa naučil zložité vzory. Nakoniec vrstva Dropout predchádza výstupnú vrstvu, ktorá využíva aktiváciu softmax (4) na klasifikáciu viacerých tried. Každý model absolvuje tréning s rôznymi nastaveniami parametrov a využíva odlišné metódy normalizácie dát čo nám umožňuje preskúmať, ako tieto úpravy ovplyvňujú výkonnosť modelu a prispôsobivosť v rámci rozpoznávania nových vzoriek.

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x) \quad (3)$$

$$\text{softmax}(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^N e^{x_j}} \quad (4)$$

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
bidirectional (Bidirectional)	(None, 90, 64)	29952
batch_normalization (Batch Normalization)	(None, 90, 64)	256
dropout (Dropout)	(None, 90, 64)	0
bidirectional_1 (Bidirectional)	(None, 64)	24832
dropout_1 (Dropout)	(None, 64)	0
dense (Dense)	(None, 32)	2080
dropout_2 (Dropout)	(None, 32)	0
dense_1 (Dense)	(None, 5)	165

Total params: 57285 (223.77 KB)
 Trainable params: 57157 (223.27 KB)
 Non-trainable params: 128 (512.00 Byte)

Obr. 8: Ukážka architektúry modelu

3.7 Tréningovanie

Ako už bolo spomenuté, každý model má svoje parametre a techniku normalizácie dát.

3.7.1 Model 1

Pre tento model sme použili škálovanie min-max scaler, tréningovanie trvalo 20 epoch, strata pri učení bola 0.010229 a presnosť - 1.0.

3.7.2 Model 2

Pre tento model sme použili škálovanie robust scaler, tréningovanie trvalo 25 epoch, strata pri učení bola 0.01809 a presnosť - 1.0.

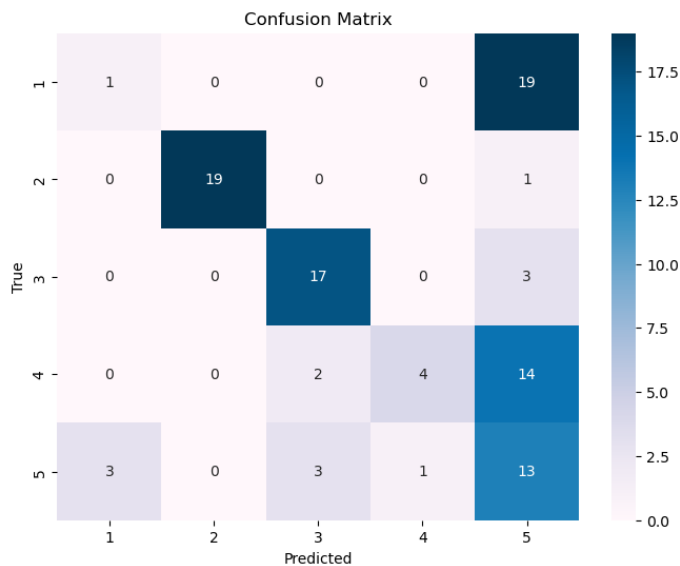
3.7.3 Model 3

Pre tento model sme použili škálovanie robust scaler, tréning trvalo 20 epoch, strata pri učení bola 0.2218 a presnosť - 0.96.

3.8 Testovanie

V našej štúdiu zameranej na dôsledné vyhodnotenie výkonnosti navrhovaných modelov sme použili niekoľko zavedených techník bežne používaných pri hodnotení strojového učenia, ako sú konfúzne matice a skóre presnosti. Pre testovanie boli použité nové vzorky, na ktorých sa ani jeden model netrénoval.

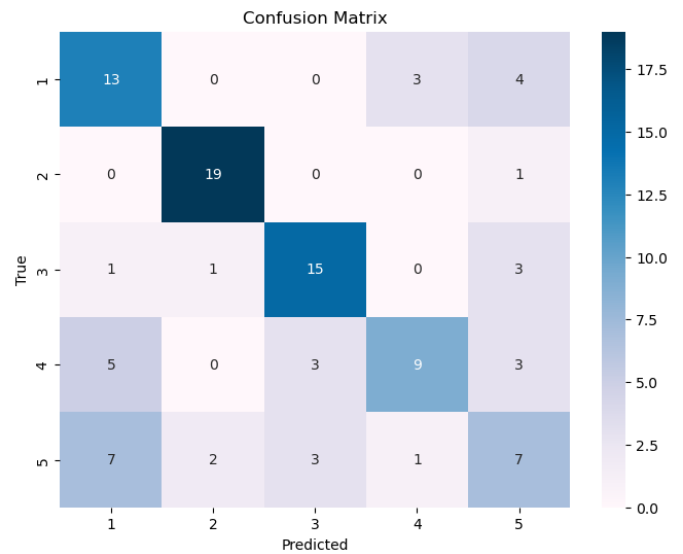
Na obrázkoch 9, 10, 11 sú matice, kde môžeme vidieť, ako prebehlo testovanie na nových vzorkách, ako často sa modely mýlili a koľkokrát správne klasifikovali gestá. Presnosť počas testovania pre *Model 1* bola 54%. Pre *Model 2* presnosť dosiahla 63% a pre *Model 3* bola 55%



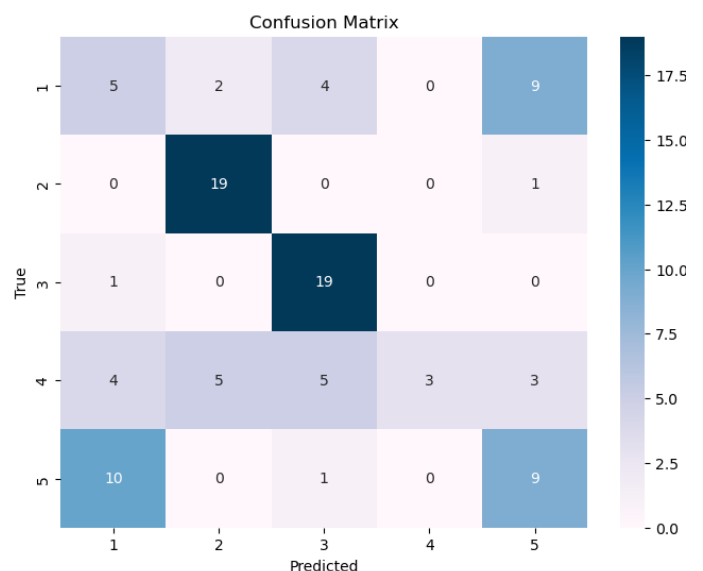
Obr. 9: Model 1: Konfúzna matica

4 Záver

V tejto práci sa nám podarilo nastaviť komunikáciu medzi Rokoko Smartsuit Pro II a počítačom, objasniť formát údajov a predspracovanie dát, ktoré je kľúčové pre následnú architektúru modelu. Trénované modely naznačujú sľubné výsledky s potenciálom ďalšieho zlepšenia prostredníctvom optimalizácie parametrov pre lepší výkon na nových vzorkách počas testovania. Ďalšie kroky zahŕňajú skúmanie účinnosti alternatívnych modelov, ako napríklad Hidden Markov Model. Taktiež sa navrhne algoritmus pre výpočty intenzity gest, ktorý by umožnil určovanie rýchlostí pre pohyby mechatronického zariadenia.



Obr. 10: Model 2: Konfúzna matica



Obr. 11: Model 3: Konfúzna matica

Literatúra

- [1] Medsker, L.R. and Jain, L.C. Recurrent Neural Networks. *CRC Press LLC*, 2001.
- [2] Kerim Koc and Asli Pelin Gurgun. Scenario-based automated data preprocessing to predict severity of construction accidents. *Automation in Construction*, 2022.

Extrakcia dát z fakturačných dokumentov

Rastislav Tvarožek¹, Erich Stark.²

¹Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave

²Stark Codes, s.r.o.

xtvarozek@stuba.sk

Abstrakt – Cieľom tohto článku je prieskum možnosti extrakcie dát z fakturačných dokumentov. Tento problém je aktuálne riešený konvenčnými metódami už niekoľko rokov, tieto metódy sú však veľmi nákladné na vývoj a ich sprostredkovanie býva spoplatnené. Pri riešení problému extrakcie dát z dokumentov sú v tejto práci porovnávané konvenčné metódy a návrh, ktorý problém rieši pomocou veľkých jazykových modelov a to za zlomok ceny pri znížení náročnosti na realizáciu samotnú.

1 Úvod

Fakturačné dokumenty sú nevyhnutné pre každého, kto nakupuje tovar. Ich digitálne uchovávanie môže byť problematické, keď že neexistuje štandardizovaný formát. Táto práca navrhuje aplikáciu, ktorá automaticky získa údaje z fakturačných dokladov, uloží ich do databázy a umožní ich ďalšie využitie. Aplikácia môže slúžiť súkromným osobám aj právnickým subjektom. Hlavnou výzvou je rozmanitosť fakturačných dokumentov, ktorú práca rieši pomocou moderných technológií a dôrazu na efektivitu a použiteľnosť.

Cieľom práce je vytvoriť systém, ktorý extrahuje údaje z digitálnych fakturačných dokumentov a umožní ich nasledujúcu úpravu. Tieto údaje môžu byť ďalej spracované alebo uložené.

2 Analýza problematiky

V nasledujúcich podkapitolách je preskúmaná problematika spracovania obrazu pomocou výpočtových technológií. Táto analýza je kľúčová pre návrh možných riešení danej úlohy. Preskúmané sú konvenčné metódy, ako napríklad konvolučné neurónové siete a optické rozpoznávanie znakov alebo aj *Optical Character Recognition* (OCR). Okrem toho je v tejto práci predstavená aj nová metodika a to realizácia syntaktickej analýzy pomocou OCR a veľkých jazykových modelov alebo *Large Language Models* (LLM), ktoré získali popularitu hlavne v roku 2022. V ďalšej kapitole budú všetky tieto metódy porovnané a na základe výsledkov bude vybraná najefektívnejšia metóda pre daný účel.

2.1 Konvolučné neurónové siete

Konvolučné neurónové siete alebo aj *Convolutional Neural Networks* (CNN) transformujú proces strojového učenia tým, že

umožňujú modelom vidieť obrazy, ktoré rozložia na pixely a priradia im rôzne označenia. Z týchto označení vyvodzujú predpovede o tom, čo daný model aktuálne analyzuje. Neurónové siete realizuje túto konvolúciu a neustále kontroluje presnosť svojich prognóz, pokiaľ nedosiahne dostatočnú presnosť.

Konvolučné neurónové siete sa skladajú z dvoch hlavných častí a to z extrakčnej vrstvy, ktoré obsahujú konvolučné a *pooling* vrstvy a z klasifikačnej časti, ktorá zahŕňa vrstvy ako *fully-connected* a aktivačné funkcie. Medzi týmito časťami sa nachádza aj *flatten* vrstva. Konvolučná vrstva, ktorá je prvou vrstvou v CNN, môže byť nasledovaná ďalšími konvolučnými alebo *pooling* vrstvami, čím sa zvyšuje komplexita siete. Vrstvy sa na začiatku siete zameriavajú na jednoduché vlastnosti, ako sú farby alebo rohy a postupne identifikujú väčšie prvky alebo tvary objektov, až kým nie je rozoznaný celkový objekt [1].

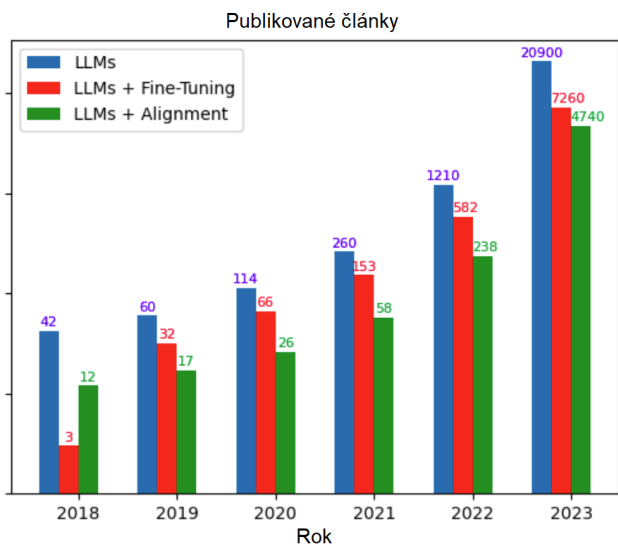
2.2 Veľké jazykové modely

Jazyk hrá zásadnú úlohu pri uľahčovaní komunikácie a interakcie so strojmi. S rastúcim dopytom po zariadeniach, ktoré zvládajú komplexné jazykové úlohy ako preklad, sumarizácia, vyhľadávanie a konverzácie, narastá aj potreba jazykových modelov. V oblasti jazykových modelov nastali nedávno významné prelomy, čo sa predovšetkým pripisuje transformátorom, ktoré sú bližšie popísané aj v tejto práci. Tieto pokroky priniesli revolučnú transformáciu a umožnili vznik veľkých jazykových modelov, ktoré sa približujú ľudskému výkonu pri rôznych úlohách s textom.

LLM modely sú schopné generovať a spracovávať text a možno ich prispôbiť na plnenie rôznych úloh. Na obrázku 1 je zobrazený trend výskytu termínu "Large Language Model" v rôznych vedeckých publikáciách, čo ilustruje ich dôležitosť [2].

Evolúcia jazykových modelov, vrátane LLM, je súčasťou rozvoja umelej inteligencie s cieľom porozumieť a generovať ľudský jazyk. Tieto modely fungujú ako štatistické modely, ktoré analyzujú a predpovedajú pravdepodobnosť výskytu sekvencie slov v danom kontexte. Ich korene siahajú až do polovice 20. storočia s prácou Alana Turinga, ktorý položil základy pre dnešné jazykové modely [2].

Chceme stroj, ktorý sa dokáže učiť zo skúseností a to, že dokáže sám meniť svoje inštrukcie, to umožní.
Alan M. Turing (Londýn, 1947)

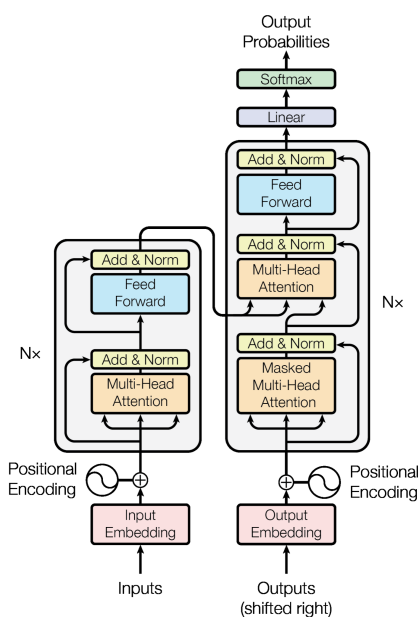


Obr. 1: Zmienky o veľkých jazykových modeloch vo vedeckých publikáciách [2]

2.2.1 Transformátory

Transformátory sú neurónové siete, ktoré sa učia porozumieť kontextu prostredníctvom sekvenčnej analýzy údajov. Tieto modely využívajú moderné techniky, známe ako *attention* alebo *self-attention*, ktoré pomáhajú identifikovať vzťahy medzi vstupmi a výstupmi. Transformátory zmenili prístup k vytváraniu veľkých jazykových modelov od svojho predstavenia v práci *Attention is All You Need* z roku 2017 [2].

Ich architektúra sa podobá na enkodér-dekodér modely, ale na rozdiel od *seq2seq* modelov dokážu vykonávať úlohy bez sekvenčného komponentu. To umožňuje ich paralelizáciu a rýchlejší tréning. Na obrázku 2 je možné vidieť architektúru transformátora, ktorá sa skladá z dvoch hlavných častí:



Obr. 2: Architektúra transformátorového modelu [3]

- **Enkodérová časť:** Obsahuje N identických vrstiev enkodéra.
- **Dekodérová časť:** Obsahuje N identických vrstiev dekodéra.

Transformátory nepoužívajú rekurenciu ani konvolúciu. Medzi enkodérovou a dekodérovou vrstvou sa nachádza pozičné enkódovanie, ktoré integruje poradie sekvencie [2].

2.3 Optické rozpoznávanie znakov

Optické rozpoznávanie znakov (OCR) je technika, ktorá umožňuje identifikovať tlačene alebo ručne písané znaky, ktoré sa nachádzajú v digitálnych fotografiách a papierových dokumentoch, ako sú napríklad finančné dokumenty. Tieto systémy dokážu previesť text z fyzického dokumentu na čitateľný text pre elektronické zariadenia. V uvažovanom prípade sa na získanie digitálnej kópie dokumentu využije fotoaparát alebo skener [4].

Proces OCR sa dá rozdeliť do niekoľkých fáz:

1. **Predspracovanie obrazu** - fyzický dokument sa konvertuje na digitálny obraz s cieľom čo najpresnejšie reprezentovať originál. Obraz sa čistí od možných chýb, ako je naklonenie dokumentu alebo iné problémy spojené s digitalizáciou. Okraje a hrany sa následne vyhladzujú [4].
2. **Rozpoznávanie znakov** - rôzne metódy sa používajú na analýzu tmavých oblastí a rozpoznávanie alfanumerických znakov. Tento krok môže využívať rozpoznávanie vzorov alebo vlastností, kde algoritmus porovnáva dáta so vzormi alebo využíva pravidlá založené na špecifikách daných znakov [4].
3. **Dodatočné spracovanie** - jedná sa o opravu chýb, ktoré vznikli počas procesu. Napríklad môže dochádzať k oprave slov na základe definovaného slovníka [4].

OCR je v súčasnosti veľmi dostupná technológia, aj pre bežných užívateľov. Existuje množstvo open-source knižníc a softvérov, ktoré ponúkajú funkcionality OCR.

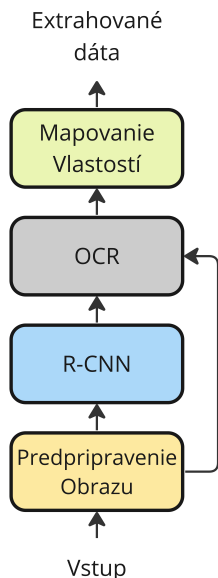
3 Návrh riešenia

Nasledujúca časť sa zaoberá návrhom možných riešení, ktoré sú aktuálne už používané v praxi alebo ich sama táto práca navrhuje. Pri navrhovaní predložených riešení boli uvažované rôzne faktory ako napríklad finančné náklady potrebné na dané riešenie alebo presnosť.

3.1 Konvolučné neurónové siete a OCR

Na obrázku 3 je zobrazená navrhovaná architektúra systému, ktorý rieši extrakciu pomocou konvolučných neurónových sietí a OCR.

Navrhovaný algoritmus využíva konvolučnú neurónovú sieť, ktorá je natrénovaná na detekciu oblastí vo fakturačnom



Obr. 3: Architektúra realizovaná pomocou konvolučných sietí a OCR

dokumente. Táto sieť určí umiestnenie jednotlivých oblastí a následne pomocou OCR extrahuje text z týchto oblastí. Tento proces určovania je presnejší a možný vďaka pred-definovaniu týchto oblastí.

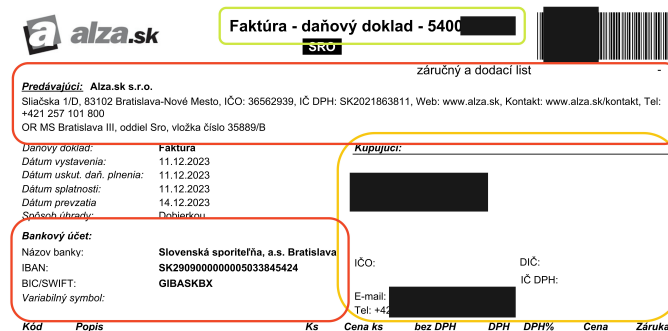
Predpripravenie obrazu - zahŕňa operácie, ktoré prispôbia fakturačný dokument pre tréning alebo klasifikáciu. Tieto operácie zahŕňajú prevod farebného modelu na RGB¹, normalizáciu hodnôt na rozsah 0 až 1 a aplikáciu transpozície, aby bol farebný kanál na začiatku reprezentácie obrazu. Po týchto krokoch je obraz pripravený na spracovanie konvolučnou neurónovou sieťou.

R-CNN - rýchla konvolučná neurónová sieť, ktorej úlohou je označiť oblasti, v ktorých sa nachádzajú požadované údaje, ako napríklad údaje o predávajúcom, nákupcovi, zoznam položiek, celková hodnota a podobne. Na obrázku 4 je možné vidieť výstup z takejto siete, kde má každá oblasť priradený typ. Červená farba označuje údaje o predávajúcom, oranžová údaje o nakupujúcom a zelená číslo faktúry. Trénovaná sieť je schopná identifikovať ďalšie typy oblastí, ale pre jednoduchosť príkladu sú uvedené len tieto tri.

OCR - samotný proces je podrobne popísaný v jednej z predchádzajúcich kapitol, kde vstupom do bloku OCR sú špecifikované súradnice jednotlivých oblastí a fakturačný dokument samotný. Postupne je na každú oblasť aplikované optické rozpoznávanie znakov (OCR) a výstup je priradený k jednotlivým kategóriám. Ukážka výstupu z tohto bloku je predstavená v príklade výpisu číslo 5.

Mapovanie vlastností - proces, v ktorom sú z neštruktúrovaného výstupu z bloku OCR získané relevantné informácie. Tento proces prebieha na základe stanovených pravidiel. Na nasledujúcom výpise 6 je možné vidieť výstup tejto siete.

¹aditívny farebný model, ktorý vzniká zmiešaním červenej, zelenej a modrej farby svetla vhodnej intenzity



Obr. 4: Označenie hľadaných oblastí pomocou R-CNN

```

predavajuci_area=""predavajúci: Alza s.r.o \n Sliačska 1/d,
83102 Bratislava-Nové Mesto, IČO: 36562939, IČ DPH: SK2021863811,
Web: www.alza.sk, Kontakt: www.alza.sk/kontakt, Tel:\n
+421 257 101 800\n OR MS Bratislava III, oddiel Sro, vložka číslo 35889/B""
kupujuci_area=""Kupujúci:\nRast...""
    
```

Obr. 5: Výstup optického rozpoznávania znakov

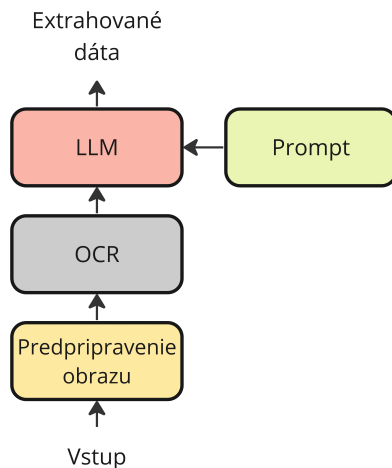
```

data={
  "predavajuci_meno": "Alza s.r.o",
  "predavajuci_adresa": "Sliačska 1/d, 83102 Bratislava-Nové Mesto",
  "predavajuci_kontakt": "+421 257 101 800",
  "predavajuci_ICO": "36562939",
  "predavajuci_IC_DPH": "SK2021863811"
}
    
```

Obr. 6: Výsledok extrakcie

3.2 OCR a veľké jazykové modely

Na obrázku 7 je zobrazený návrh architektúry realizovanej pomocou optického rozpoznávania znakov a veľkých jazykových modelov.



Obr. 7: Architektúra realizovaná pomocou OCR a LLM

Navrhovaný algoritmus využíva veľký jazykový model na interpretáciu výstupu optického rozpoznávania znakov (OCR) a správne priradenie hľadaných vlastností z fakturačného dokumentu. Pred-pripravenie obrazu a aplikácia OCR plnia rovnakú úlohu ako pri predošlom algoritme, avšak na rozdiel od príkladu s R-CNN sieťou, vstupom do OCR je celý dokument, a teda výstupom je kompletný text dokumentu.

Pri použití veľkého jazykového modelu (LLM) je vstupom do bloku LLM text získaný pomocou OCR, ako aj takzvaný *prompt*, ktorý slúži ako spôsob komunikácie s modelom. Tento *prompt* umožňuje predstaviť modelu nové dáta a zadať mu úlohu. *Prompt* v konkrétnom prípade môže mať nasledujúci tvar, ako je možné vidieť na výpise číslo 8.

```

prompt="""
Z nasledujúceho neštruktúrovaného textu ktorý bol získaný
z fakturačného dokumentu získaj meno predávajúceho,
adresu predávajúceho ... text dokumentu sa nachádza po ####
####
predavajúci: Alza s.r.o \n Sliačska 1/d,
83102 Bratislava-Nové Mesto, IČO: 36562939, IČ DPH: SK2021863811,
Web: www.alza.sk, Kontakt: www.alza.sk/kontakt, Tel:\n
+421 257 101 800\n OR MS Bratislava III, oddiel Sro, vložka 35889/B
kupujucci_area=Kupujucci:\nRast...
"""
    
```

Obr. 8: Príklad LLM *promptu*

V ideálnom prípade sa výstup z modelu využívajúceho R-CNN a OCR rovná výstupu, ktorý využíva OCR a LLM metodika.

4 Overenie Konceptu

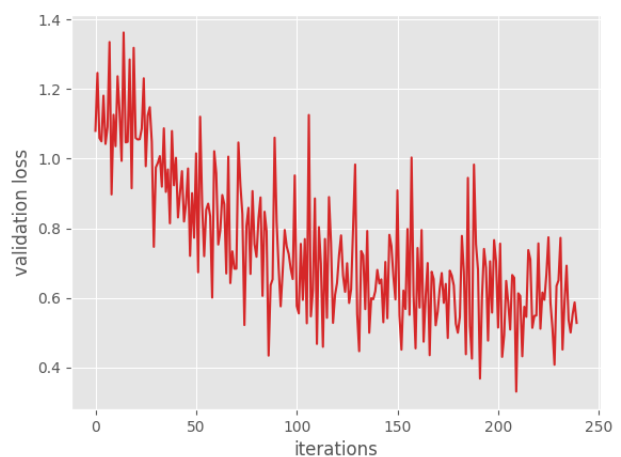
Podľa predchádzajúcich kapitol boli vytvorené minimalistické aplikácie na základe rôznych prístupov, z ktorých každý slúži na testovanie a zhodnotenie ich účinnosti. Dôležité je poznamenať, že experimenty ukázali, že obe navrhnuté metódy sú vhodné na riešenie daného problému. V nasledujúcich častiach budú tieto prístupy porovnané.

4.1 R-CNN a OCR

Pre realizáciu tohto prístupu bola použitá Python knižnica Pytorch, ktorá je špecializovaná na tvorbu a manipuláciu s modelmi strojového učenia. Konkrétne bol využitý pred-trénovaný model konvolučnej neurónovej siete nazývaný *resnet50*, ktorý sa skladá z 50 vrstiev a bol trénovaný na rozsiahlom datasete, ktorý obsahuje viac ako 1 milión obrázkov, schopný klasifikovať viac ako 1000 objektov. Tento model prijíma vstupné obrázky o veľkosti 224x224 pixelov. Ďalej bol model do-trénovaný na faktúrach, ktoré boli vopred anotované, kvôli učeniu s učiteľom.

Na do-trénovanie bolo použitých 200 faktúr, ktoré boli rozdelené do trénovacieho, testovacieho a validačného datasetu v pomere 80:10:10. Tréning trval 6 hodín a bol ukončený, keď trénovacia strata prestala klesať, hoci veľkosť trénovacieho datasetu je celkom malá do-trénovanie bolo dostatočne účinné na overenie konceptu.

Na grafe 9 je možné vidieť priebeh vývoja validačnej straty pri použití stratégie Cross Entropy a optimalizátora SGD.



Obr. 9: Validačná strata

Na realizáciu optického rozpoznávania znakov bola využitá Python knižnica Pytesseract, ktorá je ľahko použiteľná ako aj inštalovateľná a podporuje viacero jazykov vrátane slovenčiny. Funkcia *image_to_string* tejto knižnice bola aplikovaná na všetky oblasti identifikované v predchádzajúcom kroku.

Pre obe metódy na predspracovanie obrazu bola využitá knižnica OpenCV a jej príslušné funkcie.

4.2 OCR a LLM

Pri overovaní metodiky bol využitý veľký jazykový model od spoločnosti OpenAI, konkrétne GPT-3.5-turbo-16k, ktorý bol v čase písania práce najdostupnejším a najvýkonnejším modelom na trhu. Prvým krokom bol proces extrakcie textu pomocou knižnice Pytesseract. Následne bol tento text spolu so vstupným *promptom* spracovaný LLM modelom prostredníctvom API od spoločnosti OpenAI. Výsledkom tejto operácie sú dáta z dokumentu mapované na správne kl'úče.

4.3 Vyhodnotenie experimentu

Experiment na porovnanie úspešnosti bol zorganizovaný nasledovne: úspešnosti boli porovnávané medzi dátami získanými pomocou OCR a následným spracovaním veľkým jazykovým modelom, medzi modelom, ktorý len určoval oblasti, medzi modelom, ktorý len mapoval dáta z oblastí na kl'úče a medzi kombináciou predošlých dvoch metód. Tento prístup bol zvolený s ohľadom na predpoklad, že prvá časť metodiky pri R-CNN a OCR bude veľmi problematická.

Experiment sa uskutočnil na sade 20 fakturačných dokumentov, pri ktorých sa nešpecifikoval formát dokumentu. Na každom z týchto 20 dokumentov bolo potrebné identifikovať číslo faktúry, dátum splatnosti, meno dodávateľ'a a celkovú hodnotu danej služby.

Experiment sa zameriaval výlučne na presnosť výsledkov a teda nevenoval sa cene, času, náročnosti realizácie alebo iným faktorom.

Z uvedenej tabuľky 1 je zrejmé, že metóda LLM významne prekonáva kombináciu metód mapovania a určovania oblastí. Avšak, keby sa podarilo zvýšiť presnosť určovania oblastí, táto metóda by mohla konkurovať použitiu LLM modelov.

Tab. 1: Porovnanie úspešností jednotlivých metódik

Metodika	Možné odpovede	Správne odpovede	Presnosť
LLM (ChatGPT 3.5 Turbo)	80	71	88.75%
R-CNN (resnet50)	80	32	40.00%
Mapovanie vlastností	80	75	93.75%
R-CNN + mapovanie	80	24	30.00%

4.4 Výber algoritmu

Na základe predchádzajúcej analýzy je možné označiť extrakciu pomocou LLM modelov za najpresnejšiu metódu, ale je nevyhnutné zvážiť aj náklady a čas potrebný na realizáciu. Existuje niekoľko možností financovania LLM modelov. Je možné použiť komerčné modely, kde sa platí za počet vstupných a výstupných tokenov² alebo je možné využiť open-source modely a nasadiť ich na vlastný hardvér. Je potrebné si

²Jednotka spracovávaného textu

uvedomiť, že prevádzka LLM modelov môže byť nákladná, čo je dôležitým faktorom pri rozhodovaní sa pre túto metódu. Na zlepšenie metodiky neurónových sietí by bolo potrebné rozšíriť dataset fakturačných dokumentov, čo však nie je jednoduché a ani to nezaručuje lepšie výsledky ako pri LLM modeloch.

Čo sa týka času potrebného na vývoj, neurónové siete môžu vyžadovať výrazne dlhší časový úsek na vývoj a nasadenie ako LLM modely.

Čas potrebný na spracovanie faktúry je takmer rovnaký medzi jednotlivými metódami.

Navrhovaným riešením je kombinácia OCR s LLM a testovanie rôznych modelov od rôznych poskytovateľ'ov s cieľom minimalizovať náklady, ktoré sú hlavnou nevýhodou tejto metódy.

4.5 Porovnanie metódik využívajúcich LLM

Existuje mnoho veľkých jazykových modelov, ktoré sú dostupné na trhu, či už súkromné alebo open-source. Na riešenie úlohy v práci boli využité modely z rodiny *GPT* od spoločnosti OpenAI. V tejto rodine sa nachádza množstvo dostupných modelov, ktoré sa líšia cenou, výkonom a mnohými ďalšími parametrami. V tejto kapitole sú najvhodnejšie modely vybrané a porovnané medzi sebou na datasete 10 faktúr, jedná sa o kombináciu vygenerovaných faktúr počítačovo vo formáte pdf a faktúr, ktoré boli vyfotografované mobilným zariadením a sú uložené vo formáte jpg.

Pri experimente boli využité rôzne modely na extrakciu zadaných vlastností, celkový počet vlastností hľ'adaných v jednom fakturačnom dokumente je 26. Medzi vlastnosti patrí napríklad: meno dodávateľ'a, kontakt, email, IČO, DIČ, celková cena, dátum splatnosti a podobne. Pre každú klasifikovanú vlastnosť existujú tri kategórie:

- Správne klasifikované(S) - extrahovaný text danej vlastnosti sa zhoduje s reálnym textom na dokumente
- Nesprávne klasifikované(N) - extrahovaný text danej vlastnosti sa nezhoduje s textom na dokumente
- Nezachytená vlastnosť(X) - vlastnosť sa v dokumente nachádza ale nebola extrahovaná vôbec

Tretia kategória je vytvorená na základe predpokladu, že zle klasifikovaná vlastnosť, napríklad daňové identifikačné číslo môže byť potenciálne nebezpečnejšia ako keď vlastnosť nie je klasifikovaná vôbec.

V experimente bolo porovnaných 5 modelov ako je možné vidieť v tabuľke 2.

Z predchádzajúcej tabuľky vyplýva že, najúspešnejším modelom je model *gpt-4* keďže má najviac klasifikovaných správnych vlastností a ešte k tomu aj najmenej zlých klasifikácií.

Nasledujúcim dôležitým faktorom je cena. V nasledujúcej tabuľke 3 je možné vidieť porovnanie cenových nákladov na experiment pre jednotlivé modely.

Z tabuľky je možné vyvodiť, že najlepší model *gpt-4* je aj finančne najnáročnejší. Tento faktor môže ovplyvniť rozhodovanie pri výbere modelu, keďže model *gpt-4* je 18 krát

Tab. 2: Porovnanie OpenAI modelov

PDF + JPG	S	N	X
gpt-3.5-turbo-0125	180	34	20
gpt-3.5-turbo-1106	178	31	25
gpt-3.5-turbo-16k	180	32	22
gpt-4	214	14	6
gpt-4-0125-preview	204	15	15

Tab. 3: Porovnanie nákladov pre jednotlivé OpenAI modely

PDF + JPG	Cena	Počet dokumentov
gpt-3.5-turbo-0125	0.03€	9
gpt-3.5-turbo-1106	0.03€	9
gpt-3.5-turbo-16k	0.03€	9
gpt-4	0.53€	9
gpt-4-0125-preview	0.33€	9

drahší ako model *gpt-3.5* aj keď *gpt-4* je len 1.18 krát lepší. Teda výber modelu bude závisieť na dostupných prostriedkoch.

Pri vyhodnocovaní týchto experimentov je možné vidieť presnosť pre *gpt-4* 91.45%, pri následnom experimentovaní bolo zistené, že veľká časť zle klasifikovaných fakturačných dokumentov pochádza z jpg súborov teda z fotografií. Čiže je možné konštatovať na základe tabuľky 4, že problém sa nenachádza v modeli samotnom, ale vo výstupe z OCR kroku, ktorý má problém znaky rozpoznať ak sa jedná o fotografiu nie vysokej kvality. Po vylúčení súborov jpg bola presnosť *gpt-4* zvýšená na 96.15%.

Tab. 4: Porovnanie OpenAI modelov

PDF	S	N	X
gpt-3.5-turbo-0125	96	3	5
gpt-3.5-turbo-1106	88	5	11
gpt-3.5-turbo-16k	93	6	5
gpt-4	100	3	1
gpt-4-0125-preview	100	2	2

5 Záver

Na základe získaných poznatkov je možné konštatovať, že riešenie problému extrakcie dát z fakturačných dokumentov je úspešne riešiteľné pomocou metodiky využívajúcej OCR a veľké jazykové modely s úspešnosťou **96.15%** pre pdf dokumenty a s úspešnosťou **91.45%** pre kombináciu jpg a pdf súborov.

Veľké jazykové modely sa každým dňom zlepšujú a posúvajú vpred. Za predpokladu zdokonalenia OCR kroku je

možné konštatovať, že presnosť navrhovaného algoritmu môže dosiahnuť aj takmer 100%.

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať Ing. Erich Stark, PhD. za odbornú pomoc a konzultačné hodiny.

Literatúra

- [1] IBM. What are Convolutional Neural Networks. <https://www.ibm.com/topics/convolutional-neural-networks>
- [2] Humza Naveed, Asad Ullah Khan a spol. A Comprehensive Overview of Large Language Models. 12 Júl 2023.
- [3] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhin. Attention Is All You Need. 12 Jún 2017.
- [4] Simplilearn What is OCR (Optical Character Recognition): Overview, and More. 24 Február 2023.

Rozhranie mozog-počítač pre osoby s telesným znevýhodnením

Bc. Matej Grznár, Bc. Dávid Ižof

¹Ústav vedy a výskumu, FEI STU v Bratislave

²Ústav automobilovej mechatniky

xgrznarm@stuba.sk

xizof@stuba.sk

Abstrakt – Cieľom tohto výskumu je navrhnúť a vyvinúť rozhranie mozog-počítač (BCI), konkrétne zamerané na P300 Speller. Tento systém poskytuje ľuďom s telesným znevýhodnením možnosť komunikácie a ovládania počítača bez potreby fyzickej interakcie. Využívame signál P300, ktorý je reakciou mozgu na zriedkavé alebo neočakávané podnety, čím umožňujeme užívateľom selektovať písmená alebo slová na virtuálnej klávesnici výhradne prostredníctvom mentálnej reakcie. Tento inovatívny prístup otvára nové cesty pre komunikáciu a interakciu s technológiami pre osoby obmedzené fyzickými schopnosťami, poskytujúc im tak väčšiu nezávislosť a zlepšenie kvality ich života.

1 Úvod

Rozhranie mozog-počítač (BCI) poskytuje priame komunikačné spojenie medzi ľudským mozgom a počítačom alebo iným elektronickým zariadením. Kľúčovým aspektom vývoja efektívnych BCI systémov je spracovanie signálov EEG (elektroencefalogram), ktoré zahŕňa extrakciu charakteristických vlastností získaných z mozgovej aktivity. Tento proces je nevyhnutný pre identifikáciu a interpretáciu neurálnych vzorcov, ktoré môžu byť prevedené na príkazy pre počítač alebo iné zariadenie. Extrakcia vlastností EEG signálov zahŕňa odstránenie šumu, identifikáciu relevantných signálov a ich transformáciu na užitočné informácie pre BCI aplikácie.

2 Elektroencefalografia

Zachytávanie elektrických signálov z mozgu cez elektroencefalografiu (EEG) je cenovo dostupná a užívateľsky priateľská metóda. Dnes existuje mnoho komerčne dostupných zariadení, ako je OpenBCI alebo Unicorn, ktoré sú prenosné a umožňujú bezdrôtové pripojenie. Tieto zariadenia umožňujú využívanie elektrických signálov z mozgu na ovládanie aplikácií.

Ľudský mozog obsahuje približne 100 miliárd neurónov, ktoré vďaka svojim elektrochemickým vlastnostiam umožňujú prenos elektrických signálov pre komunikáciu medzi sebou. Elektroencefalografia je metóda merania elektrických potenciálov, ktoré odrážajú túto aktivitu. Umožňuje tak monitorovať funkcie mozgu v čase. Na zaznamenávanie signálov sa používajú

elektrody umiestnené na hlave, pričom ich počet sa pohybuje od 1 do 256. Zaznamenávanie EEG je ovplyvnené umiestnením elektród, ich počtom, vzorkovacou frekvenciou, výberom referenčnej elektródy a kontamináciou signálu artefaktmi [1]. Existujú dva hlavné prístupy k zaznamenávaniu EEG, prevzaté z [4]:

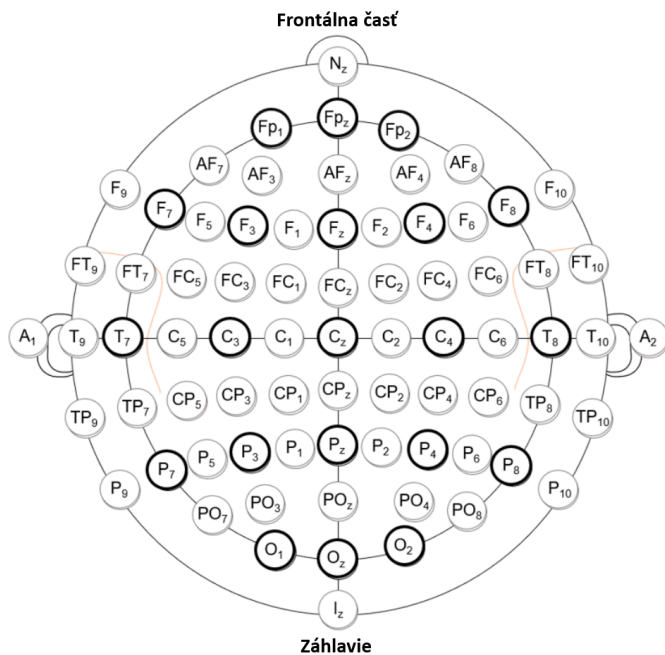
1. **invazívny** - elektródy sú implantované do mozgu,
2. **neinvazívny** - elektródy sú umiestnené na pokožke hlavy

V tejto práci sa zameriavame na neinvazívny prístup merania.

2.1 Rozmiestnenie elektród na hlave

Pri umiestňovaní elektród na hlavu sa využívajú štandardizované metódy, najmä stratégie „10-20“, „10-10“ a „10-5“, ktoré sa odlišujú počtom elektród a ich umiestnením. Základná stratégia „10-20“ používa 21 elektród vrátane jednej referenčnej a vychádza z rozstupov, ktoré predstavujú 10% alebo 20 % frontálno-záhlavnej vzdialenosti alebo vzdialenosti ľavého a pravého preaurikulárneho bodu na lebke, čo umožňuje systematické rozmiestnenie elektród. Táto stratégia zabezpečuje, že na každej strane hlavy sú elektródy umiestnené symetricky s nepárnymi označeniami na ľavej a párnymi označeniami na pravej časti hlavy. Stredný rad elektród je označený písmenom „Z“ pre nulovú pozíciu [2].

Rozloženie elektród umožňuje ciele zaznamenávanie aktivít rôznych častí mozgu. Elektródy s označením „F“ monitorujú činnosť čelného laloku, ktorý je kľúčový pre emocionálnu reguláciu, rozhodovanie a pohyb. „P“ označuje elektródy na temennom laloku, dôležité pre spracovanie senzorických informácií a orientáciu. „O“ sú elektródy na okcipitálnom laloku, kde sa spracúvajú vizuálne podnety. Elektródy „T“ zaznamenávajú aktivitu v temporálnom laloku, zodpovednom za spracovanie sluchu a pamäte. „C“ označuje centrálnu oblasť, ktorá nie je priamo spojená s konkrétnym lalokom, ale skôr zaznamenáva aktivitu z okolitých oblastí. Ušné lalôčky, označené ako „A“, môžu slúžiť ako referenčné body. Tento systém rozloženia poskytuje komplexný prehľad o mozgovej aktivite v rôznych oblastiach [1].



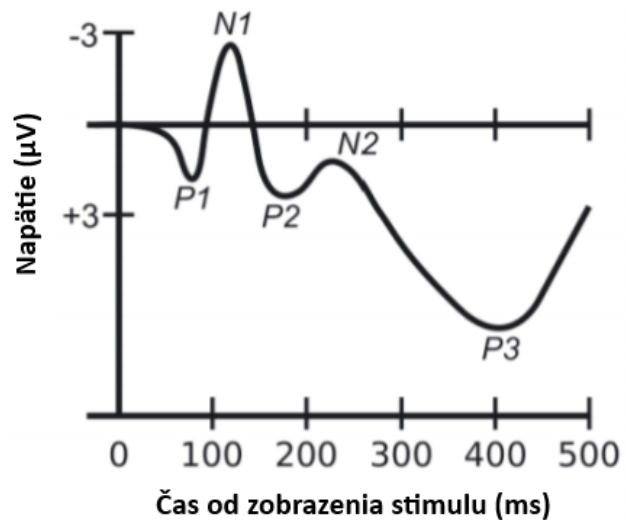
Obr. 1: Systém umiestnenia elektród "10-10"(systém "10-20"je zvýraznený hrubým obrysom). Prevzaté a upravené z [2]

2.2 Charakteristiky EEG signálov

EEG signály sa charakterizujú na základe amplitúdy, frekvencie, tvaru a umiestnenia elektród na hlave. Amplitúda EEG sa obvykle pohybuje v rozmedzí od 1 do 100 μV a frekvencia môže byť od 0,5 Hz do viac ako 30 Hz [5]. Medzi špecifické charakteristiky EEG patria aj potenciály súvisiace s udalosťami, ako sú P300, N250 a N170, ktoré majú význam pre našu aplikáciu s rozhraním mozog-počítač.

Potenciály súvisiace s udalosťami (ERP) predstavujú charakteristiku EEG signálov, ktorú dokážeme vygenerovať pomocou vonkajších stimulov. Tento stimul môže predstavovať napríklad svetelný záblesk alebo zvuk. Tieto ERP predstavujú merateľné mozgové odozvy, ktoré vznikajú ako priama reakcia na špecifické senzorické, kognitívne alebo motorické podnety [7].

Pre našu prácu sme si zvolili vizuálny stimul ERP nazývaný ako P300. P300 predstavuje pozitívnu zložku vyvolaného potenciálu, ktorá sa môže objaviť približne 300 milisekúnd po zobrazení stimulu. Užívateľ sa sústreďuje na jeden blikajúci objekt, pričom ignoruje ostatné objekty. Keď sa zobrazí stimul, na ktorý sa subjekt sústreďuje, vyvolá to P300 potenciál narozdiel od ostatných blikajúcich objektov. BCI založené na P300 majú široké spektrum využitia pri ovládaní mechanických prístrojov alebo virtuálnych objektov [3]. Naším cieľom je využiť túto charakteristiku EEG signálov vo vývoji našej BCI aplikácie, ktorá je určená na poskytovanie podpory a zlepšovanie kvality života telesne znevýhodnených osôb.



Obr. 2: EEG signál obsahujúci komponenty ERP, vrátane N100 (N1) a P300 (P3). Všimnite si, že ERP je znázornené s negatívnymi napätiami nahor, bežne zaužívané pri výskume ERP. Prevzaté a upravené z [10]

2.3 Artefakty a šum v dátach

Artefakty v dátach predstavujú nežiaduce signály, ktoré môžu vzniknúť počas zberu dát a skresliť výsledky. Môžu mať rôzny pôvod a charakter. Všeobecne ich delíme na dva hlavné typy, prevzaté z [11, 12]:

- **Biologické artefakty** sú výsledkom fyziologickej aktivity subjektu. Zahrňujú:
 - Pohyby očí a žmurkanie, ktoré generujú elektrookulografické artefakty.
 - Svalová aktivita, vedúca k elektromyografickým artefaktom.
 - Srdcová činnosť, ktorá spôsobuje artefakty elektrokardiogramu.
- **Externé artefakty** sú dôsledkom vonkajších rušivých faktorov a chýb pri experimentálnom nastavení. Zahrňujú:
 - Elektrické rušenie z okolitého prostredia, napríklad šum z elektrickej siete.
 - Chyby spojené s umiestnením a upevnením elektród.
 - Artefakty vznikajúce pri nadmernom tlaku elektródy na hlavu.

Rozpoznanie a korekcia týchto artefaktov je kľúčová pre zabezpečenie presnosti a spoľahlivosti zberu dát.

2.4 Filtrácia dát a artefaktov

Pri analýze údajov z EEG sa používajú filtre na predspracovanie neupravených EEG signálov pred ďalšou analýzou. Pre transformáciu vstupného signálu $x[n]$ na výstupný $y[n]$, použijeme vzťah:

$$y[n] = \sum_{l=0}^M a_l y[n-l] + \sum_{l=0}^N b_l x[n-l], \quad (1)$$

kde $x[n-l]$ a $y[n-l]$ reprezentujú postupne predchádzajúce vzorky vstupného a výstupného signálu. Koeficienty b_l a a_l určujú váhu týchto vzoriek, pričom M a N predstavujú počet zohľadnených vzoriek vstupu a výstupu [13]. Z tohto vzorca je možné odvodiť každý z nižšie opísaných filtrov, prevzaté z [13]:

- **Nízkopriepustný filter (LPF):** Tento filter ponecháva len frekvencie nižšie ako určitá hranica a je efektívny pri odstránení vysokofrekvenčného šumu z EEG signálu.
- **Vysokopriepustný filter (HPF):** Odstraňuje nízke frekvencie nižšie ako nastavená hranica, čo pomáha pri redukcii artefaktov spôsobených nízkofrekvenčného šumu z EEG signálu.
- **Pásmový filter (Bandpass filter):** Kombinuje vlastnosti LPF a HPF tak, že ponecháva frekvencie len v špecifickom rozsahu. Je schopný ponechať konkrétne frekvenčné pásmo mozgovej aktivity a eliminuje všetko mimo tohto rozsahu.
- **Notch Filter:** Je navrhnutý tak, aby potlačil špecifické frekvencie zo signálu, pričom ostatné frekvencie ponecháva relatívne neovplyvnené. Jeho hlavné využitie je v elektro-technike a spracovaní signálov, kde je cieľom odstrániť nežiaduce frekvencie, ako sú napríklad rušivé frekvencie z elektrickej siete (50 Hz alebo 60 Hz).

3 Návrh systému

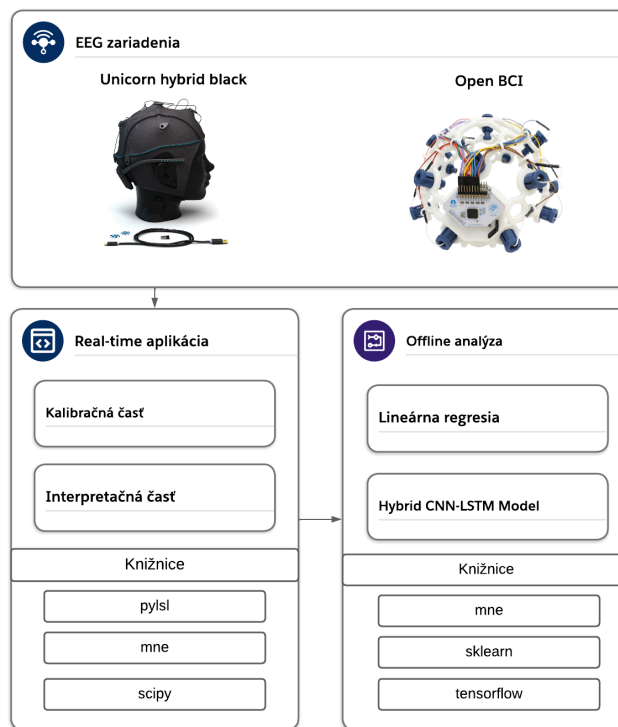
Naša implementácia BCI aplikácie, predstavuje viacvláknovú platformu navrhnutú v programovacom jazyku Python. Samotná aplikácia je štruktúrovaná do dvoch častí, vid' obrázok 3 kde:

- Real-time aplikácia priama a spracúva dáta. Obsahuje kalibračnú a interpretačnú časť.
- Offline analýzu a trénovanie modelu.

Aplikácia je navrhnutá tak, aby bola schopná prijímať dáta z rôznych EEG zariadení. Vránci kalibrácie môže užívateľ dotrénovať už vopred natrénovaný model s vlastnými EEG dátami získanými v kalibračnej časti. Prvotný model sme trénovali a testovali na dátach z BCI výzvy, ktorá bola súčasťou konferencie IEEE o neurálnom inžinierstve [14], zozbieraných za účelom výskumu P300 potenciálov.

3.1 Kalibračná časť aplikácie

V rámci kalibračnej fázy aplikácie je od používateľa vyžadované, aby sa mentálne sústredil na špecifický vizuálny stimul a kognitívnym počítaním, kvantifikoval frekvenciu jeho blikania. Aplikácia ponúka používateľom možnosť výberu konkrétnych znakov, na ktoré majú sústrediť pozornosť počas kalibračného procesu. Z našich pozorovaní sme zistili, že pre dosiahnutie optimálnych výsledkov je nevyhnutné vybrať



Obr. 3: Architektúra aplikácie

minimálne päť znakov. Aplikácia navyše umožňuje definovanie vlastnej matice znakov, čo otvára priestor pre prispôbenie systému špecifickým potrebám používateľa, napríklad pre vytvorenie virtuálnych ovládacích rozhraní.

Aby sme zabezpečili dostatočnú variabilitu stimulov a predišli možnosti predvídania nasledujúceho znaku zo strany používateľa, systém zobrazuje každý vybraný znak v náhodných časových intervaloch.

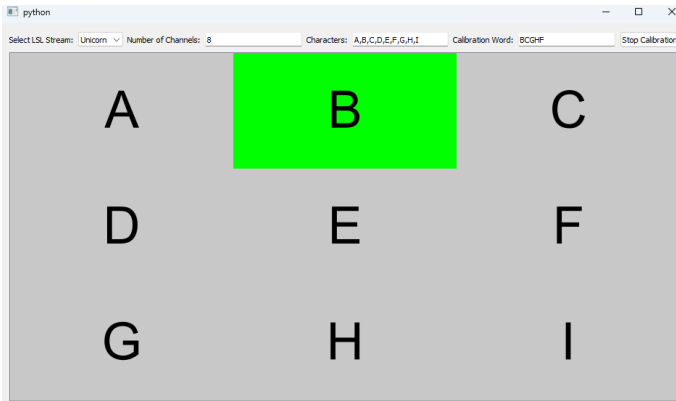
Na zvýšenie efektívnosti vyvolania P300 signálu, pri každom stimule zobrazujeme obrázok so zeleným pozadím a vizuálne stimulujúcim prvkom. Táto metóda sa ukázala byť výrazne efektívnejšia v indukovaní silnejšej mentálnej reakcie.

Pri prezentácii každého stimulu je presný čas jeho zobrazenia uložený s časom procesora, čo nám umožňuje následne dosiahnuť presnú synchronizáciu vizuálnych stimulov s prijatými EEG dátami.

3.2 Prijímanie dát

Dáta z EEG sú získavané a prenášané v reálnom čase prostredníctvom protokolu Lab Streaming Layer (LSL), ktorý predstavuje štandard pre akvizíciu a distribúciu dát v neurovedeckých experimentoch. Protokol LSL je integrovaný do našej aplikácie s využitím knižnice pylsl. EEG signály sú prijímané so vzorkovacou frekvenciou 200 Hz, z ôsmich kanálov. Tieto kanály sú primárne umiestnené na zadnej časti hlavy, čo je oblasť mozgu zodpovedná za spracovanie vizuálnych informácií.

Spracovanie dát z EEG je realizované na oddelenej vlákne, aby sa predišlo akémukoľvek potenciálnemu oneskore-



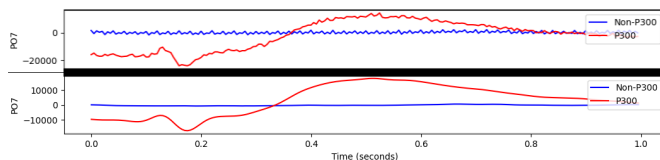
Obr. 4: Kalibračná časť aplikácie

niu alebo zdržaniu hlavnej aplikácie. Pri ukončení kalibrácie sú EEG dáta synchronizované s časmi zobrazenia stimulov.

3.3 Offline analýza

Dáta získané v kalibračnej časti musia byť najprv predspracované, aby sa pred ďalšou analýzou odstránili všetky nežiaduce artefakty. Na tento účel využívame knižnicu MNE [15], ktorá ponúka komplexný súbor nástrojov pre prácu s neurovedeckými dátami.

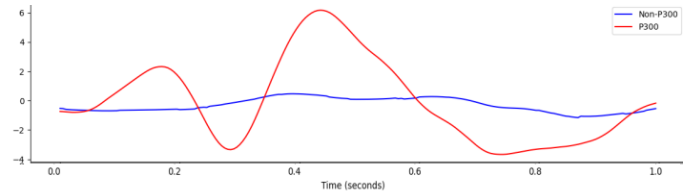
Aplikujeme dva hlavné typy filtrov na EEG dáta: notch filter a bandpass filter, ktoré sú diskutované vyššie. Notch filter je nastavený na odstránenie frekvencií 50 Hz, čím efektívne eliminuje rušenie spôsobené elektrickou sieťou v Európe. Bandpass filter je menený v rôznych testoch. Ukážkové filtrované dáta vidíme na obrázku 5:



Obr. 5: Rozdiel medzi nefiltrovanými EEG dátami (hore) a filtrovanými EEG dátami (dole)

Dáta sme nasegmetovali na 1 sekundové epochy reprezentujúce P300 a non-P300 signály. Na vizualizáciu filtrovaných datasetov sme aplikovali proces spriemerovania cez všetky sekundové epochy označené ako P300 a aplikovali sme rovnaký postup pre non-P300. Tento postup nám umožnil identifikovať distinkatívne rozdiely medzi P300 a non-P300 signálmi, čo je demonštrované na priloženom obrázku 6, kde modrá krivka reprezentuje non-P300 signály a červená krivka, ktorá vykazuje signifikantný nárast približne v časovom okne 0.3 sekundy, ilustruje charakteristický potenciál P300 signálu.

Dáta sme rozdelili na trénovaciu a testovaciu sadu, pričom 20% dát je vyhradených pre testovanie modelu. V rámci našej práce sme testovali úspešnosť klasifikácie pomocou týchto klasifikačných metód:



Obr. 6: Grafické zobrazenie P300 vs non-P300 na elektróde P7

1. **Lineárna Diskriminačná Analýza (LDA):** LDA bola využitá na klasifikáciu binárnych EEG dát. Kľúčovým aspektom bol výber a optimalizácia hyperparametra *shrinkage*, ktorý slúžil na zlepšenie výkonnosti modelu v kontexte klasifikácie. Jeho optimálnu hodnotu sme našli algoritmičky.
2. **Klasifikácia pomocou Support Vector Machine (SVM):** Táto metóda sa zameriava na vytvorenie optimálnej hyperplochy v multidimenzionálnom priestore príznakov, ktorá efektívne oddeľuje súbory dát patriace do odlišných kategórií.
3. **Hybridný CNN-LSTM model:** Využili sme sekvenčný model zahŕňajúci konvolučné vrstvy (Conv1D), vrstvy MaxPooling, Long Short-Term Memory (LSTM) vrstvy, doplnené o plne prepojené vrstvy (Dense) a Dropout vrstvu na redukciu rizika pretrénovania. Model bol optimalizovaný pomocou Adam optimalizátora a trénovaný s použitím metódy predčasného ukončenia trénovania (Early Stopping) na minimalizáciu pretrénovania a zlepšenie generalizácie.

3.4 Real-time interpretácia

Na real-time interpretáciu využívame model, ktorý sme pripravili pri offline analýze. Pri tomto spracovaní je nevyhnutné dáta rovnako predspracovať. Na filtráciu opäť využívame knižnicu MNE [15]. Pri real-time interpretácii je úlohou subjektu sústredenie sa na vybraný znak a počítanie bliknutí. Bliknutie sa deje každých 1,5 sekundy, pričom do modelu sú odosielané sekundové dáta a zvyšný čas je ponechaný na vyhodnotenie stimulu. Nájdenie myšlieného znaku tak môže trvať pomerne dlho, v závislosti na veľkosti matice. Možnosti optimalizácie zahŕňajú súčasné preblikávanie stĺpcov a riadkov s cieľom nájsť najrýchlejšiu cestu k požadovanému znaku. Viaceré možnosti je podrobne diskutovaných v kapitole 3.7 venovanej návrhom na zlepšenie.

3.5 Použitý hardware

Našu aplikáciu sme testovali na dvoch zariadeniach:

- **Unicorn Hybrid Black:** 8 kanálový EEG headset, ktorý umožňuje záznam mozgovej aktivity s rozlíšením 24 bitov a vzorkovacou frekvenciou 250 Hz na kanál. Elektrody sú navrhnuté pre suché aj mokré merania. Pre zariadenie Unicorn využívame konfiguráciu kanálov: ['Fz', 'C3', 'Cz', 'C4', 'Pz', 'PO7', 'Oz', 'PO8'].

- **OpenBCI Cython** - doska OpenBCI Cyton je Arduino-kompatibilný, 8-kanálový neurálny modul s 32-bitovým procesorom. Dáta sú vzorkované s frekvenciou 250 Hz. Konfigurácia kanálov pre OpenBCI zahŕňa nasledujúce umiestnenia elektrod: ['Fp1', 'Fp2', 'C3', 'C4', 'P7', 'P8', 'O1', 'O2']. Tieto kanály sú ideálne pre zachytenie širokého spektra mozgových vln z rôznych oblastí mozgu.

3.6 Testovanie a analýza výsledkov

Analýzu sme realizovali na troch odlišných modeloch strojového učenia – SVM, LDA a hybridný model CNN-LSTM – s rôznym nastavením Notch a Bandpass filtrov. Cieľom bolo posúdiť ich schopnosť efektívne klasifikovať EEG dáta v závislosti od frekvenčného rozsahu signálov. V nasledujúcej tabuľke sú podrobné výsledky týchto testov, vrátane presnosti každého modelu na testovacej sade dát pri špecifických frekvenčných nastaveniach filtrov.

Číslo testu	Model	Notch	Bandpass - Low	Bandpass - High	Presnosť
1	SVM	50	0.5	30	89%
2	LDA	50	0.5	30	88%
3	CNN-LSTM	50	0.5	30	86%
4	SVM	50	0.1	15	83%
5	LDA	50	0.1	15	87%
6	CNN-LSTM	50	0.1	15	85%
7	SVM	50	0.2	5	78%
8	LDA	50	0.2	5	85%
9	CNN-LSTM	50	0.2	5	76%

Modely SVM a LDA dosiahli vysokú presnosť, najvyššie 89% pre SVM a 88% pre LDA, pri optimálnych nastaveniach filtrácie (Notch na 50 Hz, Bandpass Low na 0.5 Hz a Bandpass High na 30 Hz). Hybridný model CNN-LSTM tiež ukázal konkurencieschopnú presnosť 86%. Zníženie frekvenčného pásma Bandpass filtra viedlo k poklesu presnosti pre SVM na 83%, zatiaľ čo LDA si udržalo silnú pozíciu s 87% a CNN-LSTM s 85% presnosťou. Ďalšie zníženie Bandpass High na 5 Hz spôsobilo pokles presnosti u SVM a CNN-LSTM, kým LDA si zachovalo relatívne vysokú presnosť 85%, čo naznačuje jeho robustnosť voči úpravám frekvenčného pásma.

3.7 Návrhy na zlepšenie

V rámci vylepšenia aplikácie využívajúcej P300 potenciály v BCI sfére je dôležité zameranie sa na niekoľko aspektov. Kľúčovým prvkom je optimalizácia algoritmov pre spracovanie signálu, kde vylepšené metódy filtrácie a extrakcie charakteristík môžu významne zvýšiť presnosť rozpoznávania P300 komponentov. Ďalej je dôležité rozšíriť a diverzifikovať datasety používané pre tréningové fázy, aby model mohol efektívne generalizovať a adaptovať sa na rozmanité vzory mozgovej aktivity rôznych používateľov. Implementácia adaptívneho učenia, ktorá by umožnila aplikácii prispôbovať sa individuálnym EEG charakteristikám každého používateľa, môže predstavovať ďalší významný krok k personalizácii a zvýšeniu efektivity takýchto systémov. Rozšírenie kompatibility aplikácie pre integráciu s rôznymi platformami môže prispieť k širšiemu spektru možností využitia. Rovnako využitie hybridných modelov, ktoré kombinujú P300 s inými biomarkermi, môže poskytnúť robustnejší prístup k analýze a interpretácii mozgovej aktivity.

4 Záver

Implementácia rozhrania mozog-počítač, otvára nové možnosti v oblasti asistívnej technológie a predstavuje prelom v možnostiach komunikácie a interakcie pre osoby s telesnými znevýhodneniami. Naše testovanie rôznych modelov EEG zariadení a aplikácie rozličných klasifikačných algoritmov strojového učenia odhalilo obrovský potenciál, ale zároveň poukázalo na výzvy spojené s optimalizáciou týchto systémov pre každodenné využitie. Aby bol tento potenciál naplno využitý, je nevyhnutné zamerať sa na zvyšovanie úspešnosti identifikácie P300 signálov, čo si vyžaduje neustále zdokonaľovanie algoritmických metód a zároveň zjednodušenie procesu kalibrácie a používania systému, aby bol prístupný aj bez nutnosti odborného dohľadu.

Význam tejto práce prispieva k hlbšiemu pochopeniu interakcie medzi ľudským mozgom a počítačovými systémami, čím otvára dvere pre budúce inovácie v industrii 5.0, medicíne a ďalších odvetviach.

Podakovanie

Touto formou by sme sa radi poďakovali vedúcim práce za ich pomoc, pravidelné konzultácie a podporu počas práce na tomto projekte.

Literatúra

- [1] J. Wolpaw and E.W. Wolpaw. *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*. Oxford University Press, USA, 2012. ISBN 9780195388855. Available: https://books.google.sk/books?id=tC2UzuC_WBQC.
- [2] Seunghyeok Hong a Hyun Baek, *Drowsiness Detection Based on Intelligent Systems with Nonlinear Features for Optimal Placement of Encephalogram Electrodes on the Cerebral Area*, Sensors, vol. 21, strany 1255, február 2021, DOI: 10.3390/s21041255.
- [3] Avishka Athapaththu, Prageeth Dassanayake, Sewwandie Nanayakkara, *Self Paced Brain Computer Interface On Sensorimotor Rhythms For Virtual Objects Controlling*, Technická správa, University of Peradeniya, Január 2021, Poznámka: Semester 8 Mid Report - Final Year Project (kurzy CO421 & CO425) správa predložená ako požiadavka pre získanie titulu B.Sc.Eng. v odbore počítačové inžinierstvo, Vedúci: Dr. Isuru Nawinne (University of Peradeniya), Prof. Roshan Ragel (University of Peradeniya), a Mr. Theekshana Dissanayake (Queensland University of Technology).
- [4] R. Žitný. *Identifikace a verifikace osob s využitím EEG*. Bakalárska práca, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2021. 51 strán.
- [5] S. Siuly, Y. Li, a Y. Zhang, *EEG Signal Analysis and Classification: Techniques and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2017, Health Information Science, ISBN 978-3-319-47652-0.
- [6] K. S. Narendra, Y.-H. Lin, and L. S. Valavani. Stable adaptive controller design, part ii: Proof of stability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25(3):440–448, June 1980.
- [7] Steven Bressler a Mingzhou Ding, *Event-Related Potentials*, v: Journal of Affective Disorders, vol. 62, 2006, ISBN 9780471740360, DOI: 10.1002/9780471740360.ebs0455.
- [8] K. S. Narendra, N. O. Oleng', and S. Mukhopadhyay. Decentralised adaptive control with partial communication. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, 153(5):546–555, September 2006.
- [9] S.I. Niculescu and A. M. Annaswamy. An adaptive smith-controller for time-delay systems with relative degree $n^* \leq 2$. *Systems & Control Letters*, 49(5):347–358, 2003.
- [10] Manuel Carzaniga a Lorenzo Gualniera, *Real-time EEG denoising for embedded BCI applications*, Diplomová práca, Politecnico di Milano, Miláno, 2021, 199 strán.
- [11] EEG/ERP analysis, Nidal Kamel and Aamir Saeed Malik (Eds.), CRC Press, October 2014, London, England.
- [12] Clinical electroencephalography, Oriano Mecarelli (Ed.), Springer Nature, 1st edition, June 2019, Cham, Switzerland.
- [13] Brain-computer interfaces, Jonathan Wolpaw and Elizabeth Winter Wolpaw (Authors), Jonathan R Wolpaw and Elizabeth Winter Wolpaw (Eds.), Oxford University Press, January 2012, New York, NY.
- [14] Jérémie Mattout, Manu, maucle, Wendy Kan, *BCI Challenge @ NER 2015*, Kaggle, 2014, Dostupné na: <https://kaggle.com/competitions/inria-bci-challenge>.
- [15] Alexandre Gramfort, Martin Luessi, Eric Larson, Denis A. Engemann, Daniel Strohmeier, Christian Brodbeck, Roman Goj, Mainak Jas, Teon Brooks, Lauri Parkkonen, Matti S. Hämäläinen, *MEG and EEG Data Analysis with MNE-Python*, 2013, <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00267>.

Sekcia 3

Elektroenergetika

Goniofotometer a goniofotometria v praxi

David Kompan¹

¹ Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

xkompan@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zaoberá identifikáciou a elimináciou chýb v meraniach goniofotometrom. Cieľom je dosiahnuť spoľahlivé výsledky meraní kriviek svietivosti, čo je kritické pre návrh osvetlenia v praxi.

1 Úvod

Goniofotometria je dôležitý proces vo fotometrii svietidiel, pri ktorom sa používa prístroj, tzv. goniofotometer, na meranie intenzity osvetlenia vo vybraných smeroch resp. meracích rovinách. Ide o kľúčový proces pri návrhu a hodnotení svietidiel resp. svetelných zdrojov. Merania goniofotometrom slúžia na odvodenie fotometrických charakteristík, transformujú sa do grafickej podoby na tzv. krivky svietivosti. Tieto krivky zobrazujú rozloženie svietivosti zdroja svetla v rôznych smeroch.

Na základe meraní goniofotometrom je možné optimalizovať rozmiestnenie svietidiel a minimalizovať nežiaduce efekty, ako je oslnenie alebo nerovnomerné osvetlenie. Fotometrické charakteristiky získané pomocou goniofotometrie sú nevyhnutné pri certifikácii svietidiel a ich zhode s normami.

V praxi sa používajú rôzne typy goniofotometrov, ktoré sa líšia princípom merania, čím nadobúdajú odlišné vlastnosti. Dôsledkom týchto vlastností môžu byť aj chyby merania.

Táto práca sa bude zaoberať identifikáciou zdrojov chýb merania goniofotometrom, a spôsobmi ako možno tieto chyby eliminovať alebo zohľadniť vo výsledku merania.

2 Goniofotometer

Z hľadiska dĺžky optickej dráhy možno členiť goniofotometre na:

- goniofotometer s blízkym polom,
- goniofotometer so vzdialeným polom.

Goniofotometer s blízkym polom využíva ako detektor jasomer v spolupráci s luxmetrom vo vzdialenosti na ktorej sa neuplatňuje inverzný štvorcový zákon.

Goniofotometer so vzdialeným polom využíva ako detektor luxmeter ktorý sa pohybuje okolo svietidla resp. svetelného zdroja v nemennej vzdialenosti, na ktorej sa uplatňuje inverzný štvorcový zákon. Táto vzdialenosť sa nazýva fotometrická skúšobná vzdialenosť. Goniofotometre so vzdialeným polom sa vyrábajú v rôznych konštrukčných vyhotoveniach, s odlišnými nedostatkami.

Goniofotometer Typu 1 otáča svietidlom v dvoch osiach pričom detektor je nehybný. Pri meraní pomocou tohto typu goniofotometra poskytujú presné výsledky iba svetelné zdroje ktoré majú dovolenú ľubovoľnú prevádzkovú polohu, teda ich fotometrické parametre sú nezávislé od orientácie. Ide predovšetkým o žiarovky a LED svetelné zdroje. Alternatívne je možné za pomoci referenčného merania vykonávať korekciu na zmenu osvetlenosti vplyvom natočenia svetelného zdroja. [1]

Tento nedostatok eliminuje goniofotometer typu 2, ktorý svietilo resp. svetelný zdroj natáča vo vertikálnej osi a detektor v horizontálnej. [1] Jeho obmedzením je však fotometrická skúšobná vzdialenosť vo vzťahu k rozmerom meracieho pracoviska. Je preto používaný najmä pri meraní malých svetelných zdrojov. S rovnakým obmedzením pracuje aj goniofotometer typu 4, ktorý má svietidlo nehybné a pohybuje fotometrom vo vertikálnej aj horizontálnej osi.

Goniofotometer typu 4, nazývaný aj zrkadlový goniofotometer, dovoľuje aj meranie svietidiel závislých od orientácie. Zrkadlový goniofotometer natáča svietidlo vo vertikálnej osi a zrkadlovú sústavu v horizontálnej osi, čím minimalizuje priestorové nároky vo vzťahu k fotometrickej skúšobnej vzdialenosti. Použitie tohto typu goniofotometra však prináša aj odlišné zdroje chýb, ktorých pôvodom môže byť vo výraznej miere aj uplatnenie zrkadlovej sústavy. [2]

Presnosť merania goniofotometrom závisí od mnohých faktorov. Pre dosahovanie čo najpresnejších meraní je potrebné tieto faktory zohľadniť, a pokiaľ možno úplne eliminovať. Všeobecne pri meraní svetelných zdrojov a svietidiel treba brať do úvahy nasledujúce zdroje chýb: [3]

- teplota okolia,
- kolísanie svetelného toku meraného zdroja,
- linearita meracích prístrojov,
- blúdivé svetlo,
- prevádzka kalibračného etalónu.

Ďalej goniofotometre vyžadujú zvažovanie ďalších zdrojov chýb: [3]

- plochosť (rovinnosť) zrkadiel,
- spektrálna odrazivosť zrkadiel,
- presnosť polohovania,
- akceptačná oblasť detektora.

Pri meraní osvetlenosti musí byť dodržaná fotometrická skúšobná vzdialenosť, na ktorej sa uplatňuje inverzný štvorcový zákon. [2]

2.1 Goniofotometre v laboratóriu FEI

V skúšobnom laboratóriu svetelnotechnických zariadení (SLSZ) FEI STU sa nachádzajú dva goniofotometre: ručný goniofotometer typu 1 a zrkadlový goniofotometer.

Ručný goniofotometer je potrebné za pomoci sklonomerov manuálne nastaviť do meraného vychýlenia, a odčítať hodnotu na luxmetri.

V prípade zrkadlového goniofotometra sú pohon osí (vertikálna, horizontálna) ako aj odčítanie hodnôt osvietenosti riadené elektronicou prostredníctvom počítačového softvéru. Polohu svietidla resp. výšku ramena vertikálnej osi je možné nastaviť manuálne prostredníctvom ovládacieho panelu.

S uvažovaním vyššie popísaných zdrojov chýb, bola vykonaná séria meraní a výpočtov, ktorých cieľom bolo zdroje chýb zohľadniť v budúcich meraniach, a pokiaľ možno úplne eliminovať:

- Umiestnenie svietidla resp. svetelného zdroja v goniofometri,
- Overenie plochy záberu fotometra,
- Určenie hodnoty blúdívého svetla,
- Korekcia polohovania osí goniofotometra,
- Testovanie rovinnosti zrkadiel,
- Korekcia spektrálnej odrazivosti zrkadiel,
- Korekcia na chybu spektrálnej citlivosti fotometra.

Podstata jednotlivých krokov ako aj pracovný postup meraní a výpočtov sú popísané v nasledujúcich kapitolách.

2.2 Umiestnenie svietidla resp. svetelného zdroja v goniofometri

Pred každým meraním je potrebné merané svietidlo resp. svetelný zdroj správne umiestniť do goniofotometra. Predpokladom presných meraní je zhodnosť osi rotácie goniofotometra, s fotometrickým stredom svietidla resp. svetelného zdroja. Nesprávne umiestnenie svietidla môže vo výsledku merania viesť k chybným hodnotám svetivosti.

V prípade oboch goniofotometrov je nastavenie relatívne jednoduché. V minulosti bolo vykonané overenie umiestnenia svietidla a nastavenie fotometrického stredu goniofotometra. Taktiež boli vynesené značky podľa ktorých možno za pomoci samonivelizačného lasera nastaviť polohu svietidla aj luxmetra.

2.3 Overenie plochy záberu fotometra

Toto overenie je potrebné vykonať, aby sa zabezpečilo, že celá plocha svetelnočinnnej časti svietidla resp. svetelného zdroja, je viditeľná zo všetkých smerov citlivej plochy luxmetra. Pokiaľ by tomu tak nebolo, luxmeter by odčítal nesprávnu osvetlenosť.

Na goniofotometer bolo umiestnené merané svietidlo. Laserový lúč bol umiestnený na miesto fotometrickej hlavice tak, aby sa premietal na miesto umiestnenia svietidla resp. svetelného zdroja. Bod laserového lúča bol potom premietaný na okraje svetelnočinnných častí svietidla resp. svetelného zdroja, ktoré boli najďalej od jeho fotometrického stredu.

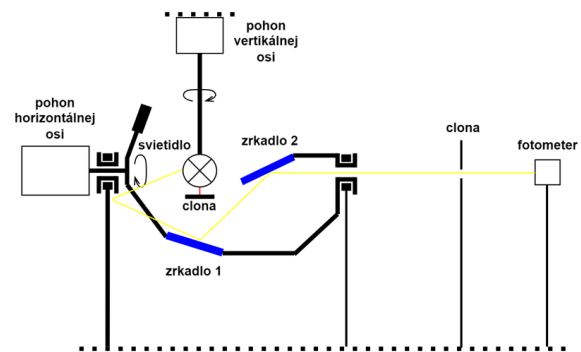
V prípade, kedy sa bod laserového lúča vplyvom tienenia stratil, bol laserový lúč resp. umiestnenie hlavice luxmetra priblížené ku goniofotometru resp. bola upravená poloha clony

v prípade ručného goniofotometra. Proces sa opakoval, pokiaľ bol priemet bodu na krajoch svietidla nerušený.

2.4 Určenie hodnoty blúdívého svetla

Blúdivé svetlo, je svetlo ktoré je nechcene zachytávané fotometrickou hlavice goniofotometra. Pred určením hodnoty blúdívého svetla, je nevyhnutná jej minimalizácia. V SLSZ sú preto povrchy miestnosti a zariadení upravené čiernou farbou, a počas merania sa na podlahu umiestni čierna látka. Vplyv blúdívého svetla pomáha eliminovať aj clona, ktorá je umiestnená pred fotometrom. Tá vymedzuje pozorovací uhol tak, aby fotometer zachytával najmä meraný svetelný zdroj.

Hodnota blúdívého svetla bola určená meraním s clonou umiestnenou pred svietidlom. To zabránilo prechod priamej zložky svetla k hlavici luxmetra. Do goniofotometra bolo umiestnené svietidlo a odčítaná bola hodnota osvetlenosti pre každé merané uhlové natočenie horizontálnej osi.



Obr. 1. Meranie blúdívého svetla

Meranie blúdívého svetla je potrebné vykonať pre každé merané svietidlo resp. svetelný zdroj osobitne, nakoľko hodnota blúdívého svetla sa mení vzhľadom na svetelný tok a geometriu svietidla.

Hodnotu blúdívého svetla E_b je potrebné zohľadniť pri každej meranej hodnote osvetlenosti nasledovne:

$$E_{c,\gamma kor} = E_{c,\gamma mer} - E_b \quad (1)$$

kde $E_{c,\gamma mer}$ je intenzita osvetlenia pred zavedením korekcie, a $E_{c,\gamma kor}$ je intenzita osvetlenia po zavedení korekcie.

2.5 Korekcia polohovania osí goniofotometra

Pri meraní goniofotometrom je z konštrukčného hľadiska pre zabezpečenie presnosti polohovania potrebné dodržať: [2]

- rozlíšenie uhlového merania $\leq 0,1^\circ$,
- rozdiel súbežnosti osí rotácie goniofotometra a osí svietidla by mala byť $\leq 0,5^\circ$.

V prípade ručného goniofotometra je sklon osí nastavovaný manuálne, a je teda možné zabezpečiť presnosť polohovania osí.

Softvér zrkadlového goniofotometra polohuje osi prostredníctvom servopohonov, pričom odčíta aktuálnu polohu pomocou inkrementálnych snímačov polohy. Spojenie týchto zariadení je schopné zabezpečiť vysokú presnosť polohovania, avšak v prípade zrkadlového goniofotometra v SLSZ FEI STU sú na prenos síl používané reťazové prevody, ktoré do merania zavádzajú nepravidelné chyby. Softvér goniofotometra pre

tento účel obsahuje korekčnú maticu, ktorá každej meranej hodnote priradí odchýlku od skutočnej hodnoty. Na základe toho bola vykonaná korekcia polohovania osí a vytvorená korekčná matica.

Korekcia polohovania horizontálnej osi prebehla, s uvážením noriem STN EN13032-2 [4] a STN EN13201-3 [5], v rozsahu 0-180° v kroku 2,5°. Na rameno goniofotometra bol umiestnený sklonomer pre odčítanie skutočnej hodnoty naklonenia ramena. Pre každý z krokov bola odčítaná a zaznamenaná požadovaná a skutočná hodnota naklonenia. Rozdiely požadovaných a skutočných hodnôt, odchýlky, boli doplnené do korekčnej matice v softvéri goniofotometra .

Tab. 1. Výsledky korekcie polohovania osí

		Pred zavedením korekcie	Po zavedení korekcie
Maximálna odchýlka [°]	Priamy smer	1.5	0.3
	Spätňý smer	1.4	0.4
Priemerná odchýlka [°]	Priamy smer	0.9	0.1
	Spätňý smer	0.8	0.1

Po vložení korekčnej matice do softvéru goniofotometra bolo vykonané overujúce meranie, ktoré ukázalo maximálnu odchýlku 0,4°. Norma STN EN 13032-1 [2] hovorí, o rozdiel súběžností osí rotácie goniofotometra a osí svetidla maximálne 0,5°, a teda možno konštatovať že v zmysle normy je korekcia vyhovujúca.

Korekcia polohovania vertikálnej osi prebehla, s uvážením noriem STN EN13032-2 [4] a STN EN13201-3 [5], v rozsahu 0-360° v kroku 5°, za pomoci ručičkového uhlomera. Po doplnení korekčnej matice do softvéru goniofotometra však softvér s maticou pre uhly vertikálnej osi nepočítal, a teda možno konštatovať že korekcia je bez zásahu do softvéru goniofotometra neúčinná.

2.6 Testovanie rovinnosti zrkadiel

Použitie rovinných zrkadiel zabezpečuje presné uhly odrazu meraného svetla, čo priamo ovplyvňuje kvalitu odrazu. Testovaním rovinnosti zrkadiel je možné minimalizovať skreslenie odrazeného svetla.

Rovinnosť zrkadiel bola testovaná na základe normy STN EN13032-1 [2]. Ako skúšobný zdroj bola použitá žiarovka s krytom z opálového skla, ktorej priemer bol 45 mm. Napájanie bolo zabezpečené za pomoci stabilizovaného zdroja harmonického napätia 230V, aby sa predišlo zmene svetelného toku žiarovky vplyvom kolísania napätia.

Žiarovka bola posúvaná po tyči s dĺžkou 60 cm, v smere od jej stredu k fotometru, v kroku 6 cm. Odčítané boli osvetlenosti pre natočenie horizontálneho ramena goniofotometra v krokoch 0°, 30°, 60° a 90°. Pre každú meranú osvetlenosť zároveň bola pomocou laserového diaľkomera odčítaná fotometrická vzdialenosť, na základe ktorej bolo možné vykonať korekciu na zmenu vzdialenosti medzi skúšobným zdrojom a fotometrom nasledovne:

$$E_1 = E_2 * \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (2)$$

kde E_1 je skúšobná vzdialenosť po korekcii na zmenu vzdialenosti, E_2 je skúšobná vzdialenosť pred korekciou na

zmenu vzdialenosti, r_1 je referenčná skúšobná vzdialenosť na ktorú je prepočítaná korekcia, r_2 je skutočná skúšobná vzdialenosť.

Z hodnôt osvetleností po korekcii na zmenu vzdialenosti medzi skúšobným zdrojom a fotometrom, bola vypočítaná priemerná hodnota E_{AV} , ako aritmetický priemer hodnôt E_1 .

Pre výpočet smerodajnej odchýlky σ , vyjadrenej ako percento priemeru je potrebné vypočítať druhé mocniny odchýliek d_n a priemer umocnených odchýliek σ^2 :

$$d_n = (E_{1n} - E_{AV})^2 \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^n d_n}{n} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (5)$$

Smerodajnú odchýlku σ možno vyjadriť ako percento priemeru nasledovne:

$$\sigma_{\%AV} = \frac{\sigma}{E_{AV}} * 100 \quad (6)$$

Ďalej treba pre každú osvetlenosť stanoviť percentuálnu odchýlku od priemeru $d_{\%AV}$:

$$d_{\%AV} = \frac{E_{AV} - E_1}{E_{AV}} * 100 \quad (7)$$

Namerané údaje osvetleností a vzdialeností boli prepočítané na osvetlenosť po korekcii na zmenu vzdialenosti medzi skúšobným zdrojom a fotometrom, a bola vyhodnotená percentuálna odchýlka od priemeru pre každé meranie. Maximálna odchýlka od priemeru bola 10,10% (požadované 5%), a smerodajná odchýlka vyjadrená ako percento priemeru 5,64% (požadované 1,5%).

Tab. 2. Výsledky testovania rovinnosti zrkadiel

	Požadovaná hodnota	Nameraná hodnota
Maximálna odchýlka od priemeru [%]	5	10,10
Smerodajná odchýlka vyjadrená ako percento priemeru [%]	1,5	5,64

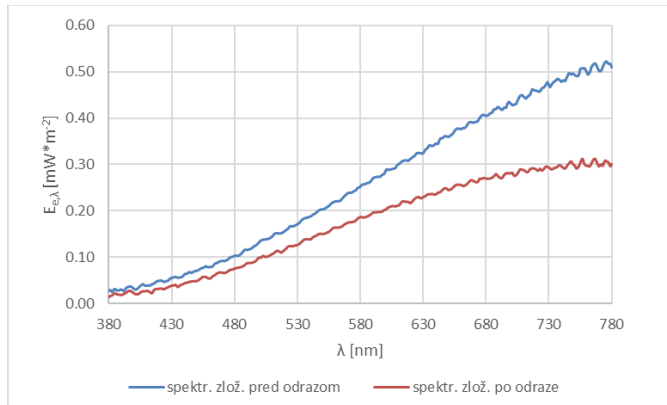
Merania ukázali, že zrkadlá nespĺňajú požiadavky na rovinnosť dané normou STN EN13032-1 [2]. Je preto potrebné hľadať dodávateľa zrkadiel, ktorý ponúka zrkadlá s testovaním rovinnosti.

2.7 Korekcia spektrálnej odrazivosti zrkadiel

Spektrálna odrazivosť zrkadiel vyjadruje schopnosť zrkadiel odrážať svetlo každej vlnovej dĺžky v rovnakej miere. V ideálnom prípade je spektrálne zloženie svetla po doraze od zrkadla rovnaké ako pred odrazom. V praxi tak tomu však nie je, a preto je potrebné vyhodnocovať korekciu spektrálnej odrazivosti zrkadiel.

V rámci korekcie spektrálnej odrazivosti zrkadiel boli vykonané dve merania pri rovnakej skúšobnej vzdialenosti:

- spektrálne zloženie svetelného zdroja pred odrazom od zrkadla,
- spektrálne zloženie svetelného zdroja po odraze od zrkadla.



Obr. 2. Spektrálne zloženie pred a po odraze od zrk. sústavy

Z odmeraných spektrálnych charakteristík bolo možné sledovať výrazný pokles hodnôt intenzít ožiarovania v celom spektre. To má za následok aj pokles odčítanej intenzity osvetlenia v zmysle vzťahu:

$$E = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

Je preto vhodné zaviesť korekčný činiteľ, ktorý odčítanú osvetlenosť po odraze od zrkadlovej sústavy prevedie na osvetlenosť ktorá by bola odčítaná pri rovnakej fotometrickej skúšobnej vzdialenosti bez odrazu od zrkadlovej sústavy.

Boli preto vykonané merania svietidla LED v zrkadlovom goniofotometri a ručnom goniofotometri typu 1, pri rovnakej fotometrickej skúšobnej vzdialenosti. Vykonané boli merania osvetleností na oboch goniofotometroch pri identických podmienkach. Od meraných osvetleností boli odčítané hodnoty blúdivého svetla. Z týchto meraní bol vyhodnotený korekčný činiteľ poklesu meranej intenzity osvetlenia vplyvom zrkadlovej sústavy:

$$K_{EZ} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n \frac{E_{1n}}{E_{2n}} \text{ za podmienky } E_{2n} > 0. \quad (9)$$

Kde E_{1n} je osvetlenosť meraná na referenčnom goniofotometri (ručný goniofotometer), E_{2n} je osvetlenosť meraná na zrkadlovom goniofotometri, n je počet meraní.

Korekčný činiteľ bol z nameraných údajov v zmysle vzťahu vyššie určený: $K_{EZ} = 1,288$.

2.8 Korekcia na chybu spektrálnej citlivosti fotometra

Hlavica fotometra je kalibrovaná na spektrálne zloženie CIE štandardizovaného svetelného zdroja A (žiarovka). Meranie svetla s odlišným spektrálnym zložením potom vedie k chybe merania. Túto chybu je možné eliminovať výpočtom a zavedením korekčného faktora.

Pre vyhodnotenie korekčného faktora spektrálnej citlivosti fotometra je potrebné poznať hodnoty relatívnej spektrálnej rezponzivity $s_{rel}(\lambda)$ pre daný luxmeter.

Pomocou spektrorádiometra bolo odmerané spektrálne zloženie meraného zdroja umiestneného v goniofotometri, $E_{e,\lambda,zdr}$, a spektrálne zloženie CIE štandardizovaného svetelného zdroja A, S_A (žiarovka). Výpočet korekčného faktora prebieha v absolútnych hodnotách, a teda pri týchto meraniach nebolo

potrebné dodržiavať rovnakú skúšobnú fotometricкую vzdialenosť.

Pre správne zavedenie korekcie bolo potrebné prepočítať spektrálne zloženie meraného zdroja $E_{e,\lambda,kor}$ na maximum spektrálneho zloženia CIE štandardizovaného svetelného zdroja S_A :

$$K = \frac{S_A(\lambda_{max})}{E_{e,\lambda,kor}(\lambda_{max})} \quad (10)$$

$$S_Z(\lambda) = K * E_{e,\lambda,kor}(\lambda) \quad (11)$$

kde K je korekčný faktor pre prepočet na maximum spektrálneho zloženia S_A , λ_{max} je vlnová dĺžka pri ktorej spektrálne zloženie S_A dosahuje maximum.

Korekčný faktor spektrálnej citlivosti fotometra bol potom vypočítaný v zmysle vzťahu: [6]

$$F^*(S_Z(\lambda)) = \left[\frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_Z(\lambda) k(\lambda) s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_Z(\lambda) k(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \right]^{-1} \quad (12)$$

Jeho hodnota bola v prípade tohto merania $F^*(S_Z(\lambda)) = 0,9978$, pričom meraným zdrojom bola 60W žiarovka s difúzorom z opálového skla. Hodnota korekčného faktora sa líši v závislosti od meraného zdroja, a luxmetra ktorým je meranie vykonávané, a preto je potrebné vyhodnocovať ho pre každé meranie osobite. Do meraní je potrebné korekčný faktor zavádzať v zmysle vzťahu:

$$S_{Z,kor} = S_Z \cdot F^*(S_Z(\lambda)) \quad (13)$$

Kde S_Z je meraná osvetlenosť pred zavedením korekcie, a $S_{Z,kor}$ je osvetlenosť po zavedení korekcie.

3 Praktické merania a ich výsledky

V zmysle predchádzajúcich častí práce boli do meraní zahrnuté korekčné faktory, ktorých cieľom je zabezpečiť presné merania goniofotometrom. Zrkadlový goniofotometer, naproti ostatným typom goniofotometrov, zavádza do meraní chyby zapríčinené zrkadlovou sústavou. Možno teda predpokladať že pôjde o najväčší zdroj chyby merania, a je preto vhodné posúdiť, nakoľko bol minimalizovaný jeho vplyv.

Pre takéto posúdenie je vhodné porovnať výsledky meraní, krivky svietivosti, zrkadlového goniofotometra, a referenčného goniofotometra ktorý na meranie nepoužíva zrkadlovú sústavu. Bola preto vykonaná séria meraní dvoch subjektov: 60W žiarovky a svietidla LED verejného osvetlenia. Merania prebehli v rozsahu 0-180° s krokom 2,5° v uhloch γ , a v rozsahu 0-360° s krokom 45° v uhloch C .

3.1 Zavedenie korekcie do meraní a spracovanie výsledkov

Na hodnoty namerané zrkadlovým goniofotometrom boli aplikované korekčné činitele popísané v predchádzajúcich častiach práce, a boli vnesené krivky svietivosti.

V prípade merania referenčným goniofotometrom (ručný typu 1 a typ 2), sa pri aplikácii korekčných činiteľov vynechal korekčný činiteľ poklesu meranej intenzity osvetlenia vplyvom zrkadlovej sústavy K_{EZ} . Následne boli na základe

fotometrickej skúšobnej vzdialenosti, tieto korigované hodnoty osvetlenia prepočítané na hodnoty svietivosti v zmysle inverzného štvorcového zákona:

$$I(C, \gamma) = (E - E_b(\gamma)) * K_{EZ} * F^*(S_Z(\lambda)) * r^2 \quad (14)$$

Kde $I(C, \gamma)$ je výsledná hodnota svietivosti, E je odmeraná hodnota osvetlenia, $E_b(\gamma)$ je hodnota blúdiveho svetla pri natočení γ , K_{EZ} je korekčný činiteľ poklesu meranej intenzity osvetlenia vplyvom zrkadlovej sústavy, $F^*(S_Z(\lambda))$ je korekčný faktor spektrálnej citlivosti fotometra, r je fotometrická skúšobná vzdialenosť.

Pre vynesenie kriviek svietivosti v zaužívanom formáte LDT, bolo potrebné svietivosti prepočítať na svietivosť 1000 lm svietidla (cd/klm):

$$I_{cd/klm} = I * \frac{1000}{\phi} \quad (15)$$

Kde $I_{cd/klm}$ hodnota svietivosti prepočítaná na svietivosť 1000 lm svietidla, I odmeraná hodnota svietivosti, ϕ svetelný tok meraného svietidla.

Formát LDT požaduje v úvode súboru inicializačné informácie, ktorými sú napr. počet a rozstup rovín C a γ . Ďalej požaduje hodnoty svietivosti zoradiť vzostupne podľa rovín C a druhorodo podľa rovín γ . Výpočty aj zoradenie údajov prebehlo v programe Microsoft Excel.

3.2 Spôsob posudzovania meraní

Výstupom merania goniofotometrom je krivka svietivosti svietidla resp. svetelného zdroja. Tá obsahuje maticu odmeraných svietivosti v uhloch C a γ . Krivky svietivosti je možné vzájomne porovnať za pomoci vzťahu: [7]

$$f_{lum,fit} = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{C=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\gamma=0^\circ}^{180^\circ} (I_1(C, \gamma) - I_2(C, \gamma))^2}{\sum_{C=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\gamma=0^\circ}^{180^\circ} (I_1(C, \gamma) + I_2(C, \gamma))^2} \right) \quad (16)$$

Kde $f_{lum,fit}$ vyjadruje zhodnosť kriviek, $I_1(C, \gamma)$ sú hodnoty svietivosti referenčnej krivky svietivosti, pri vychýlení (C, γ) , $I_2(C, \gamma)$ sú hodnoty svietivosti porovnáwanej krivky svietivosti, pri vychýlení (C, γ) .

Zhodnosť kriviek $f_{lum,fit}$ vyjadruje ako sú hodnoty svietivosti I_2 zhodné s referenčnými hodnotami I_1 . Pokiaľ by krivky svietivosti boli identické, táto hodnota by bola 100. [7] Hodnota 98 sa považuje za dobrú zhodu, a hodnota vyššia ako 99 sa považuje za veľmi dobrú zhodu. [7]

Aj pri viacerých meraniach identického svietidla resp. svetelného zdroja, môže nastať situácia, kedy výpočet svetelného toku svietidla z krivky svietivosti poskytne odlišné hodnoty. Je preto vhodné určiť pomer svetelných tokov, ktorým je možné krivky naškálovať a následne porovnávať len ich tvar. [7]

$$\phi = \int_{\gamma=0^\circ}^{180^\circ} \int_{C=0^\circ}^{360^\circ} I(C, \gamma) * \sin(\gamma) \, d\gamma \, dC \quad (17)$$

Pri práci s maticou nameraných údajov, je však vhodné integrál prepísať na sumu:

$$\phi = \sum_{\gamma=0^\circ}^{180^\circ} \sum_{C=0^\circ}^{360^\circ} I(C, \gamma) * \sin(\gamma) * 2,5^\circ \quad (18)$$

$$f_{lum,flux} = \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (19)$$

Kde $f_{lum,flux}$ vyjadruje pomer svetelných tokov, ϕ_1 je svetelný tok referenčnej krivky svietivosti, ϕ_2 je svetelný tok porovnáwanej krivky svietivosti.

Doplnením vzťahu vyššie, možno porovnať tvar kriviek po naškálovaní:

$$f_{lum,max} = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{C=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\gamma=0^\circ}^{180^\circ} (I_1(C, \gamma) - (I_2(C, \gamma) * f_{lum,flux}))^2}{\sum_{C=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\gamma=0^\circ}^{180^\circ} (I_1(C, \gamma) + (I_2(C, \gamma) * f_{lum,flux}))^2} \right) \quad (20)$$

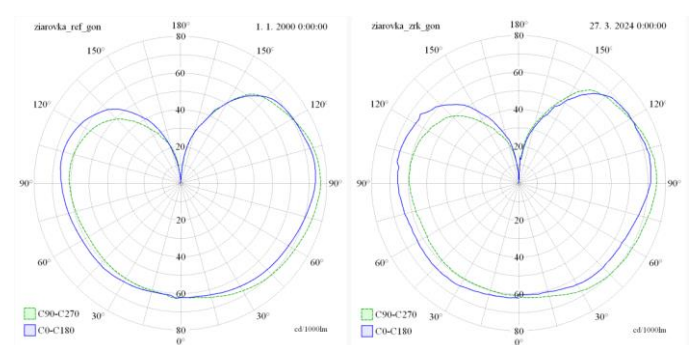
Výpočty boli realizované v programe Matlab, pričom hodnoty program číta priamo zo súborov LDT.

3.3 Vyhodnotenie meraní

Po zavedení korekcie do meraní, boli v programe QLumEdit vynesené krivky svietivosti meraných svietidiel. Na krivkách svietivosti je možné pozorovať drobné rozdiely, pre ktorých kvantifikáciu boli vykonané výpočty zhodnosti kriviek svietivosti v zmysle predchádzajúcej časti. Pre lepšie pochopenie výsledkov je vhodné zrekapitulovať význam vypočítaných veličín:

- $f_{lum,fit}$ vyjadruje zhodnosť kriviek, 98 je dobrá zhoda, 99 je veľmi dobrá zhoda a 100 je absolútna zhoda, [7]
- ϕ_1 a ϕ_2 sú svetelné toky vypočítané z kriviek svietivosti,
- $f_{lum,flux}$ je pomer svetelných tokov (škálovací faktor),
- $f_{lum,max}$ vyjadruje zhodnosť kriviek po naškálovaní.

V prípade žiarovky prebehlo referenčné meranie na zrkadlovom goniofotometri, pričom hlavica luxmetra bola umiestená na primárne zrkadlo, čím došlo k dočasnému upraveniu zrkadlového goniofotometra na goniofotometer typu 2. Hlavica luxmetra bola na zatienené zrkadlo umiestnená za pomoci samonivelizačného laseru tak, aby sa pri vychýlení 0° horizontálnej osi, nachádzala vo vertikálnej osi s fotometrickým stredom žiarovky.



Obr. 3. Krivky svietivosti žiarovky (vľavo ref. goniofotometer, vpravo zrkadlový goniofotometer)

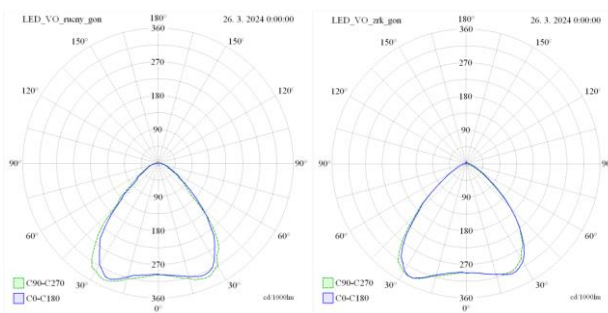
Pri meraní sa taktiež dbalo na to, aby natočenie žiarovky vo vzťahu k rovinám C bolo rovnaké ako v prípade meraní zrkadlovým goniofotometrom. To poskytne spoľahlivé výsledky výpočtu zhodnosti kriviek svietivosti.

Tab. 3. Porovnanie meraní žiarovky

$f_{lum,fit} = 96.94$
$\phi_1 = 639.59 \text{ lm}$
$\phi_2 = 670.78 \text{ lm}$
$f_{lum,flux} = 0.95$
$f_{lum,max} = 98.11$

Z výsledkov porovnania možno konštatovať že zhoda medzi výstupom z goniofotometra typu 2 a zrkadlového goniofotometra je dobrá. Malé nedostatky sú pravdepodobne zapríčinené odchýlkami polohovania osí alebo chybou odčítania z luxmetra. Dochádza tiež k malému rozdielu vypočítaných svetelných tokov, čo by bolo možné minimalizovať presnejším určením korekčných činiteľov.

V prípade svietidla LED verejného osvetlenia bolo referenčné meranie vykonané na ručnom goniofotometri typu 1. Rovnako ako pri meraní žiarovky, sa dbalo na rovnakú orientáciu vo vzťahu k rovinám C, ako v prípade merania zrkadlovým goniofotometrom.



Obr. 4. Krivky svetivosti LED svietidla (vľavo ref. goniofotometer, vpravo zrkadlový goniofotometer)

Tab. 4. Porovnanie meraní LED svietidla

$f_{lum,fit} = 96.65$
$\phi_1 = 5205.06 \text{ lm}$
$\phi_2 = 4990.64 \text{ lm}$
$f_{lum,flux} = 1.04$
$f_{lum,max} = 97.49$

V prípade porovnania ručného goniofotometra typu 1 a zrkadlového goniofotometra je zhoda síce menšia ako v predchádzajúcom prípade, avšak stále sa považuje za dobrú zhodu. V predchádzajúcom porovnaní bolo polohovanie osí zabezpečené elektronicky za použitia identického hardvéru v prípade oboch meraní. Pri tomto porovnaní môže byť menšia zhoda spôsobená práve uplatnením odlišného spôsobu polohovania osí.

Pomer svetelných tokov sa vyvíja opačným smerom ako v predchádzajúcom prípade, čo môže byť spôsobené vzájomnou odlišnosťou svetelných zdrojov (tvoriaca krivka aj spektrálne zloženie).

4 Záver

Vyhodnotenie meraní naznačuje, že aj napriek rozdielnym typom goniofotometrov a svietidiel je možné dosiahnuť dobrú zhodu výsledkov. Identifikácia a aplikácia korekčných činiteľov môže minimalizovať rozdiely medzi meraniami a zabezpečiť konzistentné výsledky, aj napriek odlišnostiam vo vybavení laboratórií.

Pri meraniach žiarovky na goniofotometri typu 2 a následnom porovnaní so zrkadlovým goniofotometrom, bola zaznamenaná dobrá zhoda výstupov. Podobne, aj pri meraniach svietidla LED na ručnom goniofotometri typu 1 bola dosiahnutá uspokojivá zhoda s výsledkami so zrkadlového goniofotometra.

Tieto poznatky majú potenciál zlepšiť presnosť a spoľahlivosť meraní svietidiel v skúšobnom laboratóriu svetelnotechnických zariadení FEI STU, čo je kľúčové pre ich úspešné hodnotenie a certifikáciu v súlade s príslušnými normami a štandardmi v oblasti osvetlenia.

Literatúra

- [1] International Commission on Illumination. *CIE 70-1987, The measurement of absolute luminous intensity distributions*. s.l. : CIE, 1987. ISBN: 978 3 900734 05 3.
- [2] *STN EN 13032-1:2004+A1:2012, Svetlo a osvetlenie. Meranie a vyhodnotenie fotometrických údajov svetelných zdrojov a svietidiel. Časť 1: Meranie a formulár súborov.*
- [3] *STN EN 13032-4:2015+A1:2019, Svetlo a osvetlenie. Meranie a vyhodnotenie fotometrických údajov svetelných zdrojov a svietidiel. Časť 4: LED zdroje, moduly a svietidlá.*
- [4] *STN EN 13032-2:2019, Svetlo a osvetlenie. Meranie a vyhodnotenie fotometrických údajov svetelných zdrojov a svietidiel. Časť 2: Prezentácia údajov pre vnútorné a vonkajšie pracoviská.*
- [5] *STN EN 13201-3:2015, Osvetlenie pozemných komunikácií. Časť 3: Svetelnotechnický výpočet.*
- [6] *ISO/CIE 19476:2014, Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters.*
- [7] BERGEN, A. *A practical method of comparing luminous intensity distributions. In Lighting Research & Technology . 2012. Vol. 44, no. 1, s. 27–36.*

Fotovoltaická elektrárň a jej využitie v koncepte parkoviska na poľnohospodárskom družstve

FEI STU v Bratislave

Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Autor: Robert Irgel, Spolu autor: Ing. Milan Perný, PhD.

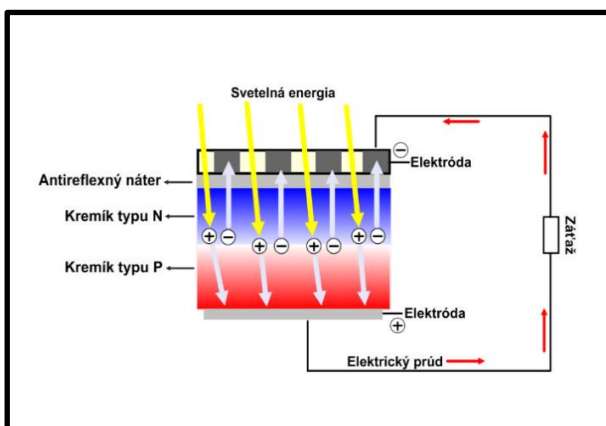
Abstrakt – Práca je zameraná na návrh fotovoltaického systému, ktorého fotovoltaické panely slúžia ako prístrešok nad parkoviskom. Tento systém tieni na parkovacie miesta a zároveň cez deň generuje elektrickú energiu. V práci sa zameriavame na technické riešenie systému s požiadavkou na čo najmeneš prebytky do siete. V systéme je komponované aj batérové úložisko aby čo najväčšia časť vyrobenej elektrickej energie bola vlastná spotreba odborného miesta.

1 Úvod

Najväčší zdroj energie na našej planéte Zem je hviezda Slnko, ktorá je v strede našej slnečnej sústavy. Energia zo Slnka dopadá na Zem ako Slnečné žiarenie vo forme elektromagnetického vlnenia.

Slnečná energia je spúšťačom iných foriem energie na Zemi ako napríklad Veterná energia, Vodná energia, Geotermálna energia, Energia biomasy, Energia gravitačných síl, Energia atómových jadier, Energia vesmírneho žiarenia v neposlednom rade teplo.

Slnečnú energiu môžeme využívať vo forme tepelnej energie na ohrievanie povrchu slnečných kolektorov. Slnečný kolektor je zariadenie na premenu slnečnej energie na tepelnú energiu, je súčasťou vykurovacích systémov. Kolektor absorbované slnečné žiarenie vo forme tepelnej energie ukladá do absorpčného média, ktoré slúži na distribúciu vyrobenej tepelnej energie ďalej do systému.



Obr. 1. Fotovoltaická premena energie

Ďalšie využitie je premena Slnečnej energie na Elektrickú energiu, ktorej podstatou je fotoelektrický jav. Slnečné žiarenie dopadajúce na polovodič typu PN uvoľňuje elektróny z valenčného pásma atómov polovodiču do vodivostného pásma. Týmto procesom sa zvýši v polovodiči koncentrácia voľných nosičov náboja, a tým sa zvýši aj vodivosť polovodiča. Ak na stranu polovodiča typu P pripojíme kladný pól spotrebiču a na stranu typu N pripojíme záporný pól, tak spotrebič začne konať prácu. To znamená, že v obvode začne tiecť prúd. Zariadenie, ktoré pohltí slnečné žiarenie a procesom fotovoltaického javu generuje elektrickú energiu sa nazýva fotovoltaický článok.

Fotovoltaický panel je pole fotovoltaických článkov, ktoré sú elektricky spájané, uložené na dielektrickej podložke vloženéj do hliníkového rámu a spredujúcej časti sú fotovoltaické články prekryté sklom. Fotovoltaický panel je súčasťou systému fotovoltaických elektrární.

2 Fotovoltaická elektrárň

Fotovoltaická elektrárň je systém na premenu slnečného žiarenia na elektrickú energiu. Podstatná časť tohto systému je fotovoltaický panel, ktorý priamo vykonáva energetickú premenu. Vyrobenej elektrickej energie putuje v systéme do regulátora, ktorý zabezpečuje stabilizáciu napätia generovaného panelmi na 12V alebo 24V. Regulátor taktiež zabezpečuje bezpečné nabíjanie akumulátorového systému. Z regulátora ďalej elektrická energia putuje do striedaču, ktorý zabezpečuje vystriedanie jednosmerného napätia a jeho transformovanie na napäťovú hladinu 400V (združené napätie). Zo striedaču môže elektrická energia putovať do distribučnej sústavy cez blokový transformátor, alebo do siete nízkeho napätia TNS a môže byť spotrebovaná podľa potreby v blízkosti elektrárne napríklad na osvetlenie.

Fotovoltaická elektrárň, ktorá je prevádzkovaná pre účely spotreby vyrobenej elektrickej energie na odbornom mieste, ktoré je taktiež výrobným miestom, je definovaná ako lokálny zdroj. Lokálny zdroj nesmie generovať okamžitý 15 minútový činný výkon vyšší ako je rezervovaná kapacita na odbornom mieste, resp. na odovzdávacom mieste. Lokálne zdroje môžeme deliť z konštrukčného hľadiska na inštalácie pozemné, inštalácie na strechy budov, inštalácie na dopravné prostriedky alebo iné inštalácie, medzi ktoré patrí aj inštalácia fotovoltaickej elektrárne za účelom vytvoriť z panelov prekrytie parkoviska, ktoré bude plniť úcel z viacerých strán. Primárna

úloha tohto systému je generovať elektrickú energiu na účel vlastnej spotreby v blízkosti takéhoto krytého parkoviska. Sekundárna úloha je vytvorenie úkrytu automobilov pred dažďom a taktiež pred Slnkom, takže vytváranie tieňa na parkovacie miesta.

Fotovoltaická elektrárň v koncepte strešného parkoviska by v dnešnej dobe mohla byť inštalovaná na nespočetnom množstve parkovísk pri nákupných centrách a elektrická energia by bola vyrábaná v dostupnejšej časti v blízkosti jej spotrebiteľov priamo v mestách či obciach. Parkoviská v mestách majú veľkú plochu, ktorá by mohla byť využitá nie len ako parkovacie miesta, ale aj ako základ pre postavenie fotovoltaickej elektrárne v koncepte strešného parkoviska, ktorá by generovala elektrickú energiu. Pred výstavbou fotovoltaických elektrární pozemného typu sa musí veľká časť zeme upraviť do požadovaného stavu. Ak by sme však chceli postaviť elektrárň na parkovisku, tak nemusíme plochu špeciálne upravovať.

2.1 Časti fotovoltaickej elektrárne

Fotovoltaická elektrárň sa skladá predovšetkým z fotovoltaických panelov, ktoré zabezpečujú premenu slnečnej energie na elektrickú energiu. Fotovoltaické panely môžeme podľa použitého materiálu pri ich výrobe rozdeliť na monokryštalické, polykryštalické a amorfné.

Monokryštalické fotovoltaické články dosahujú účinnosť premeny energie od 13% do 25%. Monokryštalické články používané na kozmické účely môžu dosahovať účinnosť premeny energie do 45%. Maximálne namerané účinnosti dosahujú články pri dopade slnečného žiarenia kolmo na fotovoltaický článok.

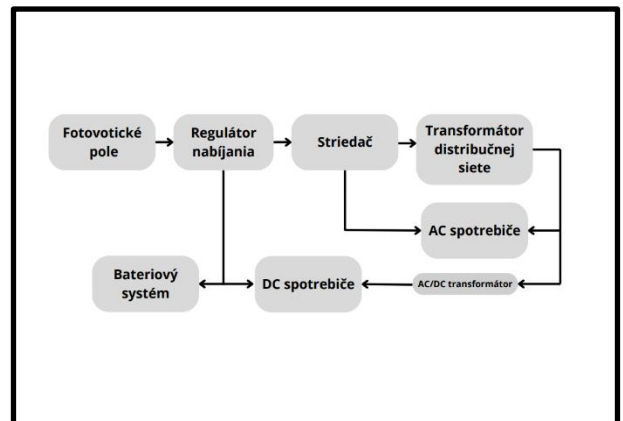
Polykryštalické fotovoltaické články dosahujú účinnosť premeny energie od 10% do 18,5%. Uhol dopadu slnečného žiarenia nemá žiadny vplyv na pokles účinnosti polykryštalických článkov. Amorfné fotovoltaické články dosahujú účinnosť od 4% do 12%.

Účinnosť premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu je najdôležitejší parameter fotovoltaických článkov. Najlepšiu účinnosť má jednoznačne monokryštalický fotovoltaický článok, avšak za podmienky, že slnečné žiarenie dopadá na článok pod uhlom čo najbližším k 90°.

Ďalšia súčasť systému fotovoltaickej elektrárne je regulátor nabíjania. Je to zariadenie, ktoré zabezpečuje stabilitu elektrických veličín energie, ktorú generujú fotovoltaické články. Regulátory môžu byť so sledovaním maximálneho bodu výkonu (MPPT). Účinnosť prenosu energie zo solárneho článku závisí od množstva dostupného slnečného svetla, tienenia, teploty solárneho panelu a elektrických charakteristík záťaže. Keďže tieto podmienky sa v čase menia, tak sa mení aj charakteristika zaťaženia a impedancie zaťaženia, ktorá najviac vplyva na maximum preneseného výkonu. MPPT regulátor sleduje kedy je charakteristika impedancie záťaže v najvyššom výkonovom bode a práve v tomto bode prenáša najväčšie množstvo vyrobeného výkonu. Napätie na výstupných svorkách regulátora je stabilizované na potrebnú napäťovú hladinu. Regulátorom nabíjania môžeme priamo napájať batériový systém alebo striedač.

Batériový systém je zariadenie na opakované nabíjanie a vybíjanie elektrickou energiu v závislosti od jej potreby. V prípade, že fotovoltaické články generujú nadbytok elektrickej energie, táto energia sa odkladá do batériového systému a môže sa neskôr využiť napríklad v prípade nedostatku elektrickej energie.

Striedač je zariadenie, ktoré mení typ napätia a prúdu generovaného fotovoltaickými článkami. Takže jednosmerné napätie a prúd konvertuje na striedavé napätie a prúd. Zo striedaču môžeme napájať spotrebiče na striedavé napätie alebo napájať trafostanicu, ktorá napája distribučnú sieť.

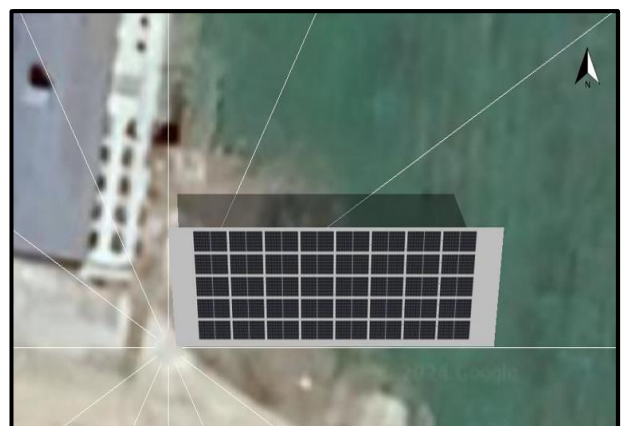


Obr. 2. Bloková schéma fotovoltaickej elektrárne

2.2 Návrh fotovoltaickej elektrárne

Ešte pred samotným výberom typu systému a výberom samotných komponentov, z ktorých bude systém pozostávať, je dôležité vybrať lokalitu. Na vybranej lokalite je dôležité odsledovať okolie z dôvodu tienenia okolitých objektov.

Po vybratí lokality je dôležité určiť umiestnenie fotovoltaického poľa a jeho natočenie voči svetovým stranám tzv. azimut a taktiež sklon fotovoltaického panelu voči zemi. Fotovoltaické pole systému umiestneného nad parkoviskom je



Obr. 3. Prehľad uloženia panelov

natočené presne na juh z uhlom natočenia od zeme 15°.

Výber komponentov použitých vo fotovoltaickom systéme závisel od ponuky na trhu. Systém je navrhnutý s typom panelov od výrobcu Longi solar LR4-72 HIH 455 M G2.




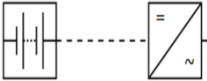
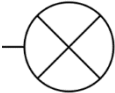

Počet panelov použitých v systéme je 40 kusov. Inštalované budú nad parkoviskom vo vodorovnej polohe 5x8 . Celková plocha panelov je 86,9 m². Panely LR4-72 sú monokrystalického typu s účinnosťou premeny 20,9%.

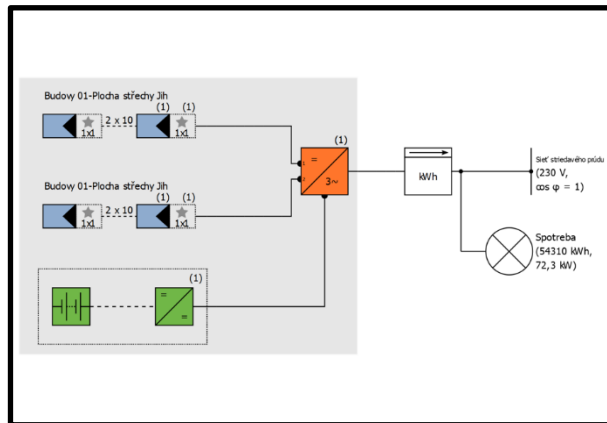
V systéme je použitý regulátor nabíjania SUN2000-17KTL-M5-400V od výrobcu Huawei Technologies. Tento regulátor dokáže špičkovovo dodávať až 17kW výkonu. V tomto regulátore je interný trojfázový striedač na striedavé fázové napätie 230V.

V systéme je zakomponovaný aj optimalizátor výkonu, ktorý rozdelí pole panelov na 5 stringov, ktorých výkon dokáže optimalizovať na čo najväčšiu hodnotu aj v prípade zatienenia, znečistenia alebo poškodenia niektorých z panelov.

Z regulátora je priamo napájaná vlastná spotreba družstva, úložisko v podobe batériového systému. Elektrická energia, ktorá nie je spotrebovaná a ani nie je uskladnená v batériovom úložisku putuje do distribučnej siete cez distribučný transformátor v podobe prebytkov. Systém fotovoltaickej elektrárne nad parkoviskom je dimenzovaný tak, aby prebytky do siete boli čo najmenšie, aby väčšina vyrobenej elektrickej energie zo slnečného žiarenia, ktoré dopadá na solárne panely bola spotrebovaná družstvom.

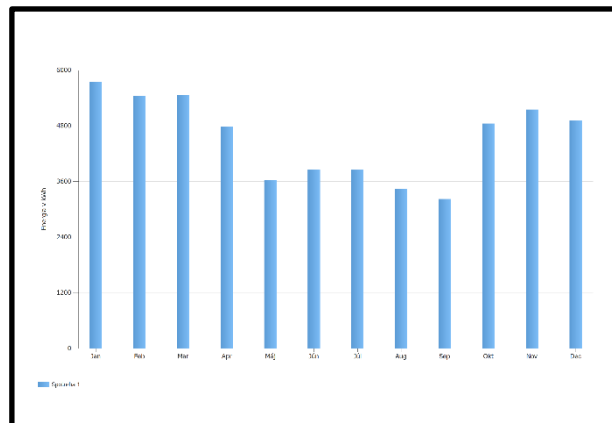
Tab. 1. Schematické značky komponentov

č.	Komponent	Schematická značka
1	FV Modul (pole panelov)	
2	Regulátor so striedačom	
3	Optimalizátor výkonu	
4	Batériový systém	
5	Spotreba	
6	Distribučná sieť	



Obr. 4. Schéma zapojenia systému

Simulácia bola vyhotovená v nemeckom softvare PVsol. V knižnici tohto softwaru boli vyhľadane všetky používané komponenty a ich vstupné parametre pre simuláciu boli automaticky vložené. Ďalšie vstupné údaje boli 15 minútové dáta odberu družstva za rok 2023. Ročná spotreba družstva za rok 2023, ktorá bola 54,31MWh. K výpočtom potrebuje softwar zadat lokalitu, pre ktorú sú v databáze programu uložené dáta o počasí z rokov 1996-2015.



Obr. 5. Spotreba elektrickej energie družstva za rok 2023 po mesiacoch v kWh

2.3 Simulácia systému

Po zadaní všetkých potrebných vstupov do softwaru PVsol bola vygenerovaná simulácia. Program odsimuloval toky elektrickej energie za rok 2023. Celkový inštalovaný výkon elektrárne je 18,2 kWp. Elektrárň s týmto inštalovaným výkonom vo vybranej lokalite družstva vygeneruje za rok 20,694 MWh. Z tohto objemu elektrickej energie sa 2,48 MWh uschovalo počas roka v batériovom systéme a reálne sa z nich využilo 2,185 MWh. Z celkovej vyrobenej elektrickej energie bolo družstvom spotrebovaných 14,463 MWh a do siete sa ako prebytky dodalo 6,231 MWh. Priamo na odbernom mieste bolo spotrebovaných 69% elektrickej energie z celkovej vyrobenej elektrickej energie.

Batériový systém za rok uschoval 2480 kWh, z tejto energie bolo reálne spotrebovaných 2185 kWh to znamená, že systém má celkové straty 295 kWh, čo predstavuje 12% z celkovej uschovanej energie. Celkový inštalovaný výkon batérií je 10,2 kW. Pri takto zaťaženom batériovom systéme sa

Študentská vedecká a odborná činnosť

Fakultná prehliadka prác, 9. apríl 2024

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

životnosť akumulátorov odhaduje na 13 rokov. Z celkových strát 16% patrí stratám v batérii, 84% strát sú straty spôsobené nabíjaním a vybíjaním.

$$E(\%) = \frac{E_c}{E_s} \quad (1)$$

Kde $E(\%)$ predstavuje percentuálny podiel vlastnej spotreby družstva, E_c predstavuje celkovú vygenerovanú elektrickú energiu a E_s predstavuje spotrebu elektrickej energie, ktorá bola vygenerovaná fotovoltaickým systémom.

Tab. 2. Straty v batériovom systéme

č.	Straty	Označenie	Straty (kWh)
1	V batérii	dSb	48
2	Nabíjaním/Vybíjaním	dS _{nv}	247

$$S_c = dS_b + dS_{nv} \quad (2)$$

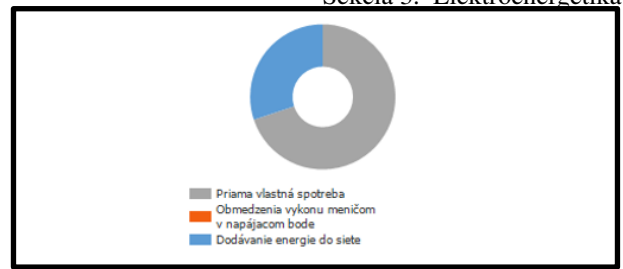
$$dS_b(\%) = \frac{dS_b}{S_c} \quad (3)$$

$$dS_{nv}(\%) = \frac{dS_{nv}}{S_c} \quad (4)$$

Tab. 3. Výsledky simulácie – fotovoltaická elektrárň

Skúmané parametre elektrárne	
Výkon elektrárne	18,20 kWp
Predpokladaná vygenerovaná energia s batériou	20694 kWh/rok
Priama vlastná spotreba	14463 kWh/rok
Dodávka do siete	6231 kWh/rok
Podiel vlastnej spotreby	69,9%

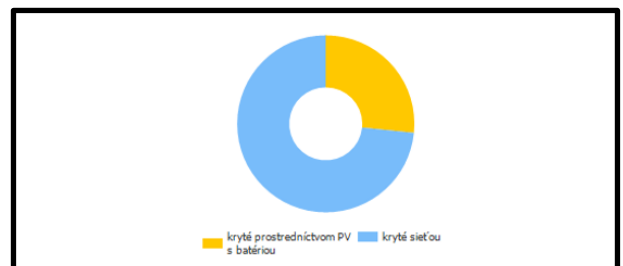
Sekcia 3. Elektroenergetika



Obr. 6. Podiel dodávanej elektrickej energie do siete a vlastnej spotreby

Tab. 4. Celkový tok energie na odbernom mieste

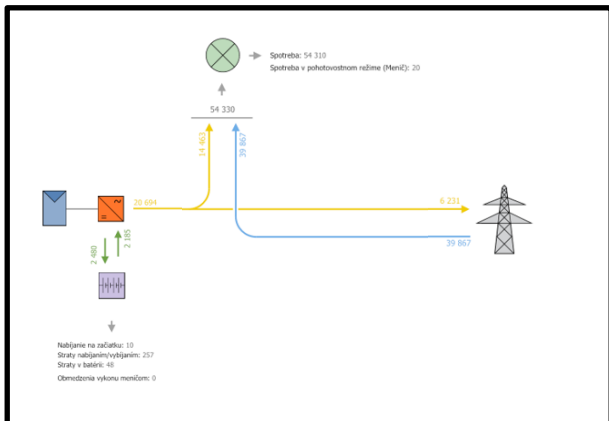
Skúmané parametre tokov elektrickej energie	
Celková spotreba	54,31 MWh
Z toho kryté elektrárnou	20694 kWh/rok
Z toho kryté sieťou	14463 kWh/rok
Podiel pokrytý slnečnou energiou	26,6%



Obr. 7. Podiel spotreby krytej fotovoltaickým systémom a sieťou

Stupeň sebestačnosti odberného miesta sa vyjadruje tak isto ako podiel pokrytia spotreby elektrickej energie. Ak by sme si vedeli na odbernom mieste vyrobiť dostatok elektrickej energie a pokryť spotrebu odberného miesta stupeň sebestačnosti takéhoto systému by bol 100%. Navrhovaný systém fotovoltaickej elektrárne v koncepte parkoviska má stupeň sebestačnosti 26,6%.

Spotreba elektrickej energie na družstve nie je špeciálne regulovaná, takže výkonový diagram je členitý podľa pracovných procesov vykonávaných na družstve. Túto skutočnosť sme museli uvažovať pri návrhu systému. Cieľom bolo dimenzovať fotovoltaickú elektrárň z čo najmenšími prebytkami do siete. Avšak bolo nemožné trafiť dňové maximum vyrobeného výkonu elektrárne s maximálnym odberom družstva.



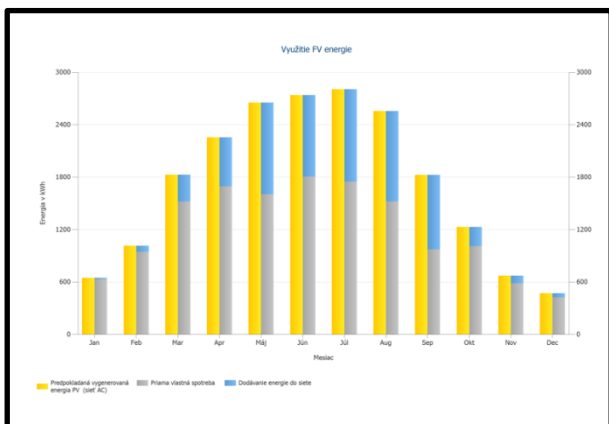
Obr. 8. Toky elektrickej energie vo fotovoltaickom systéme (všetky parametre sú v kWh)

V prípade malých prebytkov sa elektrická energia uložila do batériového systému. V prípade väčšieho prebytku bola elektrická energia dodaná do siete ako môžeme vidieť detailne na Obr. 8.

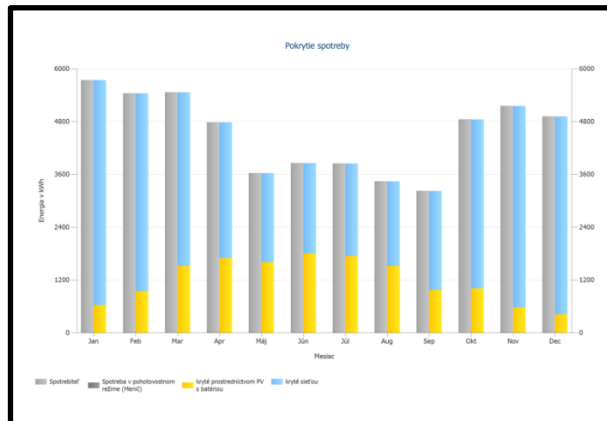
V nasledujúcich obrázkoch môžeme vidieť grafickú analýzu využitia elektrickej energie a pokrytia spotreby elektrickou energiou po jednotlivých mesiacoch.

Pri využití elektrickej energie vidíme nárast vygenerovanej elektrickej energie z dôvodu dlhších slnečných dní. V letných mesiacoch vidíme taktiež nárast vlastnej spotreby elektrickej energie na družstve, tak isto aj nárast dodávanej elektrickej energie do siete. Naopak v zimných mesiacoch môžeme pozorovať pokles vyrábanej elektrickej energie elektrárnou a taktiež pokles vlastnej spotreby elektrickej energie družstvom. V mesiacoch Január a Február môžeme tvrdiť, že odberné miesto má mieru sebestačnosti cez 90%.

Pri pokrytí spotreby elektrickej energie družstva vidíme, že viac ako polovica elektrickej energie je spotrebovávaná zo siete. V letných mesiacoch pozorujeme nárast generovanej elektrickej energie elektrárnou, táto generovaná elektrická energia pokrýva v letných mesiacoch takmer polovicu z celkovej spotreby družstva.



Obr. 9. Využitie generovanej el. energie elektrárnou



Obr. 10. Pokrytie spotreby odberného miesta

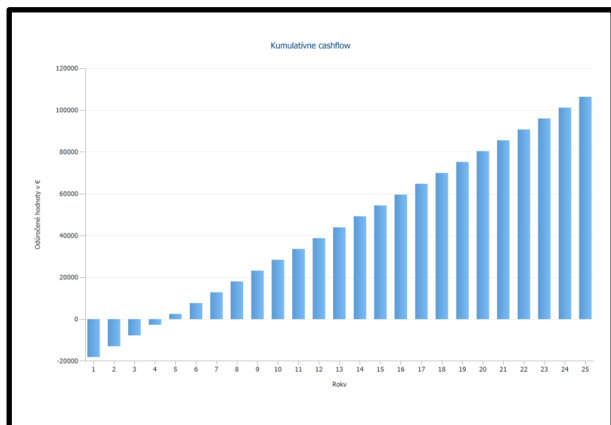
2.4 Finančná analýza

Prvotná investícia po spočítaní všetkých nákladov spojených s nákupom komponentov ich dopravou a inštaláciou a uvažovanou rezervou je 23000€. Pri predajnej cene elektrickej energie 0,35€/kWh a výkupnej cene elektrickej energie 0,03€/kWh sa návratnosť prvotnej investície odhaduje na 4,5 roka. Ročný výnos z prebytočnej elektrickej energie sa odhaduje na 155,29€ v priemere za počítavané obdobie 25 rokov. Ďalšie úspory sú úspory na elektrickej energii, ktorú systém vyrobil a tie sú vo výške 5034,73€/Rok .

Pre lepšie pochopenie ako systém dokáže zarobiť na pokrytie prvotných nákladov a dostať sa do ziskovosti pre investora je v nasledovných obrázkoch vyhotovená grafická analýza hospodárnosti financií.

Tab. 5. Peňažný tok

	Rok 1	Rok 2	Rok 3
Investície	-23000,00€	0,00€	0,00€
Dodávka el. energie	147,41€	151,00€	148,30€
Úspora na spotrebe el. energie	4801,70€	4993,80€	5002,40€
Ročný cashflow	-18050,89€	5144,80€	5150,70€
Kumulatívny cashflow	-18050,89€	-12906,09€	-7755,38€
	Rok 4	Rok 5	Rok 6
Investície	-23000,00€	0,00€	0,00€
Dodávka el. energie	147,41€	151,00€	148,30€
Úspora na spotrebe el. energie	4801,70€	4993,80€	5002,40€
Ročný cashflow	-18050,89€	5144,80€	5150,70€
Kumulatívny cashflow	-18050,89€	-12906,09€	-7755,38€



Obr. 11. Kumulatívny vývoj cashflow za 25 rokov

Systém fotovoltaickej elektrárne v koncepte parkoviska bude ziskový pre objekt družstva po 4,5 roku. Analýza dokázala že po 25 rokoch bude družstvo v zisku 106399,62€.

2.5 Zoznamy obrázkov

Obr. 1. Fotovoltická premena energie.....	1
Obr. 2. Bloková schéma fotovoltaickej elektrárne.....	2
Obr. 3. Prehľad uloženia panelov.....	2
Obr. 4. Schéma zapojenia systému.....	3
Obr. 5. Spotreba elektrickej energie družstva za rok 2023 po mesiacoch v kWh.....	3
Obr. 6. Podiel dodávanej elektrickej energie do siete a vlastnej spotreby.....	4
Obr. 7. Podiel spotreby krytej fotovoltaickým systémom a sieťou.....	4
Obr. 8. Toky elektrickej energie vo fotovoltaickom systéme (všetky parametre sú v kWh).....	5
Obr. 9. Využitie generovanej el. energie elektrárnou.....	5
Obr. 10. Pokrytie spotreby odberného miesta.....	5
Obr. 11. Kumulatívny vývoj cashflow za 25 rokov.....	6

2.6 Zoznamy tabuliek

Tab. 1. Schematické značky komponentov	3
Tab. 2. Straty v batériovom systéme	4
Tab. 3. Výsledky simulácie – fotovoltaická elektrárň4	4
Tab. 4. Celkový tok energie na odbernom mieste	4
Tab. 5. Peňažný tok	5

3 Záver

Fotovoltická elektrárň v koncepte parkoviska je navrhnutá s návratnosťou 4,5 roka. Po 13 rokoch bude potrebná výmena akumulátorov v batériovom systéme a z odhadu a skúseností pri iných návrhoch bude potrebná výmena vnútorných častí obvodov meničov. Elektrárň podľa zadania generuje elektrickú energiu hlavne pre účely vlastnej spotreby, avšak generuje aj minimálne možné prebytky z dôvodu, že nie v každom dni v roku je spotreba elektrickej energie prevyšujúca výrobu elektrickej energie. Z celkovej vyrobenej elektrickej energie elektrárnou 30,1% je dodávaný do siete ako prebytok.

4 Podakovanie

Tento článok bol podporovaný Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0049 a Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt Medzinárodné centrum excelentnosti pre výskum inteligentných a bezpečných informačno-komunikačných technológií a systémov – II. etapa, kód ITMS: 313021W404, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] JANÍČEK, František, Ivan DARUĽA, Ján GADUŠ, Eugen REGULA, Miroslava SMITKOVÁ, Ľubomír POLONEC, Ján ĽUDVÍK a Juraj KUBICA. *Obnoviteľné zdroje energie 1: Technológie pre udržateľnú budúcnosť*. Pezinok: Renesans, 2007. ISBN 978-80-969777-0-3.
- [2] JANÍČEK, František, Ján GADUŠ, Vladimír ŠÁLY, et al. *Obnoviteľné zdroje energie 2: Perspektívne premeny a technológie*. Pezinok: Renesans, 2010. ISBN 978-80-89402-13-7.
- [3] Halahyja Martin a kolektív, Solárna energia a jej využitie

Určovanie fotovoltického potenciálu pomocou aplikácie QGIS a otvorených údajov

Illia Lazarenko¹, Ing. Matej Cenký PhD¹,

¹ Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

xlazarenko@stuba.sk

Abstrakt – Účelom tohto dokumentu je poskytnúť jednoduchý, ale účinný spôsob určenia strešného fotovoltického potenciálu v mestskom meradle len pomocou open-source softvéru a verejne dostupných nástrojov a údajov. Navrhovaná metodika je prezentovaná na vzorovej lokalite v Bratislave na Slovensku. V danej oblasti je veľa prác, ktoré sa zaoberajú danou problematikou, avšak len veľmi málo z nich odhaľuje konkrétne kroky spracovania dát a funkcií softvérov. Pomocou našej metodiky je možné získať základné parametre intenzity slnečného ožiarenia, zatienené časti striech a potenciál výroby fotovoltických zdrojov v riešenej oblasti. Veľkou výhodou danej metodiky je jej škálovateľnosť, jednoduchý spôsob úpravy a filtrovania každého výpočtového parametra. Výsledky a obmedzenia navrhovanej metodiky sú diskutované, a je navrhnutý ďalší vývoj.

1 Úvod

S každým rokom sa obytné zóny zväčšujú a rozširujú, a s tým pribúdajú aj nové problémy, ako je zmena klímy, ubúdajúce zdroje energie a rastúci počet obyvateľov. Na ich riešenie môže modernizácia a zahusťovanie súčasných mestských štruktúr priniesť významné environmentálne a ekonomické výhody. Okrem toho by prijatie moderných stratégií riadenia mestskej energie, vrátane distribuovanej výroby a inteligentných sietí mohlo viesť k efektívnejšiemu a hospodárnejšiemu využitiu energie. Účinné plánovanie a pridelovanie zdrojov si však vyžaduje prehľad o energetických požiadavkách, dodávkach, kapacite a perspektíve zlepšenia riešenej oblasti. Rovnako dôležitým faktorom sú nástroje a metodiky na hodnotenie vplyvu rôznych intervenčných stratégií a zmien.

1.1 Tendencie Európskej Únie

Balík Fit for 55 [1], ktorého cieľom je zosúladiť EÚ s dekarbonizáciou do roku 2050, viedol k navrhovaným revíziám kľúčových energetických smerníc. Do ktorých patri aj smernica o energetickej hospodárnosti budov, a smernice o obnoviteľných zdrojoch energie. V prvej z nich [2], sa vyžaduje, aby budovy splňali minimálne normy energetickej hospodárnosti, pričom sa zameriava na obnovu existujúcich stavieb. Cieľom druhej smernice je zvýšiť podiel energie z obnoviteľných zdrojov, čo odráža kľúčový krok pri dosahovaní dekarbonizačných cieľov. Okrem toho smernica o obnoviteľných zdrojoch energie podporuje vytváranie spoločenstiev ktoré zahŕňajú spoločné úsilie o výrobu energie z obnoviteľných zdrojov [3]. To vyvolalo záujem o potenciál fotovoltickej technológie, predovšetkým vďaka vhodnosti fotovoltických

systemov (FVS) pre mestské prostredie, a výrazne zníženie cien na väčšinu komponentov. Tieto pokroky zdôrazňujú význam obnoviteľnej energie pri prechode Európy na udržateľný energetický systém, a kladú dôraz na integráciu obnoviteľných zdrojov, ako je solárna energia, do zastavaného prostredia [4]. Európska únia sa venuje solárnej energii, najmä v súvislosti s integráciou strešných systémov, kvôli súčasnej iniciatíve plánu REPowerEU, ktorého je súčasťou. Cieľom tejto stratégie je dosiahnuť inštalovaný výkon 320 GW fotovoltickej výroby do roku 2023 a 600 GW do roku 2030, ktorá je postavená na troch kľúčových iniciatívach:

- Európska iniciatíva pre solárne strechy, ktorá presadzuje a prípadne stanovuje požiadavky na zvýšenie inštalácie fotovoltických panelov
- rozsiahle partnerstvo zamerané na rozvoj odborných znalostí v tomto sektore
- priemyselná aliancia, ktorá slúži ako fórum pre zainteresované strany s cieľom maximalizovať investičné príležitosti a diverzifikovať dodávateľský reťazec.

Vízia na cieľ EÚ do roku 2030, ktorým je zabezpečiť 32% podielu obnoviteľných zdrojov na výrobe elektrickej energie, bude možné dovrieť najmä inštaláciou strešných fotovoltických systémov. Prognózy naznačujú potrebu minimálne 440 TWh/rok zo solárnych zdrojov do roku 2030, čo v praxi znamená potrebu inštalovať milióny nových strešných systémov.

1.2 Geografické informačné systémy GIS

Možnosť správne identifikovať všetky potenciálne miesta na absorpciu slnečnej energie veľmi urýchli pokrok smerom k dekarbonizácii a maximalizácii využívania obnoviteľných zdrojov energie. Geografické informačné systémy (GIS) sú výkonné nástroje, ktoré môžu integrovať rôzne súbory geopriestorových údajov na komplexné modelovanie solárneho potenciálu. Tieto systémy reprezentujú vstupné dáta ako kombinácie geometrických, alfanumerických, a relačných zložiek, čo uľahčuje priestorové analýzy.

Všetky podklady možno získať z verejných úložísk, online geoportálov alebo dobrovoľníckych webových stránok založených na geografických informáciách, ako je OpenStreetMap. Rôzne štruktúry údajov sa dajú spracovať na vytvorenie viacerých vrstiev vrátane vrstvy výroby fotovoltických panelov. To sú 3D platformy, ktoré vizualizujú a zdieľajú geodáta, čo umožňuje simuláciu správania fyzických objektov alebo systémov v rôznych podmienkach. To pomáha pri identifikácii najproduktívnejších lokalít, vyznačení zatienených oblastí a predpovedať úroveň produktivity.

1.3 Dostupné platformy

V súčasnosti je k dispozícii viacero platforiem pre odhad výstupného výkonu fotovoltického systému. Niektoré zo systémov sú platené služby a ponúkajú komplexnejšie analýzy, zatiaľ čo open-source alternatívy sú väčšinou len súčasťou celého riešenia.

- Súbor nástrojov ArcGIS Solar Radiation - Tieto nástroje vyhodnocujú vhodnosť striech na inštaláciu fotovoltických zariadení, obsahujú vrstvy údajov GIS, ako sú napríklad pôdorysy budov, modely terénu a údaje o korunách stromov [6]. ArcGIS je platený softvér.
- Fotovoltický geografický informačný systém – PVGIS je online nástroj vyvinutý spoločným výskumným centrom Európskej komisie. Poskytuje prístup k údajom o slnečnom žiarení a výkone fotovoltických zariadení s vysokým rozlíšením na celom svete a umožňuje používateľom odhadnúť energetický výnos strešných fotovoltických systémov na základe parametrov špecifických pre danú lokalitu [7]. PVGIS je bezplatný softvér.
- Project Sunroof - Project Sunroof je webový nástroj, vyvinutý spoločnosťou Google, ktorý využíva letecké snímky a 3D techniky modelovania na odhad solárneho potenciálu strechy v konkrétnych geografických oblastiach [8]. Tento projekt v Európe nie je široko dostupný.
- OpenSolar - ide o cloudovú platformu na navrhovanie solárnych zariadení a predaj, ktorá sa integruje s údajmi GIS s cieľom zefektívniť posudzovanie a plánovanie strešných fotovoltických systémov [9]. Nástroje tejto stránky sú silne obchodne orientované, použiteľné len na jednu strechu.

2 Metódy a zdroje

Určenie fotovoltického potenciálu oblasti pomocou GIS pozostáva zo získavania potrebných súborov dát, ich podrobnej analýzy, spracovania pomocou mapových nástrojov a nasledujúcich výpočtov. Kvalitné mapové podklady sú základnou a najdôležitejšou časťou celej analýzy. Výber aplikácie na spracovanie GIS súborov je tiež nezanedbateľným faktorom, od toho závisí nakoľko pokročilá bude vaša analýza, a ako bude časovo náročná analýzu zhodnotiť. V danej práci sme odskúšali a zlepšili jednu z teoreticky možných metód.

2.1 Softvéry

Za hlavnú aplikáciu na spracovanie mapových súborov bola vybraná aplikácia QGIS [10], je to bezplatný open-source zdroj, ktorý obsahuje všetky potrebné funkcie. Má veľké množstvo dostupných rozšírení, ktoré umožňujú viacnásobne zväčšiť využiteľnosť danej aplikácie. Jedným z takých rozšírení je modul GRASS [11]. Ten obsahuje obrovské množstvo pokročilých analýz, kde jedna z nich je nevyhnutne potrebná pre určenie fotovoltického potenciálu našou metódou, daná funkcia ma názov r.sun [12]. Spracovanie a analýza údajov sa uskutočnila v aplikácii Excel.

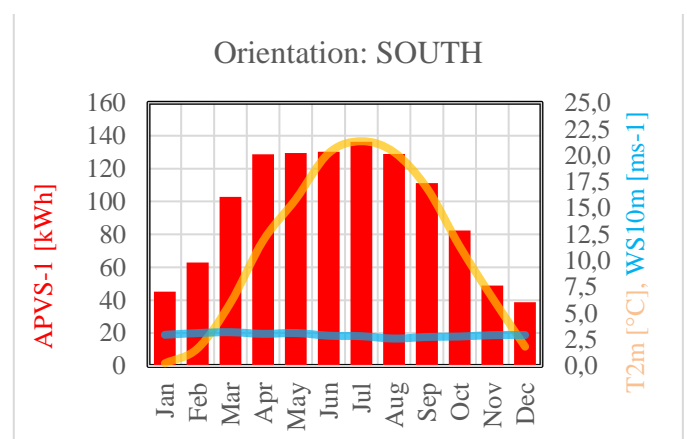
2.2 Zdroje dát

Ako základný zdroj dát bol použitý ZBGIS – voľne dostupný nástroj, ktorý ponúka kvalitné GIS dáta na území celej Slovenskej republiky [13]. Použité údaje boli rastrovou vrstvou mapy terénu vo formáte DMP, daná vrstva obsahuje všetky potrebné charakteristiky objektov, kde hlavnými z nich sú sklony, natočenie voči svetovým stranám a presne zaradené všetky údaje v určenom systéme koordinát. Údaje vychádzajú z bodu mrakov z LiDAR skenovania, ktoré boli dokončené v celej krajine v roku 2023.

Na získanie údajov o základnej ploche striech a typizácií objektov slúži nástroj OpenStreetMaps (OSM). Pre zvýraznenie iba plôch všetkých budov z vektorovej mapy vybraného územia je vhodné použiť doplnkový modul v QGIS-„, Quick OSM“ [14].

Intenzitu slnečného ožiarenia na povrchoch striech a zatienené časti objektov, ktoré nie sú využiteľné pre inštaláciu sa dá získať pomocou funkcie r.sun [12] modulu GRASS. Daná funkcia zohľadňuje časti striech alebo celé strechy, ktoré budú zatienené inými objektami počas dopadu slnečnej energie. Podľa vstupných máp natočenia objektov voči svetovým stranám a ich sklonov vie určiť intenzitu dopadajúceho slnečného žiarenia. Vďaka danej analýze pri výpočtoch môžeme rozdeliť strechy do viac účinných a menej účinných. Z čoho vieme regulovať odchýlku výroby elektrickej energie od vzťaznej hodnoty južných striech, ktoré majú najväčšiu hodnotu dopadajúceho slnečného žiarenia.

Potenciál výstupného výkonu strešných FVS bol realizovaný prostredníctvom služby API, ktorú ponúka PVGIS ako je uvedené v predchádzajúcej časti [7]. Je dôležité zaznamenať že daný zdroj ponúka výpočet celkového výkonu za ideálnych podmienok. Odchýlky výroby budú stanovené vo finálnych výpočtoch na základe výstupu funkcie r.sun [12], spomínaných vyššie, a koeficientov výroby fotovoltického systému podľa jeho orientácie [15]. Pre každý typ strechy bola vytvorená analýza v nastaveniach. Pre ploché strechy sa uvažovalo s optimalizovaným uhlom a smerom natočenia. Pre šikmé strechy bola zadaná stredná hodnota sklonu ktorá bola určená z analýzy sklonov a orientácia bola stanovená na juh.

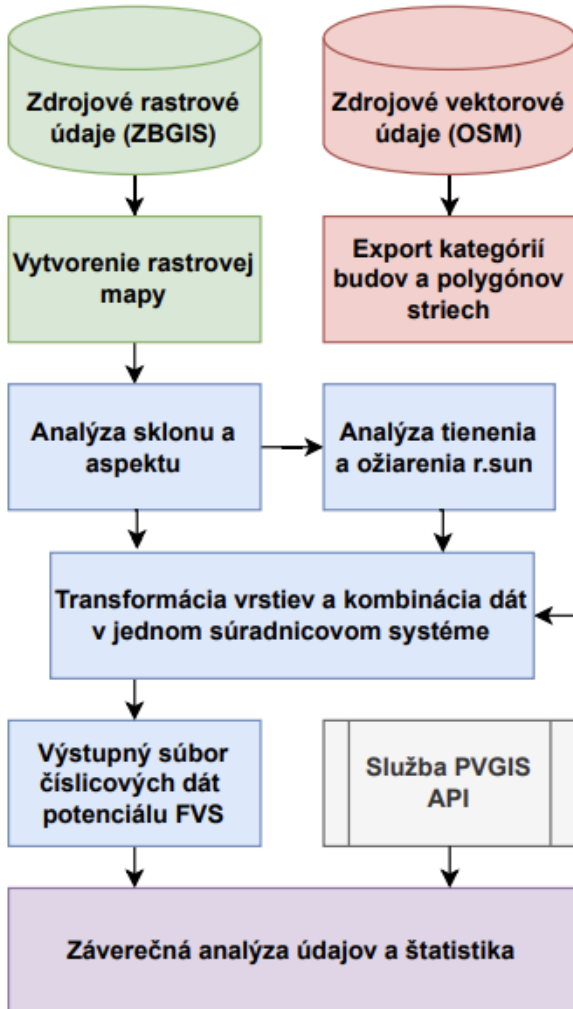


Obr.1 Priemerná mesačná výroba FVS, $P = 1 \text{ kWp}$, E_{FVS-2} .

Celková výroba energie pre FVS s inštalovaným výkonom $P = 1 \text{ kWp}$ na plochej streche $E_{FVS-1} = 1189.36 \text{ kWh/rok}$, pre šikmé strechy výstupnou ideálnou hodnotou výroby je $E_{FVS-2} = 1134.26 \text{ kWh/rok}$.

2.3 Metodika

Na základe všetkých uvedených zdrojov vyššie bola navrhnutá schéma postupu spracovania údajov a určenia potenciálu, znázornená na Obr.3. Hlavnou výhodou danej metódy je jej dostupnosť a pomerne krátky postup spracovania.



Obr. 2. Bloková schéma navrhovanej metodiky.

Prvou úlohou je import mapových dát zo zdrojov do vášho projektu. Nezabudnite nastaviť v aplikácii QGIS správny systém koordinát, buď do CRS štátu riešeného územia alebo systém koordinát vašich podkladov. Ďalším bodom je analýza sklonov a aspektov vstupnej mapy terénu, na to slúžia základné funkcie QGIS „Slope“ a „Aspect“. Knižnica QGIS GDAL a modul GRASS GIS sú rozšírenou verziou väčšiny príkazov a ponúkajú rovnako presný, ale urýchlený spôsob tvorenia daných analýz. Funkcia r.slope.aspect modulu GRASS umožňuje vykonanie vyššie spomínaných analýz naraz.

Funkcia r.sun modulu GRASS je jednou z pokročilých a obsahovo rozsiahlejších za účelom modelovania úloh. Pre správne spustenie potrebujete vytvoriť samostatný projekt v ktorom musíme vytvoriť nový súbor máp „GRASS mapset“. Je to kvázi doplnkové určenie systému koordinát aby GRASS vedel, ktorú z už existujúcich databáz musí používať pri svojich analýzach. Ako podkladové súbory pre funkciu r.sun je potrebné použiť základnú rastrovú mapu v formáte DMP a dve

vrstvy analýzy sklonu a aspektu. Ďalej potrebujeme určiť deň a čas, v ktorom bude vykonaná analýza.

Pre rozdelenie striech podľa typu sklonu je potrebné aktualizovať vrstvu sklonov a zatriediť sklony do jednotlivých skupín. Na vykonanie danej úlohy slúži príkaz základných funkcií QGIS „reclassify by table“. Daná funkcia zaraďuje dáta vybranej vrstvy do určených skupín, všetky skupiny musia byť identifikované jedným číslcovým znakom.

Tab. 1. Indexy rozdelenia striech podľa sklonu

Index	Sklon [°]	Typizácia
1	0-10	Ploché strechy
2	10-45	Šikmé strechy
3	45-90	Nevyužiteľne

Vektorová mapa OSM riešeného územia reprezentuje všetky objekty ako body, čiary a samostatné alebo spojené polygóny. Taktiež daná vrstva obsahuje aj veľké množstvo informácií pridelených každému z objektov. Táto informácia je uložená v tabuľke atribútov, je to v podstate reprezentácia vrstvy len v textovom a číslcovom formáte, každý objekt na mape má svoj riadok v tabuľke. Dôležitými informáciami sú identifikačné čísla budov, a ich typ alebo inak povedané spôsob využitia. Z celej mapy územia potrebujeme zvýrazniť iba naše objekty záujmu - budovy. Na vykonanie danej úlohy nám poslúži modul „Quick OSM“. Pre zvýraznenie všetkých striech potrebujeme do príkazového okna zadať názov objektov záujmu. V našom prípade sú to budovy nasledovne je potrebné vybrať vrstvu, v ktorej bude modul vykonávať svoju činnosť. Výstupom bude samostatná vrstva, ktorá bude obsahovať iba všetky budovy riešeného územia.

Posledným krokom v spracovaní rastrových vrstiev intenzity slnečného ožiarenia a klasifikovaných sklonov je vystrihovanie striech z celej mapy územia, a ich nasledujúca transformácia do vektorového tvaru. Vystrihovanie je vhodné vykonať pomocou príkazu „Clip raster by mask layer“ modulu GDAL, vektorová vrstva budov bude maskou. Transformáciou vystrihnutých máp do vektorového tvaru umožníme získanie tabuliek atribútov obsahujúcich charakteristiky vrstiev. Funkcia „Polygonize (raster to vector)“ vykoná transformáciu vrstvy jedným kliknutím.

Záverom práce v aplikácii QGIS je kombinácia tabuliek atribútov troch vrstiev do jednej a následne jej export do formátu [CSV]. Príkaz „Join attributes by location“ skombinuje všetky údaje podľa x,y koordinát každého polygónu vrstiev. Daný príkaz nemá možnosť kombinácie viac ako dvoch vrstiev naraz, preto ho potrebujeme spustiť viackrát.

Dôležité údaje, ktoré nie sú priamo zobrazené v schéme, sú:

- Typy budov získané z OSM sú kategorizované ako na zobrazenej Tab.2. To je priamo spojené so štatistikami z [15], ktoré sú tiež zahrnuté v časti s výsledkami.
- Úplná základná kontrola platnosti sa vykonáva po sklonovej analýze, a to porovnaním plôch striech, ktoré sú vhodné na inštaláciu FVS. Výsledná celková plocha všetkých sklonov nesmie byť väčšia ako celková plocha striech objektov vypočítaná z mapy budov OSM.

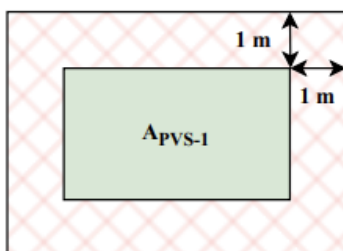
Tab. 2. Typy budov podľa OSM a ich kategorizácia

Typ budovy	Komerčné	Rezidenčné	Odstránené
yes	-	-	x
apartments	-	x	-
detached	-	-	x
service	x	-	-
garages	x	-	-
roof	x	-	-
school	x	-	-
civic	x	-	-
commercial	x	-	-
government	x	-	-
residential	-	x	-
office	x	-	-
garage	x	-	-
university	x	-	-
hospital	x	-	-
retail	x	-	-
industrial	x	-	-
house	-	x	-
carport	x	-	-
Semidet.house	-	x	-
kindergarten	x	-	-
train station	x	-	-
construction	-	-	x
parking	-	-	x
hotel	x	-	-
college	x	-	-
clinic	x	-	-
sports centre	x	-	-
silo	-	-	x
church	-	-	x
dormitory	x	-	-

Hodnotenie výkonu PVS pozostáva z týchto krokov:

1. Definovanie minimálnej vzdialenosti od okraja individuálnej oblasti, $D_{min} = 1\text{ m}$, Obr. 3.
2. Určenie efektívnej plochy pre inštaláciu PVS pomocou rovnice 1. Vzorec dokonale platí len pre dokonalé štvorcové strechy, čo je prijateľné zjednodušenie vzhľadom na početné objekty a modely.

$$A_{PVS} = \sqrt{A_{str.}} - 2D_{min} \tag{1}$$



Obr. 3. Vymedzenie vhodnej oblasti na inštaláciu PVS.

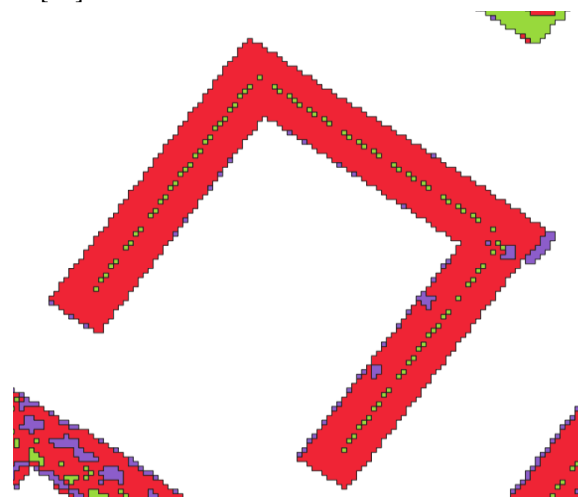
3. Určenie minimálnej potrebnej na inštaláciu FVS s výkonom 1 kWp, $A_{FVSmin} = 4.6\text{ m}^2$.

4. Potenciál výkonu FVS sa vypočíta z plôch sklonu. Sumárny inštalovaný výkon PVS je súčtom všetkých plôch rozdelených na minimálnu plochu pre $P = 1\text{ kWp}$.
5. Ročná výroba energie FVS sa vypočíta z referenčného potenciálu PVGIS Obr.1., korigovaného o individuálne slnečné žiarenie z výstupu r.sun pre každú oblasť. Maximálna výroba bola uvažovaná v oblastiach kde podľa modelu r.sun dopadala najväčšia hodnota žiarenia, ostatné časti striech boli škálované na vzťažnú hodnotu výroby E_{FVS-1} , E_{FVS-2} . Zatižené časti striech boli vyradené z výpočtu.

Ďalšia automatizácia danej metódy je možná pomocou PyQGIS priamo v celom procese alebo aspoň v zelenej, červenej a modrej časti vývojového diagramu. Pri automatizácii presnosť metódy sa zachováva ale je možné výrazne zväčšiť účinnosť, hlavne časovú.

3 Výsledky a diskusie

Analýza sklonu poskytuje výsledky, ktoré sú znázornené na Obr. 4. Môžete vidieť, že kategorizácia výrazne pomáha filtrovať malé nesúlady v zdrojových údajoch. Výsledná tabuľka atribútov vytvorenej vrstvy je potom pripravená na použitie bez ďalšieho spracovania. Ak sklony netvorí dostatočne veľké plochy, sú neskôr v procese zanedbané pomocou minimálnej veľkosti inštalácie FVS, čo znamená, že táto špecifická oblasť je nevhodná aj pre najmenšiu uvažovanú PVS s výkonom 1 kWp. Táto časť analýzy je alternatívnym procesom na rozpoznanie využiteľnej plochy na strechách namiesto empirických koeficientov, ako sa používa napríklad v prípade [15].



Obr. 4. Výsledok kategorizovanej analýzy sklonu

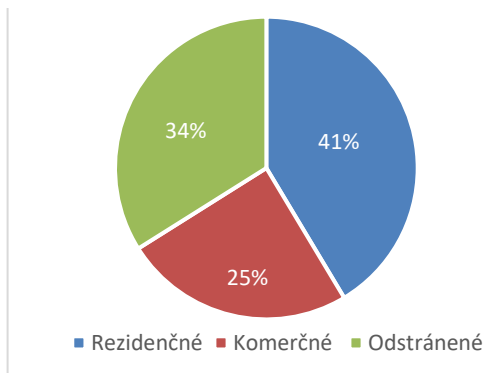
Za vzťažné hodnoty dátumu a času, pri tvorbe analýzy intenzity slnečného ožiarenia pomocou funkcie r.sun boli použité 16 júla o poludní. Štatisticky je júl mesiac v ktorom v našich končinách na Zem dopadáva najviac slnečnej energie, preto stred mesiaca a dňa je teoretickou ročnou špičkou výkonu FVS. Pre určenie úplne všetkých zatižených oblastí nie je jedna analýza dostačujúca. Lebo zatižené oblasti sa menia počas dňa v závislosti od uhla a polohy slnka, a výrazne sa zväčšujú počas zimnej sezóny kvôli tomu že slnko je nízko na oblohe, a smer dopadu slnečného žiarenia je oveľa nižšie ako v lete. Nevýhodou r,sun je to že vie robiť analýzy iba v priebehu

jedného určeného dňa a času, v takom prípade nevieme nasimulovať úplne všetky časti striech, ktoré budú zatienené v priebehu celého roku. Riešenie vzniknutého problému spoľieha v kombinácii viacerých analýz počas rôznych dní v roku. Výsledkom analýzy r.sun bude rastrová vrstva obsahujúca hodnoty intenzity slnečného ožiarenia [W/m^2] od minimálnych ktoré budú v úplne zatienených oblastiach, tie sú označené tmavou až čiernou farbou, a naopak maximálne oblasti vo svetlých farbách.



Obr. 5. Výsledok analýzy r.sun - zatienené objekty

Vrstva budovy vytvorená pomocou OSM ako už bolo spomínané obsahuje kategorizáciu budov. Niektoré z daných kategórií nemôžu mať fotovoltaické zdroje na svojej streche, sú to kostoly, otvorené parkoviska alebo nerozpoznané objekty kategorizované ako „yes“. Podiel využitých a odstránených budov je znázornený na Obr. 6.



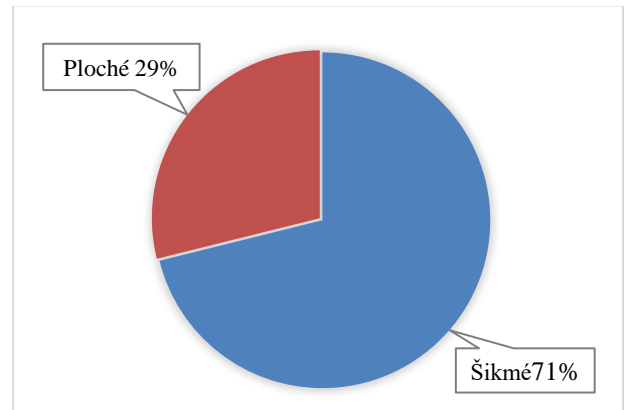
Obr. 6. Štatistika typu budov

Z obrázku je vidieť že viac ako tretina všetkých objektov z vybranej oblasti bude odstránená, najväčšou ich časťou sú nerozpoznané objekty „yes“ ktoré stanovia 96% odstránených plôch. Čiže pri získaní podkladov ktoré by mali presnejšiu klasifikáciu budov, vieme výrazne zlepšiť výsledok potenciálu inštalovaného výkonu vo vybranej oblasti, ktorý priamo závisí od užitočnej plochy.

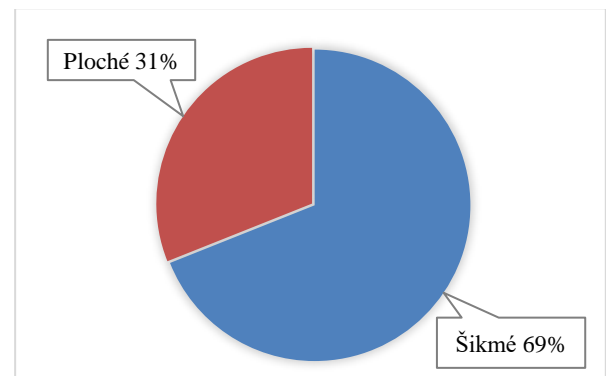
Všeobecne, výsledky fotovoltaického potenciálu získané danou metódou, môžeme rozdeliť do FVS inštalovaného výkonu Obr. 7., a celkovej ročnej výroby FVS Obr. 8., - všetko je zhrnuté v tabuľke uvedenej nižšie.

Tab. 3. Rozdelenie intenzity ožiarenia pre ploche strechy

	Šikmé	Ploche	Celkovo
Výkon FVS [MWp]	30.81	12.51	43.33
Výroba FVS [GWh/rok]	32.24	14.51	46.76



Obr. 7. Pomer inštalovaného výkonu FVS



Obr. 8. Pomer celkovej ročnej výroby FVS

Je vidieť, že aj keď rovné plochy majú menší podiel všetkých vhodných plôch pre inštalácie PVS, produkujú štatisticky viac energie na jeden meter štvorcový. Dôvodom je orientácia šikmých striech. Mnohé šikmé strešné plochy nie sú orientované na južný smer, ale na všetky smery. To má za následok štatisticky menšie množstvo vyrobenej energie na meter štvorcový ako ploché strechy, ktoré nie sú teoreticky orientované na žiadny smer.

Získané výsledky sú založené na všetkých obmedzeniach a zjednodušeníach uvedených v predchádzajúcich častiach článku, avšak predpoklady sú v súlade so súčasnými vedeckými prácami a osvedčenými postupmi. Tieto zjednodušenia sú veľmi dôležité najmä z dôvodu praktického využitia tejto metodiky z hľadiska výpočtového výkonu, a teda aj praktickosti samotného výpočtu.

4 Záver

V tomto článku predstavená zjednodušená metodika odhadu výkonu a ročnej vyrobenej energie fotovoltaických systémov (FVS). Výskum bol vykonaný s cieľom preukázať jeho účinnosť a výsledky na príkladnom mestskom úseku Bratislavy. Boli určené zdroje dát a poskytnutý krok-za-krokom

popis potrebných analýz. Diskutované obmedzenia sú spojené so štatistickými a praktickými dôvodmi, pričom sú otvorené možnostiam však jedna z najväčších výziev – udržať modelovanie a analýzu rýchlu, spoľahlivú a ideálne flexibilne detailnú.

Cieľom tejto štúdie je rozšíriť znalostnú bázu pre praktickejšie odhady inštalácií fotovoltických systémov na strechách existujúcich budov, keďže trendy sú silno orientované na politickom poli.

Literatúra

[1]“Fit for 55 – Plán EÚ pre zelenú transformáciu.” Accessed: Apr. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/sk/policies/green-deal/fit-for-55/>

[2]*Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings (recast)*. 2021. Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52021PC0802>

[3]J. Jeriha, “Energy Community Definitions”.

[4]“IRENASTAT.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Data/Downloads/IRENASTAT>

[5]*COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS EU Solar Energy Strategy*. 2022. Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A221%3AFIN>

[6]“An overview of the Solar Radiation toolset—ArcGIS Pro | Documentation.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available:<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-solar-radiation-tools.htm>

[7]“Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online] Available:https://jointresearchcentre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

[8] “Project Sunroof.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://sunroof.withgoogle.com/>

[9] “Solar Design And Proposal Software | OpenSolar.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.opensolar.com/>

[10] N. Moyroud and F. Portet, “Introduction to QGIS,” in *QGIS and Generic Tools*, John Wiley & Sons, Ltd, 2018, pp. 1–17. doi: 10.1002/9781119457091.ch1.

[11]“26.GRASS GIS Integration — QGIS Documentation documentation.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/grass_integration/grass_integration.html

[12] “r.sun - GRASS GIS manual.” Accessed: Apr. 03, 2024.[Online]. Available: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.sun.html>

[13] Ú. geodézie republiky kartografie a katastra Slovenskej, “Terén | ZBGIS.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://zbgis.skgeodesy.sk/mkzbgis/sk/zakladna-mapa>

[14]“QuickOSM — QGIS Python Plugins Repository.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online].

Available: <https://plugins.qgis.org/plugins/QuickOSM/>

[15] L. Sun, Y. Chang, Y. Wu, Y. Sun, and D. Su, “Potential estimation of rooftop photovoltaic with the spatialization of energy self-sufficiency in urban areas,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3982–3994, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.03.035.

Vyššie harmonické v súvislosti so zaťažením N vodiča

Bc. Dušan Gavora, Ing. Vladimír Kujan, PhD.

FEI STU v Bratislave
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
xgavora@stuba.sk

Tento príspevok sa zaoberá princípom vplyvu vyšších harmonických prúdov v trojfázových NN distribučných rozvodoch na zaťaženie neutrálneho vodiča v týchto sieťach a prezentuje výsledky zistení ako aj merania zamerané na tento nežiadúci vplyv.

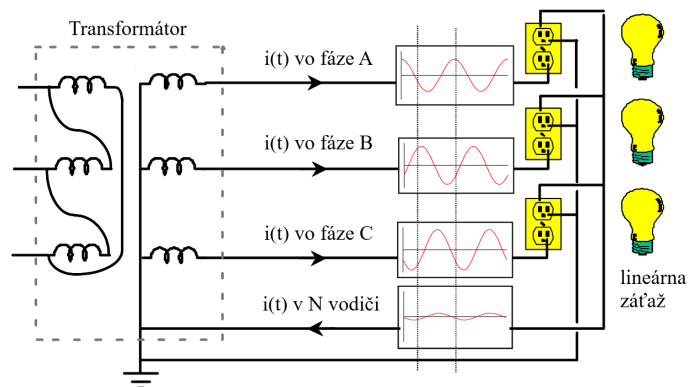
1 Úvod

Prechod od lineárnych ku spínaným napájacím zdrojom zabezpečil vyššiu účinnosť, kompaktnjšie rozmery, nižšiu hmotnosť, ale aj väčšiu všestrannosť z hľadiska aplikácii týchto zdrojov. [1] Spínané zdroje teda môžu pôsobiť dojemom, že ide v porovnaní s ich lineárnymi predchodcami o dokonalú náhradu. V reálnom svete má však často zlepšenie v jednej oblasti za následok zhoršenie v inej, resp. iných oblastiach, a spínané zdroje nie sú výnimkou. Problém generácie tzv. vyšších harmonických prúdov týmito zariadeniami a ich vplyv na sieť je síce veľmi dobre prebádanou oblasťou, avšak pri návrhu, resp. dimenzovaní elektrických inštalácií na území Slovenskej Republiky často prehliadaným problémom. Nepriaznivý vplyv vyšších harmonických (ďalej len VH) týmito zariadeniami sa prejavuje vo viacerých oblastiach, avšak pravdepodobne najnepriaznivejším, ak sa s ním pri spomínanom návrhu, resp. dimenzovaní neuvažuje, je ich vplyv na zaťaženie N vodiča v NN distribučných trojfázových systémoch.

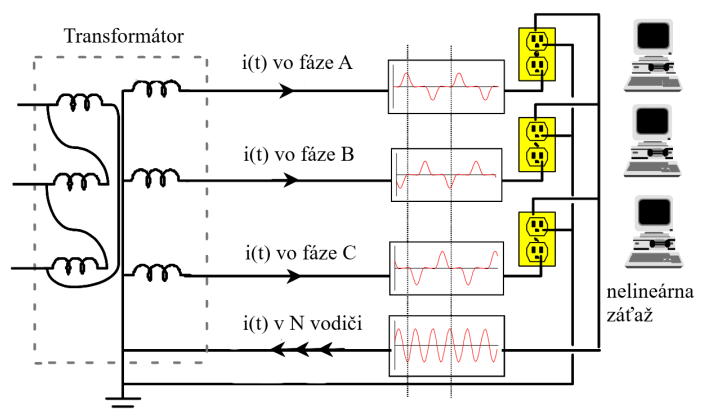
2 Vplyv vyšších harmonických na zaťaženie N vodiča

Ak uvažujeme 3-fázovú symetrickú lineárnu záťaž napájanú 3-fázovým symetrickým harmonickým napätím, efektívna hodnota prúdu neutrálnym vodičom bude v ideálnych podmienkach nulová, resp. v reálnych podmienkach blízka tejto hodnote. [2] Príklad takéhoto prípadu je uvedený na obr. č.1 vo forme troch žiaroviek tvoriacich 3-fázovú symetrickú záťaž. Toto však neplatí, ak predmetnú 3-fázovú záťaž tvoria nelineárne 1-fázové spotrebiče, resp. spotrebiče odoberajúce neharmonický prúd s obsahom VH určitých rádov, ako napríklad spínaný zdroj. Na obr. č.2 je uvedený príklad takejto záťaže vo forme napájacieho zdroja osobného počítača. Ako je možné vidieť na uvedenom príklade, priebeh prúdu odoberaného takýmto spotrebičom má tvar impulzov, a v tomto konkrétnom príklade, so šírkou 60° a vzájomným posunom 120°, čo spôsobuje, že nedochádza ku

vzájomnému anulovaniu prúdu v N vodiči. [3] Uvedená hodnota šírky impulzov je iba príklad a táto hodnota môže byť v reálnych podmienkach rôzna. Vykonaním harmonickej analýzy takéhoto signálu by sme zistili, že takýto priebeh má vysoký podiel VH, ako si aj neskôr ukážeme na nameraných výsledkoch. Efektívna hodnota prúdu N vodičom v takomto prípade môže dosahovať až $\sqrt{3}$ -násobok prúdu vo fázovom vodiči. [2]



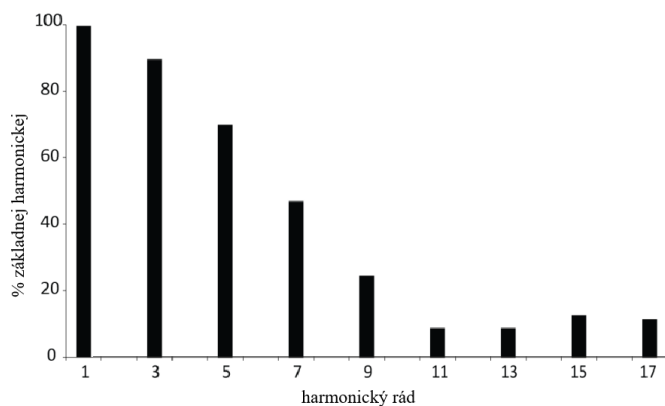
Obr. 1: Príklad 3-fázovej lineárnej symetrickej záťaže napájanej symetrickým harmonickým napätím. [3]



Obr. 2: Príklad 3-fázovej lineárnej nesymetrickej záťaže napájanej symetrickým harmonickým napätím. [3]

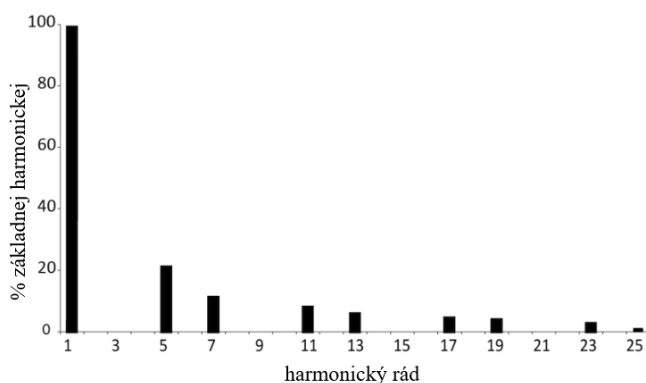
2.1 Zariadenia generujúce vyššie harmonické prúdu

Spínané zdroje nie sú jedinými zariadeniami generujúcimi VH prúdu. Medzi tieto spotrebiče patria napríklad aj elektronické predradníky svetelných zdrojov, malé nepretržitelné zdroje napájania (UPS), oblúkové pece a zväračky, a frekvenčné meniče pre pohony. [1] [4] Nelineárne spotrebiče je možné vo všeobecnosti rozdeliť na 1-fázové a 3-fázové. Väčšinu 1-fázových spotrebičov tvoria spínané zdroje [1] [4] a z tohoto dôvodu ako príklad uvádzame ich typické harmonické spektrum (obr. č.3).



Obr. 3: Typické harmonické spektrum spínaného zdroja na vstupe napájacieho zdroja osobného počítača. [1]

Z hľadiska 3 - fázových zát'azí je veľmi rozšírený tzv. 6-pulzný mostíkový usmerňovač, ktorý je možné nájsť napríklad na vstupe 3-fázových frekvenčných meničov pre pohony. Typické harmonické spektrum takéhoto meniča energie je uvedené na obr. č.4.



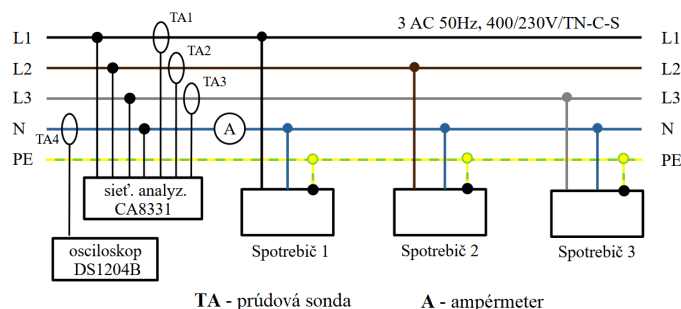
Obr. 4: Typické harmonické spektrum 6-pulzného mostíkového usmerňovača. [1]

3 Výsledky meraní

Jav možného preťažovania N vodiča môžeme pozorovať vo výsledkoch nami realizovaných meraní v súvislosti s uvedeným nežiadúcim javom.

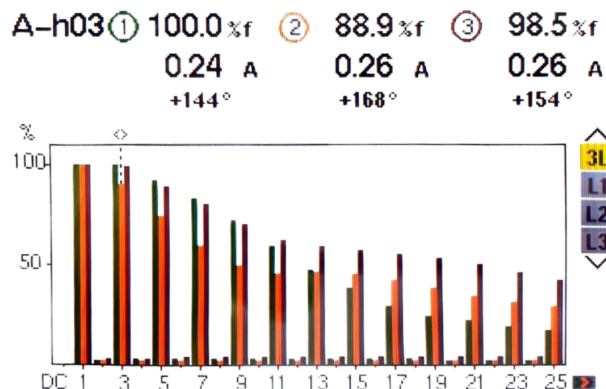
3.1 Laboratórne meranie

Laboratórne meranie sme realizovali pre trojicu laptopových napájacích zdrojov, ktoré tvoria z hľadiska nominálneho činného výkonu 3-fázovú symetrickú zát'až. Schéma tohoto merania je uvedená na obr. č.5.



Obr. 5: Schéma laboratórneho merania pre trojicu laptopových napájacích zdrojov.

Na základe nameraného harmonického spektra odoberaného prúdu uvedeného na obr. č.6 môžeme povedať (pri porovnaní s typickým harmonickým spektrom uvedeným na obr. č.3), že ide o spotrebiče vo forme spínaných zdrojov.



Obr. 6: Namerané harmonické spektru odoberaného prúdu vo fázových vodičoch pre trojicu laptopových napájacích zdrojov v rámci laboratórneho merania.

Z uvedených nameraných efektívnych hodnôt prúdu vo fázových a N vodiči (tab. č.1) môžeme vidieť, že z hľadiska odoberaného prúdu ide o približne symetrickú zát'až. Napriek tomu nameraná efektívna hodnota prúdu v N vodiči dosahuje **1,76-násobok** priemernej efektívnej hodnoty prúdu vo fázových vodičoch.

	L_1	L_2	L_3	N
I_{ef} [A]	0,56	0,61	0,59	1,03

Tab. 1: Namerané efektívne hodnoty prúdov vo fázových a v N vodiči v rámci laboratórneho merania pre trojicu laptopových napájacích zdrojov.

Ak sa pozrieme na nameraný časový priebeh prúdu v N vodiči (obr. č.7 hore), môžeme pozorovať, že pozostáva z impulzov. Namerané harmonické spektrum priebehu tohoto prúdu (obr. č.7 dole) ukazuje, že dominantnými zložkami prúdu v N vodiči sú VH rádov tretieho (3.), deviateho (9.), pätnásteho (15.) a ďalších nepárnych násobkov troch.



Obr. 7: Nameraný časový priebeh (hore) a harmonické spektrum prúdu N vodičom (dole) pre trojicu laptopových napájacích zdrojov v rámci laboratórneho merania.

Prítomnosť uvedených rádov VH a ich dominantnosť v prúde N vodičom je spôsobená tým, že pri súčte ich okamžitých hodnôt nedochádza ku vzájomnému anulovaniu ako v prípade napr. základnej harmonickej. Matematicky je možné VH týchto rádov napísať ako (pri uvážení symetrickej záťaže a symetrickeho napájacieho napätia):

$$i_{3h, A}(t) = I_{3h, A} \cdot \sin(3n \cdot (\omega t + \varphi + 0^\circ)) = I_{3h, A} < 3n \cdot \varphi$$

$$i_{3h, B}(t) = I_{3h, B} \cdot \sin(3n \cdot (\omega t + \varphi - 120^\circ)) = I_{3h, B} < 3n \cdot \varphi$$

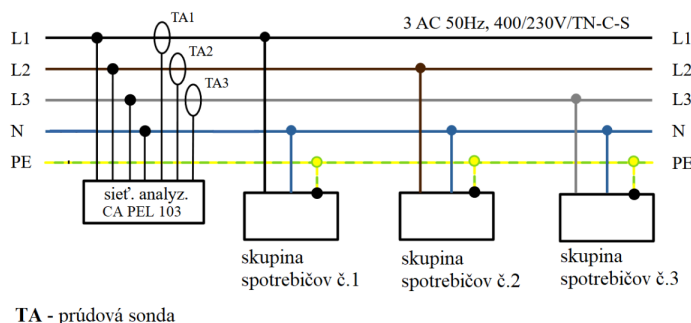
$$i_{3h, C}(t) = I_{3h, C} \cdot \sin(3n \cdot (\omega t + \varphi + 120^\circ)) = I_{3h, C} < 3n \cdot \varphi$$

,kde: $n = 1, 3, 5, 7, \dots$

Z uvedeného si je možné všimnúť, že za predpokladu ideálne symetrickej záťaže majú fázory VH rádov nepárneho násobku rovnaký uhol natočenia, resp. je medzi nimi nulový fázový posun. Z tohoto dôvodu nedochádza ku ich, už spomínanému, vzájomnému anulovaniu. V zložkových sústavách sa VH týchto rádov prejavujú ako nulová zložka. [4]

3.2 Meranie v reálnej prevádzke

Podobne tento jav môžeme pozorovať aj na výsledkoch z merania v reálnej prevádzke serverovej miestnosti. Na fotografii na obr. č.9 časti tejto miestnosti môžeme pozorovať veľké množstvo napájacích zdrojov malých výkonov s predpokladom, že ide o spínané zdroje. Meranie bolo realizované prostredníctvom sieťového analyzátoru pripojeného na vývod napájajúci danú miestnosť podľa schémy na obr. č.8. Na základe nameraného harmonického spektra odoberaného prúdu uvedeného na obr. č.10 môžeme potvrdiť náš predpoklad, že ide o záťaž v podobe spínaných zdrojov.



Obr. 8: Schéma merania v reálnej prevádzke pre serverovú miestnosť.



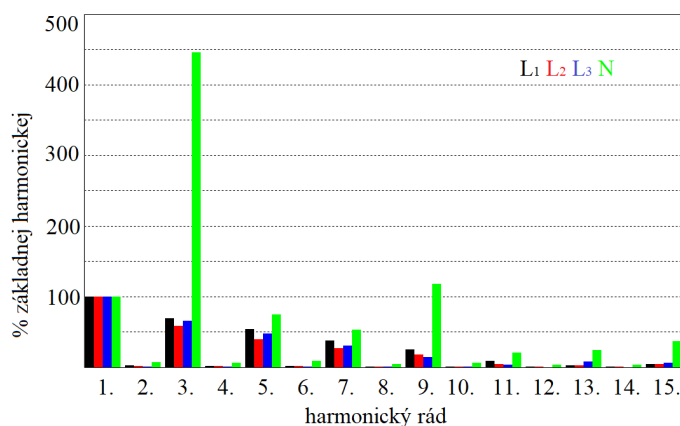
Obr. 9: Fotografia časti serverovej miestnosti.

Na nameraných efektívnych hodnotách uvedených v tab. č.2 môžeme pozorovať, že táto hodnota v N vodiči dosahuje **1,55-násobok** priemernej efektívnej hodnoty prúdu vo fázových vodičoch.

	L_1	L_2	L_3	N
$I_{ef}[A]$	11,55	13,65	21,19	23,91

Tab. 2: Namerané efektívne hodnoty prúdov vo fázach a v N vodiči v rámci merania v reálnej prevádzke serverovej miestnosti.

Namerané harmonické spektrum prúdu v N vodiči uvedené na obr. č.10 ukazuje, že aj v tomto prípade sú VH nepárneho násobku troch dominantnými zložkami tohoto prúdu. Taktiež môžeme pozorovať pomerne vysoký podiel základnej harmonickej, ale aj 5. a 7. harmonickej, čo je zapríčinené výraznou nesymetriou odberu.



Obr. 10: Namerané harmonické spektrum prúdu odoberaného serverovňou a prúdu v N vodiči.

V tomto konkrétnom prípade, s ktorým sme sa mohli v reálnej prevádzke stretnúť, je možné na základe uvedených nameraných hodnôt, ale aj po pohľade na samotné riešenie napájania spotrebičov v predmetnej serverovej miestnosti poukázať na nevhodnosť tohoto riešenia. Ak sa pozrieme na typické harmonické spektrum 6-pulzného mostíkového usmerňovača uvedeného na obr. č.4, môžeme si všimnúť absenciu VH nepárneho násobku troch. Je možné matematicky pomocou 1. Kirchhoffovho zákona ukázať, že nelineárne symetrické spotrebiče nevyužívajúce N vodič neodoberajú už spomenuté VH nepárneho násobku troch. Z tohoto dôvodu je riešenie vo forme trojfázového napájacieho zdroja, resp. skupiny trojfázových napájacích zdrojov vyššieho výkonu na vstupe so spomenutým 6-pulzným mostíkovým usmerňovačom v kombinácii s jednosmernými rozvodmi vhodnou náhradou prezentovanému existujúcemu riešeniu vyššie.

4 Záver

Prechod od lineárnych zdrojov na elektronické meniče elektrickej energie ako napr. spínaný zdroj priniesol veľa výhod vo forme efektívnosti, menších rozmerov a ďalších. Zároveň však spínané zdroje spôsobujú nepriaznivý spätný vplyv na sieť vo forme odoberaných vyšších harmonických prúdov, ktoré spôsobujú viacero problémov. Jedným z týchto problémov je vplyv VH nepárneho násobku troch na zaťaženie N vodiča v distribučných systémoch, ktorý môže spôsobiť preťaženie tohoto vodiča, čo môže viesť až ku jeho poškodeniu. Napájacie zdroje tohoto typu nie sú síce jediným druhom spotrebičov, ktorý tento problém spôsobuje, sú však vo väčšinovom zastúpení a preto ich uvádzame ako príklad. Výsledky nami realizovaných meraní ukazujú, že so spomenutým problémom je možné sa ešte stále stretnúť, a to aj v reálnej prevádzke. Fakt, že efektívna hodnota v N vodiči je výrazne vyššia ako priemerná efektívna hodnota vo fázových vodičoch nemusí automaticky znamenať preťažovanie tohoto vodiča, ako je možné vidieť v prípade prezentovanej serverovne. Nutné je však poukázať na to, že pri zažatí tejto elektrickej inštalácie je nutné uvažovať s predmetným vplyvom VH, resp. spotrebičov, ktoré ich generujú, resp. s ním uvažovať pri návrhu danej inštalácie. Existuje viacero riešení, a to preventívnych alebo korekčných, kde jednou z možností je pri aplikácii väčšieho množstva 1-fázových napájacích zdrojov malého výkonu ich nahradenie jedným alebo skupinou napájacích zdrojov vyššieho výkonu, využívajúci napr. 6-pulzný usmerňovač na svojom vstupe, v kombinácii s jednosmernými rozvodmi a tým sa vyhnúť problému preťaženia N vodiča úplne.

Literatúra

- [1] CHAPMAN, D. 2011. Harmonics: Causes and effects. [online]. 2011, [cit. 2024-03-30] Dostupné na Internete: www.leonardo-energy.org/node/1283.
- [2] SCHONEK, J. 2011. The singularities of the third harmonic. [online]. 2011, [cit. 2024-03-30] Dostupné na Internete: https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/The_singularities_of_the_third_harmonic.pdf.
- [3] 2003. Why do 3 rd harmonic currents overload neutral conductors?. [online]. 2003, [cit. 2024-03-30] Dostupné na Internete: https://www.mirusinternational.com/downloads/hmt_faq07.pdf.
- [4] KAMENKA, A. 2014. Six tough topics about harmonic distortion and Power Quality indices in electric power systems. [online]. 2014, [cit. 2024-03-30] Dostupné na Internete: https://www.academia.edu/35594967/2014_Six_tough_topics_about_harmonic_distortion_and_Power_Quality_indices_in_electric_power_systems.

Výpočty prechodných javov v elektrizačnej sústave v prostredí ATP-EMTP a ich automatizácia v programovacom jazyku Python

Bc. Ivan Bednárík¹

¹ Ústav vedy a výskumu, FEI STU v Bratislave

xbednariki@stuba.sk

Abstrakt – V tomto článku je uvedený príklad použitia programov napísaných v jazyku Python na získanie veličín, ako sú skratové prúdy a namerané impedancie pri skratoch pre rôzne stavy na základe výstupu modelu, ktoré možno použiť napríklad na správne nastavenie a dimenzovanie ochrán pre jednotlivé modelované vedenia. Vytvorené programy sú navrhnuté ako prototypy na automatizáciu úpravy modelu.

Kľúčové slová – automatizácia, ATP, Python, prechodné javy, skrat, ochrana

1 Úvod

Program ATP-EMTP (Alternative Transient Program – ElectroMagnetic Transients Program) je simulačný program špecializovaný na výpočet prechodných javov v elektrizačnej sústave. Obsahuje knižnice, ktoré umožňujú modelovať detailne rôzne prvky elektrizačnej sústavy, ako napríklad generátory, zdroje, vedenia, záťaž, ističe a vypínače a model simulovať cez časovú a frekvenčnú doménu. Tento program sa používa cez príkazový riadok, preto sa veľmi často používa s grafickým prostredím programu ATPDraw, ktorý z grafického modelu vygeneruje model formátu ATP vhodný pre ATP-EMTP. Program ATP-EMTP po spustení simulácie uloží výsledky do súboru formátu PL4, ktorý je možné graficky zobrazit'.

Okrem programu ATP-EMTP existujú iné modelovacie prostredia, napríklad ako OpenDSS, Simulink a Pandapower. Každý z týchto programov sa líši ako svojimi možnosťami analýzy, tak aj metódami použitými pri výpočtoch riešení ustálených a prechodných dejoch.

OpenDSS je open-source program vhodný pre modelovanie ustáleného stavu distribučných sietí. Používa sa na výpočty ustálených stavov, harmonických frekvencií a na modelovanie mikrosietí s distribuovanou výrobou elektriny. Je to nástroj na určenie spoľahlivosti a analýzy siete. Jeho nevýhodami sú obmedzené výpočty prechodných dejov a výkon softwaru pri simulovaní väčších sietí.

Simulink je grafické simulačné prostredie integrované do MATLABu. Obsahuje knižnice rôznych namodelovaných prvkov, čím sa znižuje potreba modelovania vlastných. Je vhodný pre modelovanie a spracovávanie signálov, ovládacích systémov a analýzu prechodných javov. Jeho integrácia v MATLABe ho umožňuje používať na automatizáciu

modelovania. Medzi nevýhody patrí jeho cena a rýchlosť simulácie pri väčších modeloch. Vo všeobecnosti sa ale funkcionality Simulinku prelínajú s tými s ATP-EMTP.

Pandapower je open-source knižnica pre jazyk Python vytvorená pre analýzu a optimalizáciu distribučných sietí. Obsahuje knižnicu prvkov používaných v distribučných sieťach. Je navrhnutá pre riešenie ustáleného stavu siete a optimalizáciu tejto prevádzky. Táto knižnica má aj obmedzenú možnosť riešiť prechodné javy, ako spínanie a skraty, avšak zatiaľ používa zjednodušené dynamické modely, čo má za následok nedostatky v oblastiach ako ovládanie systému, stabilita generátora a hranice stability systému. [1]

Pre program ATP-EMTP je možné okrem vstavaných knižníc a prvkov použiť vlastné, pomocou jazyka MODELS. Tento jazyk je schopný skompilovať prvky napísané v jazykoch FORTRAN a C++ do ATP. **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**

Pri skúmaní rôznych vplyvov na sieť je niekedy potrebné analyzovať údaje z viacerých modelov ATP. Preto je možné pomocou externého softvéru upraviť súbor ATP a priamo spustiť riešiteľ bez použitia ATPDraw. Týmto spôsobom je možné automaticky vytvárať modely ATP a spracovávať údaje zo simulácii a konvertovať ich na vhodnejší formát. [3]

Programovací jazyk Python patrí medzi najpoužívanejšie programovacie jazyky. Výber tohto jazyka na výrobu aplikácie je vhodný kvôli jednoduchosti tohto jazyka na učenie, všestrannosti, veľkého výberu vedeckých a matematických knižníc a knižníc na prácu s dátami, ako napríklad NumPy, pandas, SciPy a Matplotlib. K jazyku Python a samotným knižniciam je popísaná podrobná dokumentácia, pričom je možné sa obrátiť aj na rozsiahlu online komunitu na internetových fórach.

Tento príspevok uvádza príklad o využití programov napísaných v jazyku Python na získanie veličín, ako sú skratové prúdy a merané impedancie pri skratoch pre rôzne stavy vychádzajúce z výstupného modelu, ktoré je možné použiť napríklad pre správne nastavenie a dimenzovanie ochrán pre jednotlivé namodelované vedenia.

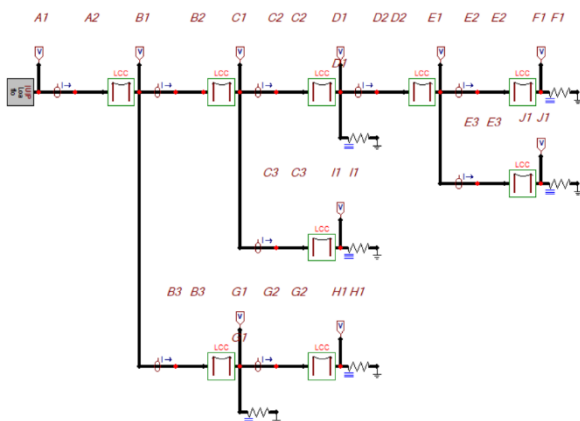
Výhodou takéhoto riešenia je kombinácia silného špecializovaného výpočtového aparátu riešiteľa ATP, čo poskytuje rýchlosť získania výsledkov zo simulácie a silného aparátu spracovania dát knižníc Python ako NumPy a pandas.

2 Jadro

Pre overenie možnosti automatizácie je nutné vytvoriť základný (výstupný) model. Po vytvorení tohto ATP modelu je nutné správne prečítať tento model v Python programe a poskytnúť používateľovi nástroje pre analýzu. Následne podľa voľby používateľa sa vygeneruje nový ATP model, ktorý sa vhodne modifikuje a je spustený v riešiteľovi, ktorý vygeneruje súbor s výsledkami analýzy v časovej doméne. Dáta z týchto analýz sa vhodne spracujú a poskytnú používateľovi výsledok analýzy, v tomto prípade buď skratové prúdy alebo namerané impedancie.

2.1 Základný model

Základný model obsahuje malý model elektrickej siete. Zdrojom je prvok LOAD FLOW UP, ktorý udržuje veľkosť napätia v uzle A1. Okrem neho sa nachádza v modeli 9 vedení prenášajúcich elektrickú energiu, 6 odberov v odberových uzloch a ostatné prepojovacie uzly. Na začiatku každého z vedení je umiestnená sonda merajúca prúd a na každej tejto sonde sonda merajúca napätie.



Obr. 1 Modelovaná sieť v ATPDraw.

Vygenerovaný ATP model má nasledovnú štruktúru:

- Okrajové podmienky simulácie
- Odbery
- Vedenia
- Spínače/sondy prúdu
- Zdroje
- Výstupy/sondy napätia

2.2 Meranie skratových prúdov

Veľkosť nárazového skratového prúdu závisí od viacerých faktorov, ako typ skratu, impedancia vedenia, okamih vzniku skratu a prúd na vedení v okamihu vzniku skratu. Cieľom vytvoreného programu `short_circuits.py` je vyhodnotiť maximálny skratový prúd pre vybrané uzly pre 1-fázové a 3-fázové skraty.

Zo základného modelu ATP sa z Výstupov získa zoznam uzlov, ktoré je možné skratovať. Upravený model musí obsahovať v Spínačoch navyše:

- Skratovaný uzol a jeho fázy
- Čas začatia skratu
- Trvanie skratu

Pre trojfázové skraty sú skratované všetky 3 fázy. Čas začatia skratu sa postupne pre generované modely posúva počas jednej periódy (20 ms). Trvanie skratu musí byť aspoň 1 pol perióda pre zistenie nárazového skratového prúdu.

Aby boli výsledky simulácie spracovateľné, musia byť prekonvertované pomocou programu `pl42mat.exe` z formátu PL4 na formát MAT. Pre každý čas začatia skratu sa vyhodnocujú nárazové skratové prúdy, z ktorých sa vyberie ich najvyššia hodnota.

2.3 Meranie impedancie pri skrate

Impedancia v uzle pri skrate závisí od impedancie vedení, záťaží v sieti a elektrickej vzdialenosti skratu. Cieľom vytvoreného programu `measure_impedance.py` je vyhodnotiť impedancie (odpory a reaktancie) vo vybranom uzle počas 3-fázového skratu na vybranom vedení.

Zoznam uzlov sa získa rovnako, ako pri skratových prúdoch. Zoznam vedení sa získa z Vedení, pričom každé vedenie je označené dvojicou uzlov začiatok-koniec. Upravený model musí v sebe obsahovať spracovanie vstupu napätí a prúdov na výstupy odporu a reaktancie. Tento algoritmus (model) bol už vytvorený v ATPDraw pomocou MODELS, ako RX. Ďalej musí upravený model rozdeliť vedenie v mieste skratu. Toto sa dosiahlo vytvorením nového uzla, adekvátnou úpravou dĺžky vedení a rovnako ako pri meraní skratového prúdu sa musí do Spínačov pridať spínač spôsobujúci skrat. Modely sú postupne vytvárané pre rôzne miesta vzniku skratu na vedení, pričom hranice týchto skratov sú určené používateľom.

Výsledky musia byť rovnako prekonvertované pomocou programu `pl42mat.exe` z formátu PL4 na formát MAT. Z týchto hodnôt sa vytvorí závislosť odporu a reaktancie od miesta vzniku skratu.

2.4 Vstupy a výstupy programov

2.4.1 Základný model v ATP

Pre základný model bol zvolený ako zdroj Load Flow UP, ktorý v takejto konfigurácii predstavuje 400 kV tvrdú sieť.

Tab. 1 Parametre zdroja

p. č.	Zdroj (Load Flow UP)	Napätie (kV)
1	A1	326,59

Konfigurácia a parametre vedení boli zvolené, tak, aby na výsledkoch bol viditeľný rozdiel medzi jednotlivými modelmi.

Tab. 2 Parametre vedení

p. č.	Vedenie (začiatok – koniec)	Dĺžka vedenia (km)
1	A2 – B1	20
2	B2 – C1	20

3	C2 – D1	20
4	D2 – E1	20
5	E2 – F1	20
6	B3 – G1	10
7	G2 – H1	15
8	C3 – I1	50
9	I1 – J1	25

Všetky zátáže sú zvolené, aby reprezentovali záťaž 100 – 350MW pri nominálnom napätí.

Tab. 3 Parametre zátáží

p. č.	Zátáž (uzol pripojenia)	Odpor zátáže (Ω)
1	D1	950
2	F1	800
3	G1	500
4	H1	1200
5	I1	800
6	J1	1000

2.4.2 Short_circuits.py

Pre program short_circuits.py boli zvolené uzly blízke zdroju.

Tab. 4 Výstup z programu short_circuits.py

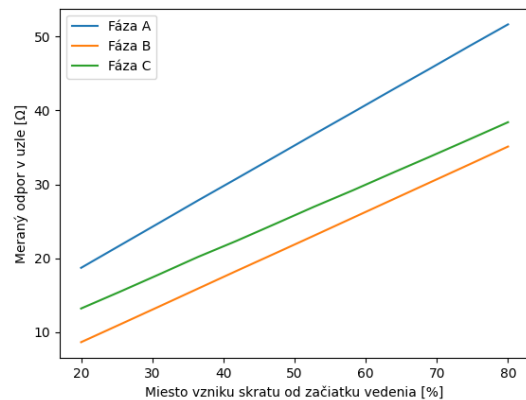
p. č.	Vybrané uzly na skrat	Nárazový skratový prúd (A)
1	B1 – 1-fázový skrat fázy A	16842,078
2	B1 – 3-fázový skrat	18550,191
3	C1 – 1-fázový skrat fázy A	8259,493
4	C1 – 3-fázový skrat	9075,742

2.4.3 Impedance_measurement.py

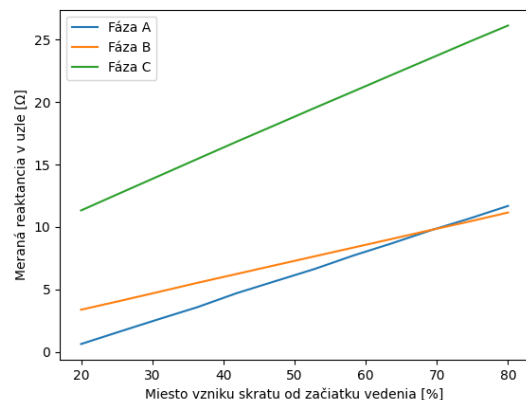
Pre program impedance_measurement.py boli zvolený uzol blízky zdroju a vedenie, ktoré by korešpondovalo 2. až 3. zóne pre dištančnú ochranu.

Tab. 5 Vstup programu impedance_measurement.py

p. č.	Skratované vedenie	Meraný uzol
1	C3 – I1	B1



Obr. 2 Závislosť odporu od miesta skratu



Obr. 3 Závislosť reaktancie od miesta skratu

3 Záver

Automatizácia všetkých nástrojov je nevyhnutnou súčasťou posunu vo výskume. Automatizáciou procesov, ako napríklad ručné vytváranie modelov, je možné dosiahnuť vyššej efektívnosti, presnosti, úspor na čase, máme možnosť škálovania modelov a získanie viacej dát z analýzy modelov.

Vyrobené programy sú navrhnuté ako prototypy automatizácie modifikácie modelov a slúžia ako overenie konceptu. Dáta získané z týchto programov sú absolútne validné, a je možné využiť na ručné zadanie parametrov pre ochrany. Samotné tieto ochrany je možné pomocou MODELS do modelov siete implementovať, modifikovať a otestovať správnosť ich funkčnosti.

V ATPDraw sa už niektoré typy ochrán nachádzajú, spolu s ich MODELS implementáciou. Preto ďalším krokom v automatizácii je vyrobiť program, ktorý by automaticky do základného modelu tieto ochrany pridával, nastavil a otestoval správnosť ich fungovania. Nasledovalo by testovanie vzájomnej spolupráce ochrán a práca ochrán pri poruchových stavoch samotných ochrán.

Program v budúcom štádiu by mohol slúžiť ako doplnok k štúdiu pre študentov odboru elektroenergetiky, pomôcť

študentom vizuálne interpretovať dáta a pomôcť pochopiť fungovanie a správne nastavenie ochrán.

Modely skratov uvažovali s bezimpedačným spojením fáz, tzv. dokonalom kovovom skrate. Pre ďalšiu analýzu by bolo vhodné uvažovať aj s nedokonalým spojením fáz alebo fázy so zemou, napríklad pomocou oblúku. Modely by bolo možné rozšíriť aj o simuláciu 2-fázového a 2-fázového zemného skratu.

Limitácia riešenia automatizácie v Pythone sa nachádza v navrhovaní ochrán v tomto jazyku. Táto ochrana musí byť byť navrhnutá priamo v MODELS, alebo by musel existovať interpreter medzi jazykmi Python a MODELS.

Pod'akovanie

Týmto ďakujem Ing. Jozefovi Bendíkovi, PhD. za odbornú pomoc pri vypracovávaní tohto príspevku.

Literatúra

- [1] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer et al, pandapower - an Open Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis and Optimization of Electric Power Systems, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 6, pp. 6510-6521, Nov. 2018.
- [2] KEZUNOVIC, M. – LUO, X. – ZHANG, N. – SONG, H. 2007. “Testing and Evaluating New Software Solutions for Automated Analysis of Protective Relay Operations“ In *International Conference on Power Systems Transients*
- [3] RAMIREZ, J.
https://www.youtube.com/watch?v=xFn64cUB_Xs
HACER UNA SIMULACIÓN DE EMTP/ATP CON PYTHON

Effects of the Change of Emissivity and Absorptivity Coefficients on the Allowable Current Carrying Capacity

Slávka Sečková, Jozef Bendík

Institute of Power and Applied Electrical Engineering
FEI STU in Bratislava

xseckova@stuba.sk

Abstract – The paper analyses the change of absorptivity and emissivity coefficients as a function of time and compares the effect of their change on the allowable current carrying capacity of the conductor. The results show that the highest current carry capacity is achieved when the emissivity is at its maximum of around 0.9 and the absorptivity is at its minimum of 0.2. The ampacity values reach higher values after 8 years of operation at the conductor temperature of 80 °C than the standard values when using coefficients of 0.5. Conductors that have been in service for several decades have higher ampacities than brand-new ones, according to the results.

Keywords - ACSR, degradation, emissivity, absorptivity, coefficients, current carrying capacity

1 Introduction

The most common degradation process of overhead power lines is material corrosion. Aluminium conductor steel reinforced (ACSR) contains aluminium and steel, which corrode when they react with the air because they create a bi-metal contact. The degradation process is significantly influenced by the environment and the meteorological conditions in the area where the conductor is located. Although aluminium contains a natural oxide film, in acidic and alkaline environments this film degrades, and corrosion occurs. Chloride ions in humid environments have a similar effect. [1]

The Cigre TB 905 Technical brochure [1] discusses the different types of corrosion that can occur on overhead power lines. This technical brochure provides the galvanic corrosion rate, which is generally high in the industrial environment compared to the rural environment, being higher in the marine industrial environment than in the humid industrial environment.

The degradation and ageing of the conductors affect the current carrying capacity (CCC). The determination of CCC is made by calculating the steady state heat balance Equation (1) described in Cigre TB 601 [2].

$$P_J + P_S + P_M + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (1)$$

Where is:

- P_J – Joule heating [W/m]

- P_S – solar heat [W/m]
- P_M – magnetic heating [W/m]
- P_i – corona heating [W/m]
- P_c – convective cooling [W/m]
- P_r – radiative cooling [W/m]
- P_w – evaporative cooling [W/m]

The steady state thermal rating neglect in the calculation corona heating, evaporative cooling, and magnetic heating, so the heat balance equation simplifies to:

$$P_J + P_S = P_c + P_r \quad (2)$$

Where Joule heating is defined as:

$$P_J = I_{max}^2 \cdot R_{AC-Tmax} \quad (3)$$

In Equation (3) I_{max}^2 represents the maximal CCC at the maximum safe operating temperature of the conductor T_{max} , which determines the AC resistance of the conductor $R_{AC-Tmax}$. By combining Equations (2) and (3) it is possible to obtain an equation for the calculation of the CCC I_{max} .

$$I_{max} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_S}{R_{AC-Tmax}}} \quad (4)$$

Solar heat gain P_S of the conductor depends on the value of the absorptivity α , solar radiation intensity I_T , and the outer diameter of the conductor D .

$$P_S = \alpha \cdot I_T \cdot D \quad (5)$$

Radiative cooling P_r is described by emissivity ε , the outer diameter of the conductor D , the temperature of the conductor T_{con} , and the temperature of the ambient air T_{amb} .

$$P_r = \pi \cdot \varepsilon \cdot D \cdot \sigma_B [(T_{con} + 273)^4 - (T_{amb} + 273)^4] \quad (6)$$

Determining the maximum CCC I_{max} can be done in two ways, using static line rating (SLR) or dynamic line rating (DLR). SLR calculation uses constant input data over the lifetime of the conductor. Meteorological conditions are also taken as constants. On the other hand, the DLR calculation

principle is more challenging, as it depends on real-time measurements at measurement stations. [3]

The degradation of conductors can be described by the coefficients of emissivity ε and absorptivity α . The change in these coefficients enables the increase in CCC. Both Cigre TB 601 [2] TB 207 [4], TB 299 [5], and IEEE 738-2012 [6] prove that their values change over the lifetime of the conductor from 0.2 up to about 0.9 and depend on the environment.

Standard constant values of emissivity and absorptivity are used in the SLR calculation. Although the recommended value of both coefficients for the assessment of SLR is 0.5 [4], different countries use different values, but commonly from 0.5 to 0.6. The exception is Belgium, which uses both coefficients equal to 1. In Slovakia, both values of 0.5 are used. [7]

2 Methodology

The paper analyses the change of absorptivity and emissivity coefficients as a function of time and compares the effect of their change on the CCC.

The main reference materials are IEEE [8], 738-2012 [6] and Cigre TB 209-2006 [5], TB 601-2014 [2], TB 207-2002 [4], TB 206-2020 [9]. Also, Chapter 47 in Electric Power Transmission [10] provides information about the change in CCC over time. These references give specific values of the coefficients and their variation with time or with the environment in which the conductor is located.

The selection of emissivity and absorptivity coefficients affects the allowable CCC of the conductor. However, it is important for the operation of the electrical power system to know and come as close as possible to the real value. Finding the exact value of these coefficients is difficult. The reference Cigre 601 [2] states that the emissivity coefficient is determined by measurement, but the absorptivity coefficient is more difficult to establish. References from IEEE and Cigre mentioned above, have confirmed that an absorptivity coefficient value of 0.1-0.2 higher than the emissivity coefficient should be considered, which indicates that they have a certain correlation with each other.

The main reference to determine the time variation of the coefficients over time for the calculation in this paper was the scientific paper [8] of the IEEE that discusses the change in emissivity over time due to the weathering of the conductors depending on the environment. The mean values of measured emissivity over time shown in it were considered in the subsequent investigation of the effect of degradation on the aluminium conductor steel reinforced cable 434-AL1/56-ST1A, which is today the most used ACSR conductor for EHV lines in the Slovak Republic.

Variables and constant variables were considered to find the influence on the CCC.

The following input variables were considered in the calculations:

- emissivity coefficient ε - the range of change from 0.23 to 0.92 as defined in *Figure 1* of the article [8] obtained from measurements
- absorptivity coefficient α - 0.1 higher than emissivity - according to both IEEE and Cigre

- conductor temperature T_{con} - the reference temperature is $T_{con} = 80$ °C according to the standard, then temperatures of 85 °C, 90 °C, 95 °C are also investigated

To investigate the static line rating, the following meteorological parameters were considered constant as specified in the standard EN 50341-2-23:2016 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV National Normative Aspects (NNA) for SLOVAKIA (based on EN 50341-1:2012) [11]:

- ambient temperature $T_{amb} = 35$ °C
- solar radiation intensity $I_S = 1000$ W/m²
- wind speed $v_w = 0.5$ m/s at the angle $\varphi = 45^\circ$

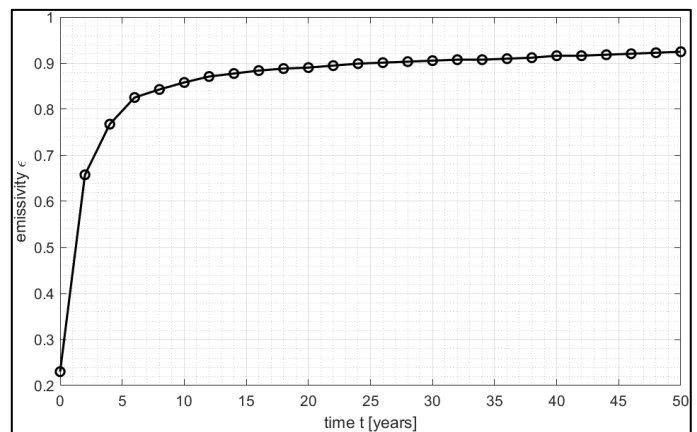


Figure 1: Mean emissivity values over the lifetime of conductors above 15 kV [8]

The mean values marked in *Figure 1* represent the values in the time interval of 2 years, from the brand-new conductor to being in service for 50 years.

3 Results

For the aluminium conductor steel reinforced cable 434-AL1/56-ST1A tables were created that give the CCC of the conductor for different values of the absorptivity and emissivity coefficients. Four different conductor temperatures were considered: 80 °C, 85 °C, 90 °C and 95 °C. It is important to note that the temperature to determine the static line rating is 80 °C according to the standard EN 50341-2-23:2016 [11].

From the heat maps in *Figure 2 -Figure 5* it is possible to obtain specific CCC values for the selected absorptivity and emissivity coefficients at the selected temperature. The standard calculated values of absorptivity and emissivity are highlighted in bold (0.5). These values are represented by the dashed curves in *Figure 6*.

emissivity coefficient ϵ		$T_{conductor} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$													
		absorptivity coefficient α													
		0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
0,20	749	738	727	715	704	692	680	668	656	643	631	617	604	590	577
0,25	761	750	739	728	717	706	694	682	670	658	645	633	620	606	593
0,30	773	763	752	741	730	719	708	696	684	672	660	647	635	622	608
0,35	786	775	765	754	743	732	721	709	698	686	674	662	649	637	624
0,40	798	787	777	766	756	745	734	723	711	700	688	676	664	651	639
0,45	809	799	789	779	768	757	747	736	724	713	702	690	678	666	654
0,50	821	811	801	791	780	770	759	748	737	726	715	703	692	680	668
0,55	832	823	813	803	792	782	772	761	750	739	728	717	705	694	682
0,60	844	834	824	814	804	794	784	773	763	752	741	730	719	707	696
0,65	855	845	836	826	816	806	796	785	775	764	754	743	732	720	709
0,70	866	856	847	837	827	818	808	797	787	777	766	755	745	734	722
0,75	877	867	858	848	839	829	819	809	799	789	778	768	757	746	735
0,80	888	878	869	860	850	841	831	821	811	801	790	780	770	759	748
0,85	898	889	880	870	861	852	842	832	822	812	802	792	782	771	761
0,90	909	900	890	881	872	863	853	844	834	824	814	804	794	783	773

emissivity coefficient ϵ		$T_{conductor} = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$													
		absorptivity coefficient α													
		0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
0,20	860	851	842	833	824	814	804	795	785	775	765	755	744	734	723
0,25	875	866	857	848	839	830	820	811	801	792	782	772	762	751	741
0,30	890	881	872	863	854	845	836	827	817	808	798	788	778	768	758
0,35	904	896	887	878	869	860	851	842	833	823	814	804	795	785	775
0,40	918	910	901	893	884	875	866	857	848	839	830	820	811	801	791
0,45	932	924	916	907	898	890	881	872	863	854	845	836	827	817	808
0,50	946	938	930	921	913	904	896	887	878	869	860	851	842	833	823
0,55	960	952	943	935	927	918	910	901	893	884	875	866	857	848	839
0,60	973	965	957	949	941	932	924	916	907	898	890	881	872	863	854
0,65	986	978	970	962	954	946	938	930	921	913	904	896	887	878	869
0,70	999	991	984	976	968	960	951	943	935	927	918	910	901	893	884
0,75	1012	1004	997	989	981	973	965	957	949	941	932	924	915	907	898
0,80	1025	1017	1009	1002	994	986	978	970	962	954	946	938	929	921	913
0,85	1037	1030	1022	1015	1007	999	991	983	976	968	960	951	943	935	927
0,90	1050	1042	1035	1027	1020	1012	1004	997	989	981	973	965	957	949	940

Figure 2: Effect of the selection of emissivity and absorptivity on CCC at the conductor temperature $T_{con} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$

emissivity coefficient ϵ		$T_{conductor} = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$													
		absorptivity coefficient α													
		0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
0,20	789	778	768	757	747	736	725	714	703	691	679	668	655	643	631
0,25	802	792	782	771	761	750	740	729	718	706	695	683	671	659	647
0,30	815	805	795	785	775	764	754	743	732	721	710	699	687	675	663
0,35	828	818	808	798	788	778	768	757	746	736	725	714	702	691	679
0,40	841	831	821	812	802	792	781	771	761	750	739	728	717	706	694
0,45	853	844	834	824	815	805	795	785	774	764	753	743	732	721	710
0,50	865	856	847	837	828	818	808	798	788	778	767	757	746	735	724
0,55	878	868	859	850	840	831	821	811	801	791	781	771	760	750	739
0,60	890	881	871	862	853	843	834	824	814	804	794	784	774	764	753
0,65	901	892	883	874	865	856	846	837	827	818	808	798	788	777	767
0,70	913	904	895	886	877	868	859	849	840	830	821	811	801	791	781
0,75	925	916	907	898	889	880	871	862	853	843	834	824	814	804	794
0,80	936	927	919	910	901	892	883	874	865	856	846	837	827	817	807
0,85	947	939	930	922	913	904	895	886	877	868	859	849	840	830	820
0,90	958	950	942	933	924	916	907	898	889	880	871	862	852	843	833

Figure 3: Effect of the selection of emissivity and absorptivity on CCC at the conductor temperature $T_{con} = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$

emissivity coefficient ϵ		$T_{conductor} = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$													
		absorptivity coefficient α													
		0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
0,20	826	816	806	797	787	776	766	756	745	735	724	713	702	691	679
0,25	840	830	821	811	801	791	781	771	761	751	740	729	718	707	696
0,30	854	844	835	825	816	806	796	786	776	766	756	745	735	724	713
0,35	867	858	849	840	830	821	811	801	791	781	771	761	750	740	729
0,40	881	872	863	853	844	835	825	816	806	796	786	776	766	755	745
0,45	894	885	876	867	858	849	839	830	820	811	801	791	781	771	761
0,50	907	898	889	881	872	862	853	844	835	825	815	806	796	786	776
0,55	920	911	903	894	885	876	867	858	849	839	830	820	811	801	791
0,60	933	924	915	907	898	889	880	871	862	853	844	834	825	815	806
0,65	945	937	928	920	911	902	894	885	876	867	858	848	839	830	820
0,70	957	949	941	932	924	915	907	898	889	880	871	862	853	844	834
0,75	970	961	953	945	936	928	920	911	902	893	885	876	867	857	848
0,80	982	974	965	957	949	941	932	924	915	906	898	889	880	871	862
0,85	994	986	978	969	961	953	945	936	928	919	911	902	893	884	875
0,90	1005	997	989	981	973	965	957	949	940	932	924	915	906	898	889

Figure 4: Effect of the selection of emissivity and absorptivity on CCC at the conductor temperature $T_{con} = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$

Figure 5: Effect of the selection of emissivity and absorptivity on CCC at the conductor temperature $T_{con} = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$

The heat maps show that the highest CCC is achieved when emissivity is at its maximum and absorptivity is at its minimum. At the same time, it was found that the higher the temperature of the conductor, the higher the CCC. An interesting fact is that the CCC reaches the lowest values when the emissivity is the lowest and the absorptivity is the highest. However, this extreme is difficult to achieve since, as mentioned in the previous sections, the coefficients seem to have a strong correlation with each other.

Subsequently, the emissivity coefficient was selected from the article [8] and the allowable CCC I_{max} was calculated considering an absorptivity 0.1 higher than emissivity up to a maximum value of 0.9. In *Figure 6* it is possible to notice the change in CCC over time. The reference value of the CCC for the specific conductor temperatures is also plotted. This reference value is calculated from the standard steady state constant values of emissivity and absorptivity, both equal to 0.5. The standard values of the absorptivity and emissivity coefficients are chosen to be in the middle with respect to the values achievable in reality.

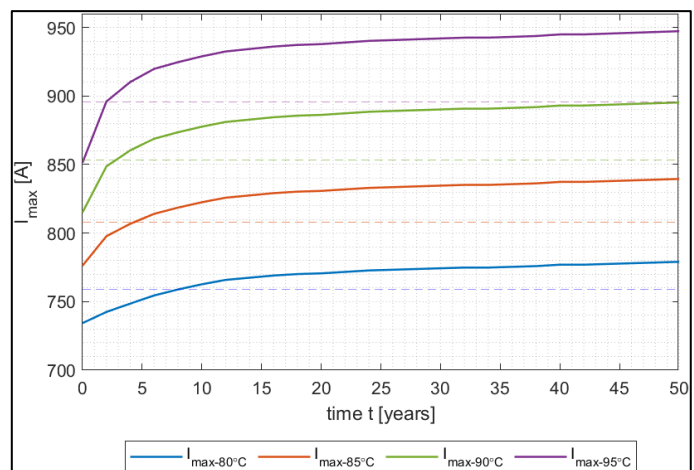


Figure 6: CCC changes over time considering different conductor temperatures

It can be seen in *Figure 6* that the CCC of the conductor increases over time. It is important to note that emissivity also increases with increasing time. From the results, it can be deduced that as the emissivity increases, the CCC of the

conductor increases. This means that new conductors have a lower CCC than those that have been in service for several years. At the standard temperature of 80 °C, the CCC of the new conductor is 734.3 A and after 50 years of operation it is 779 A. Table 1 shows the specific values of the emissivity and the calculated CCC I_{max} of the conductor in selected years of operation.

Table 1: Change in CCC of the conductor 434-AL1/56-ST1A in selected years of operation

Time [years]	ϵ [-]	$I_{max-80^{\circ}C}$ [A]	$I_{max-85^{\circ}C}$ [A]	$I_{max-90^{\circ}C}$ [A]	$I_{max-95^{\circ}C}$ [A]
0	0,23	734,32	776,24	815,09	851,35
2	0,66	742,48	797,70	848,58	895,94
4	0,77	748,55	806,76	860,34	910,17
6	0,83	754,49	814,01	868,79	919,73
8	0,84	758,87	818,55	873,50	924,63
10	0,86	762,65	822,48	877,58	928,86
20	0,89	770,62	830,75	886,17	937,78
30	0,91	774,31	834,58	890,15	941,92
40	0,92	776,94	837,31	892,98	944,86
50	0,92	779,03	839,48	895,24	947,20

The temperature of the conductor also has a significant effect on the CCC. The higher the temperature of the conductor, the higher the CCC. The difference in CCC with a brand-new conductor and after 50 years in operation at a standard conductor temperature of 80 °C is 44.85 A, at the conductor temperature of 95 °C it is 95.85 A. It means a double increase in the CCC difference over time at the conductor temperature of 95 °C compared to the conductor temperature of 80 °C.

After 8 years of operation, the CCC value reaches the standard reference value considering a conductor temperature of 80 °C. After 50 years of operation, the CCC increases by 2.62 % compared to the reference value, and at the conductor temperature of 95 °C it is an increase of 5.76 % from the reference value.

As the conductor temperature increases, the time it takes for the CCC to reach the reference value decreases. For a conductor temperature of 80 °C this is after 8 years of operation, for 85 °C after 4 years, for 90 °C after about 2 years, and for 95 °C after less than 2 years of operation. The higher the conductor temperature, the greater the difference between the real CCC value and the reference value.

4 Discussion

The calculation was carried out based on the values read from the graph constructed from the measurement by [8]. However, the specific measured values were not mentioned in the paper, so they were digitised and later subtracted. Therefore, small numerical errors may have occurred in the process of reading the emissivity value, but these should not have a significant effect on the results or their trend.

Studying the effect of emissivity and the correlation with the absorptivity coefficient, it was found that it is now possible to have new ACSR conductors coated with a special coating that will guarantee emissivity values of 0.9 and absorptivity values of 0.2, increasing the CCC of the conductor. [12]. The results in the heat maps confirm the fact that with this combination of values, the CCC reaches the highest values, which is favourable for power transmission, but this technology is not implemented in Slovakia.

5 Conclusion

Degradation and ageing of conductors have a visible effect on CCC. Weathering of conductors that describe the emissivity and absorptivity coefficients changes over time depending on the environment. These coefficients range from values of 0.2 to about 0.9 and have a strong correlation with each other. The absorptivity coefficient is higher than the emissivity by 0.1 to 0.2. It is recommended to consider both values of 0.5 when establishing a static line rating.

In this paper, for four different ACSR conductor temperatures, the CCC values for different combinations of emissivity and absorptivity coefficients are calculated and interpreted in the heat maps. The CCC reaches the highest values as long as the emissivity is the highest i.e. equal to 0.9 and the absorptivity is 0.2. This combination is possible if a coating of a brand-new conductor is used, which would guarantee these values since, it is not possible to achieve them. On the other hand, the CCC reaches its lowest values when the emissivity is 0.2 and the absorptivity is equal to 0.9. The mean values of CCC are reached at the standard recommended coefficient values of 0.5, but during the lifetime, the conductor reaches higher values of CCC. At the standard conductor temperature (80 °C) and constant emissivity and absorptivity of 0.5, the CCC of the 434-AL1/56-ST1A conductor reaches 759 A, but at the conductor temperature of 95 °C it is 896 A. The higher the conductor temperature, the higher the CCC at the same values of emissivity and absorptivity; however, every conductor has its thermal limit.

Subsequently, the CCC at 4 different temperatures of the ACSR 434-AL1/56-ST1A conductor was calculated from the emissivity values of the measurement over 50 years of lifetime. In the calculations, the value of absorptivity was 0.1 higher than the emissivity but just up to a value of 0.9. The results show that as the emissivity increases over time, the CCC also increases. An interesting finding is that conductors that have been in service for several decades have CCC higher than those of brand-new conductors, according to the results. A new conductor at a surface temperature of 80 °C reaches the CCC of 734 A, after 50 years of operation, 779 A.

The temperature of the conductor also has a significant effect on the CCC. The higher the temperature of the conductor, the higher the CCC. The higher the conductor temperature, the greater the difference between the real CCC value and the reference value.

In summary, the choice of the emissivity and absorptivity coefficients has a marked effect on the CCC. It shows that in reality it depends on the environment in which the conductor is located, as conductors weather and both coefficients increase over time. The coefficients values reach higher values after 8

years of operation at the conductor temperature of 80 °C than the standard values when using coefficients of 0.5. When a higher conductor temperature is considered, the deviation from the standard value is greater.

Acknowledgement

I would like to thank my supervisor, Dr. Bendík for introducing me to this research problem, for his advice, constructive feedback, and his passion for research.

References

- [1] ‘Sustainability of overhead line conductors and fittings – Conductor condition assessment and life extension Volume 1: State of the art’. Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/905-sustainability-of-overhead-line-conductors-and-fittings-conductor-condition-assessment-and-life-extension-volume-1-state-of-the-art.html>
- [2] ‘Guide for thermal rating calculations of overhead lines’. Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/601-guide-for-thermal-rating-calculations-of-overhead-lines.html>
- [3] J. Bendík, M. Cenký, and M. Binzár, *VONKAJŠIE ELEKTRICKÉ VEDENIA I - Mechanika a ampacita vodičov- Teória a príklady*, 2nd ed. Bratislava, SK: SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE, 2024.
- [4] ‘Thermal behaviour of overhead conductors’. Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/207-thermal-behaviour-of-overhead-conductors.html>
- [5] ‘Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings’. Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/299-guide-for-the-selection-of-weather-parameters-for-bare-overhead-conductor-ratings.html>
- [6] ‘IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors’, *IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 - Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013)*, pp. 1–72, Dec. 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858.
- [7] J. Bendík, M. Cenký, L. Rácz, and B. Németh, ‘Static line rating of overhead power lines in various European countries’, presented at the Electric Power Engineering (EPE) 2024, 2024.
- [8] W. S. Rigdon, H. E. House, R. J. Grosh, and W. B. Cottingham, ‘Emissivity of Weathered Conductors After Service in Rural and Industrial Environments’, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 81, no. 3, pp. 891–896, Apr. 1962, doi: 10.1109/AIEEPAS.1962.4501446.
- [9] ‘Investigation on the dynamic rating of tubular busbars in substations’. Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b3-206-2020-investigation-on-the-dynamic-rating-of-tubular-busbars-in-substations.html>
- [10] Ir. Z. F. bin Hussien, A. A. Rahim, and N. Abdullah, ‘47 - Electric Power Transmission’, in *Power Electronics Handbook (Third Edition)*, M. H. Rashid, Ed., Boston: Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 1357–1374. doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00047-1.
- [11] ‘EN 50341-2-23:2016 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV National Normative Aspects (NNA) for SLOVAKIA (based on EN 50341-1:2012)’. 2017.
- [12] G. Baker, C. Davis, and B. Temple, ‘Mitigating Overhead Conductor Temperature Risk with Engineered Surface Coatings’, in *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Apr. 2018, pp. 1–9. doi: 10.1109/TDC.2018.8440409.

Farbivom sensitizované solárne články

Tomáš Turňa¹, Ing. Milan Perný, PhD¹

¹ FEI STU/Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

xturnat@stuba.sk

Abstrakt – Tento príspevok predstavuje jednu z dlhodoboskúmaných fotovoltických technológií farbivom sensitizované solárne články (DSSC). Priblížime si základné poznatky, a to z čoho je článok zložený, princíp jeho fungovania. V ďalšej časti si preberieme meranie na DSSC článku a jeho základné parametre, ktoré boli vypočítané pri tomto meraní. Budeme porovnávať 2 sady vzoriek DSSC článkov, ktoré sa delia podľa použitého materiálu. Meraniami chceme poukázať na zmenu parametrov v čase, a tak isto porovnať 2 najlepšie vzorky z každej sady.

1 Úvod

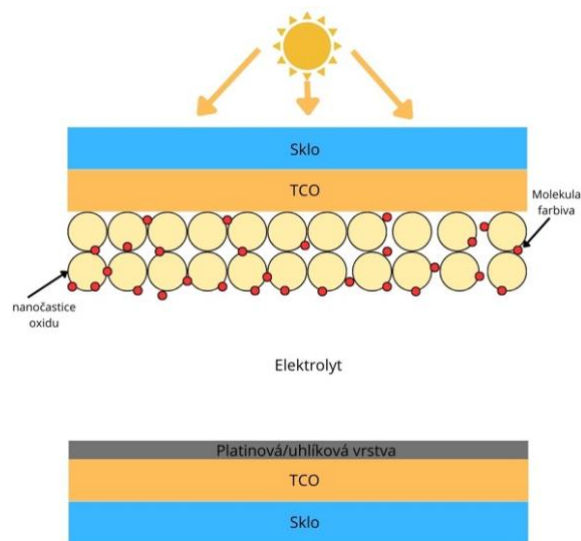
DSSC články patria do tzv. tretej generácie solárnych článkov, čo v stručnosti znamená, že využívajú k separácii náboja aj iné metódy ako P-N prechod a často aj iné materiály ako len polovodiče. Tieto fotovoltické články sa dajú prirovnať k umelej fotosyntéze vďaka spôsobu, akým napodobňujú absorpciu svetelnej energie v prírode [1].

Farbivom sensitizované solárne články (DSSC) boli objavené v roku 1991 profesorom Michaelom Grätzelom a Dr. Brianom O'Reganom na École Polytechnique Federale de Lausanne, vo Švajčiarsku. Týmto článkom sa často hovorí aj Grätzelove články (Gcell).

2 Základná štruktúra DSSC

DSSC sú organické články, ktoré pomocou umelých alebo prírodných farbív absorbujú fotóny zo svetelného žiarenia. Vďaka možnosti vyrobiť tenký, flexibilný a ľahký solárny článok vieme povedať, že je to ideálny kandidát na vnútorné aplikácie, ako napríklad pre napájanie mikroelektronických zariadení alebo prenosných zariadení vďaka ich schopnosti absorbovať aj difúzne svetlo (odrazené svetlo z okolia) [2].

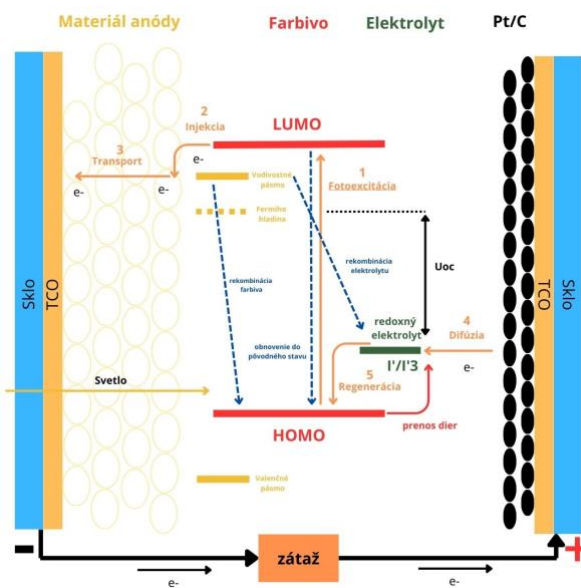
Medzi základne časti DSSC článku patria: fotoanóda, farbivo, redoxný elektrolyt a protielektroda (katóda). Fotoanóda pozostáva z polovodičovej vrstvy oxidu titaničitého (TiO_2). Na tejto vrstve je potom následne usadená vrstva transparentného vodivého oxidu (TCO), môže to byť buď flexibilný polymérový substrát, alebo kovová fólia. Polovodičová vrstva je sensitizovaná s monovrstvovým farbivom väčšinou to býva práve farbivo z Ruténia (Ru). Posledným komponentom je platinová elektróda. Väčšina komerčných DSSC článkov je n-type: elektróny sú zodpovedné za vytváranie vodivosti v materiáli.



Obr. 1. Štruktúra DSSC

2.1 Princíp fungovania DSSC

Princíp fungovania DSSC článku je znázornený na obrázku 2:



Obr. 2. Energetická schéma DSSC článku

Proces premeny slnečnej energie na elektrickú energiu začína pri fotoanóde. Pri dopade elektromagnetických vln zo slnečného žiarenia na povrch pracovnej elektródy (fotoanódy) sa dopadajúce kvantá energie absorbujú skrz elektródu a preniknú do vnútornej časti DSSC článku. V tejto vrstve sa nachádza vyššie spomenutá polovodičová vrstva (TiO_2). Molekuly farbiva sú viazané na vrstvu TiO_2 . Medzery medzi nimi vyplňuje elektrolyt. Fotón s dostatočnou energiou ktorý bol absorbovaný narazí do molekuly farbiva, ktorá sa dostane zo svojho základnému stavu (HOMO) do stavu excitovaného (LUMO). Excitované molekuly farbiva potom dokážu vypustiť elektrón z valenčnej vrstvy do vodivostnej vrstvy polovodičového materiálu (TiO_2). Uvoľnený elektrón sa dostane na zadnú časť TCO, kde vykoná prácu a prejde cez vonkajší obvod z anódy na katódu. Na regeneráciu farbiva potom slúži elektrolyt, ktorý pri pracovnej elektróde (katóde) naviaže na seba elektrón, s ktorým dokáže zregenerovať sensitizér. Existujú procesy, pri ktorých dochádza k znižovaniu účinnosti v DSSC článkov. Pri rekombinácii uvoľnených elektrónov s oxidovaným sensitizérom alebo s oxidovaným redoxným elektrolytom na povrchu TiO_2 .

3 Základné parametre fotovoltického článku

V nasledujúcej časti sa budeme zaoberať základnými parametrami fotovoltického článku:

I_{SC} – prúd nakrátko alebo tzv. skratový prúd je definovaný, ako prúd kedy nie je v obvode žiadna záťaž, teda celkový odpor je rovný 0Ω a napätie je tak isto rovné $0 V$ [3] (určíme z VACH).

U_0 – napätie naprázdno, je napätie pri odpojenej záťaži obvodu, obvodom netečie žiaden elektrický prúd, odpor je nekonečne veľký [3] (určíme z VACH).

Bod maximálneho výkonu P_{max} – ak je fotovoltický článok správne „naladený“ do tohto bodu vieme z neho získať maximálny výkonový výťažok (určíme z VACH).

FF – faktor plnenia hovorí o miere pravouhlosti charakteristiky. Ideálny zdroj disponuje pravouhlou charakteristikou kedy faktor plnenia je rovný 1. Čím je toto číslo menšie tým je zdroj tzv. „mäkší“.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC}U_0} \quad (1)$$

η – účinnosť fotovoltického článku sa v našom prípade určí ako podiel výkonu, ktorý FV článok generuje a výkonu ktorý dodávame do fotovoltického článku.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (2)$$

S – plocha meraných článkov $0,00025 m^2$

E – intenzita osvetlenia $[W/m^2]$

$$P_{IN} = S * E \quad (3)$$

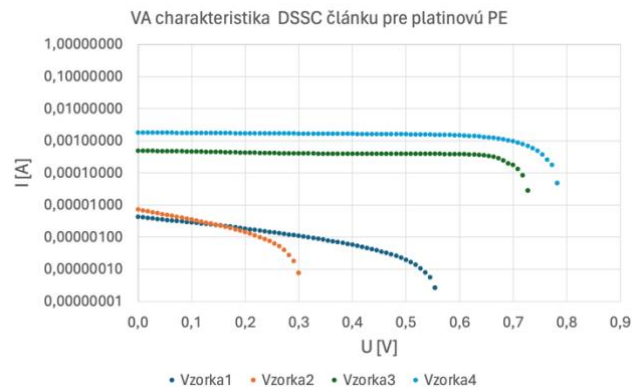
4 Meranie na DSSC článku

Meranie bolo uskutočnené na 8 vzorkách DSSC článkov. Na všetkých vzorkách bolo použité farbivo N719 zložené z ruténia. Jeho veľkou výhodou je vysoká efektívnosť premeny energie zo slnečného žiarenia, vysoká stabilita farbiva. Tak isto veľmi dobre spolupracuje s platínovou a uhlíkovou protielektródou, ktoré boli použité v tomto meraní. Články boli vyrobené pomocou metódy sieťotlač.

Pracovisko, v ktorom sme meranie vykonávali pozostávalo:

- Solárny simulátor Solartron
- 4 kvadrantový merací prístroj Keithley
- Napájací zdroj - Arc Lamp Power Supply, Universal, pre simulátor
- Počítač na vykreslenie priebehov
- Kalibračný článok

Prvé meranie sme uskutočnili pre platínové vzorky protielektródy ďalej len PE, kde sme predložili 4 vzorky na meranie. Pre ypsilonovú os bola použitá logaritmická mierka nakoľko hodnoty vzoriek 1 a 2 sú príliš malé oproti hodnotám vzoriek 3 a 4. Ako je možné vidieť z Obr. 3 pre vzorky 1 a 2 sme namerali nízky prúd nakrátko I_{SC} , čo sa nám prejavilo aj na účinnosti týchto vzoriek keďže tento článok generoval menej elektrónových párov. Intenzita osvetlenia nemala veľký vplyv na konečnú účinnosť keďže sa pohybovala v podobných číslach, a to od $690,3$ do $712 W/m^2$. Faktor plnenia FF nám pre vzorku 1 vyšiel $0,152$ a pre vzorku 2 $0,162$ čo hovorí o mäkkosti týchto FV zdrojov. Najlepšiu účinnosť z pomedzi platínových vzoriek dosiahla vzorka č.4, a to hodnotu $5,1 \%$.

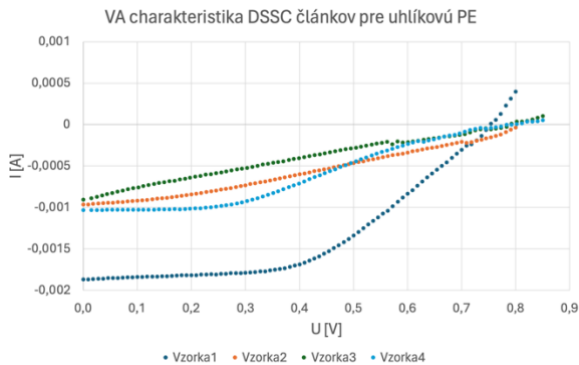


Obr. 3. VA charakteristika predložených vzoriek platínovej PE

Tab. 1. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie platínovej PE

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [μW]	FF [-]	E [W/m^2]	η [%]
vz.1	0,5631	0,00430	0,367	0,152	712	0,0020
vz.2	0,3066	0,00724	0,360	0,162	700	0,0020
vz.3	0,7301	0,488	234	0,658	695	1,35
vz.4	0,7867	1,805	880	0,620	690,3	5,10

Ďalšie meranie sme uskutočnili na 4 vzorkách obsahujúce uhlíkovú PE. Z Obr. 4 môžeme vidieť, že vzorky číslo 1, 2 a 4 majú VA charakteristiku mäkkého zdroja o čom hovoria aj ich hodnoty z Tab. 2 pre Faktor plnenia FF. Vzorka č.1 dosiahla najlepšíu účinnosť dosiahla vzorka číslo 1 a to 4,02 %.

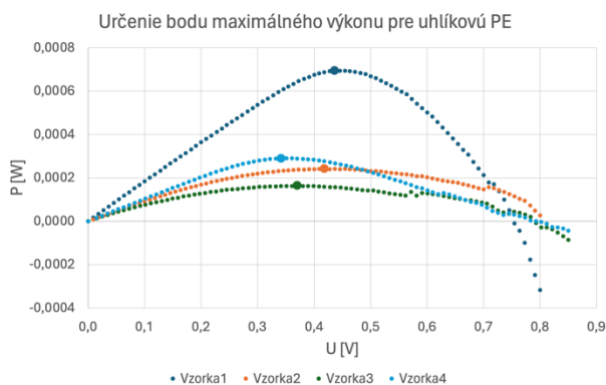


Obr. 4. VA charakteristika predložených vzoriek uhlíkovej PE

Tab. 2. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie uhlíkovej PE

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [mW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
vz.1	0,7547	1,87	0,695	0,493	692	4,02
vz.2	0,8436	0,97	0,242	0,296	692,8	1,39
vz.3	0,7893	0,91	0,165	0,230	696	0,95
vz.4	0,7929	1,03	0,290	0,354	691,3	1,68

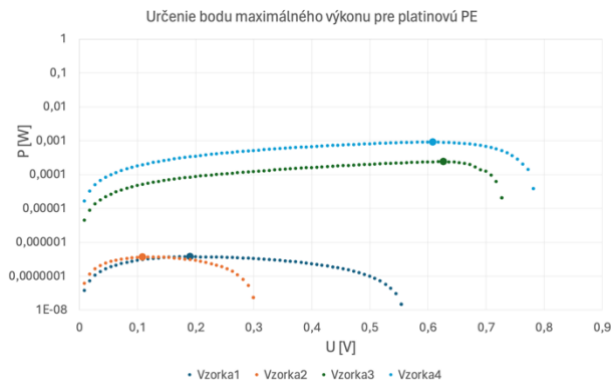
Určenie bodu maximálneho výkonu pre uhlíkovú PE:



Obr. 5. Určenie bodu maximálneho výkonu pre vzorky uhlíkovej PE

Z Obr. 5 vieme určiť bod maximálneho výkonu pre všetky 4 vzorky s uhlíkovou PE. V tomto bode nám bude FV článok generovať najvyšší výkon tzv. má najväčšiu účinnosť práve v tomto bode, v bode maxima.

Určenie bodu maximálneho výkonu pre platinové vzorky PE:

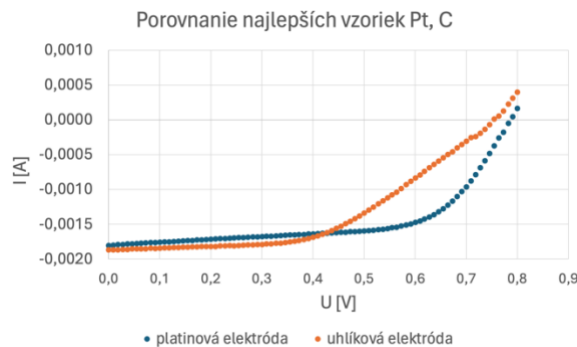


Obr. 6. Určenie bodu maximálneho výkonu pre vzorky platinovej PE

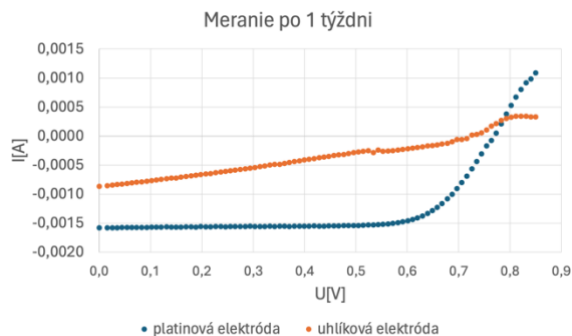
Pre graf z Obr. 6 sme museli opätovne použiť Logaritmickú mierku na ypsilonovú časť grafu kvôli lepšej interpretácii merania.

V nasledujúcom meraní sme porovnávali najlepšie vzorky z predchádzajúceho merania s tým, že sme porovnávali platinovú vzorku s uhlíkovou vzorkou. Platinová PE je lepšie kompatibilná s použitím elektrolytu oproti uhlíkovej PE, čo sa nám aj potvrdilo keďže účinnosť platinovej PE je 5,1 % oproti uhlíkovej PE 4,02 %.

Z Obr. 7 vidíme, že po jednom týždni od pôvodného merania uhlíková vzorka vplyvom starnutia zdegradovala. Porovnaním hodnôt z Tab. 3 a Tab. 4 vieme povedať, že vplyvom starnutia sa znížila hodnota I_{SC} u oboch vzoriek a tým pádom došlo k zníženiu účinnosti. Pri platinovej PE o 0,48 %. Pri uhlíkovej PE o 3,13 %. Vieme povedať, že životnosť platinovej PE je lepšia ako u uhlíkovej PE.



Obr. 7. Porovnanie najlepších vzoriek z platinovej a uhlíkovej sady



Obr. 8. Meranie uskutočnené po 1 týždni od pôvodného merania

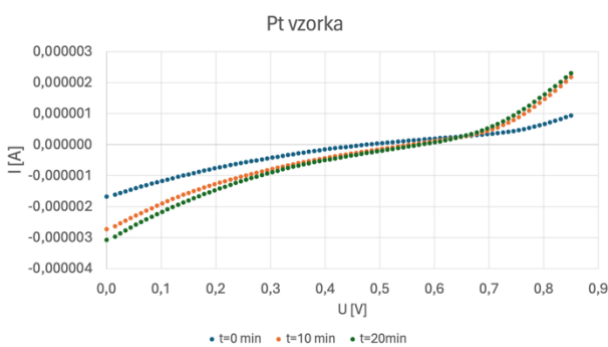
Tab. 3. hodnoty najlepších vzoriek Pt a C.

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [mW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
Pt PE	0,7866	1,81	0,88	0,619	690,3	5,10
C PE	0,7531	1,87	0,695	0,493	692	4,02

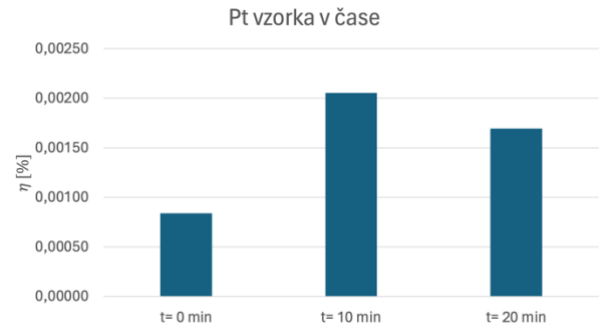
Tab. 4. Hodnoty najlepších vzoriek Pt a C po jednom týždni od ich pôvodného merania

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [mW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
Pt PE	0,7691	1,58	0,877	0,722	760,1	4,62
C PE	0,7253	0,86	0,169	0,271	752,2	0,9

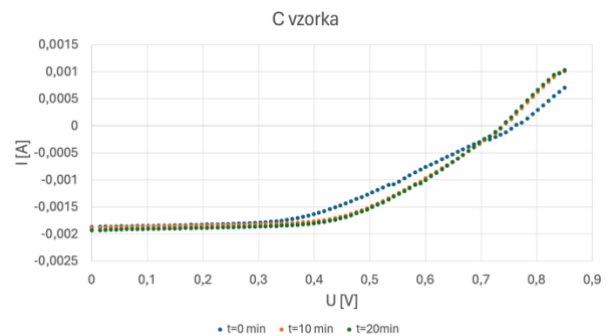
V poslednom meraní sme vybrali 2 náhodné vzorky. Jednu z platinej sady vzoriek a druhú z uhlíkovej sady vzoriek. Meranie sa vykonalo v troch intervaloch $t = 0, 10, 20$ minút, kedy sme po celý čas merania striedavo menili vzorky a merali ich VA charakteristiku. Vplyvom žiarenia počas tohto časového intervalu malo za následok zvyšovanie prúdu nakrátko I_{SC} tým pádom došlo aj k zvýšeniu účinnosti. Vďaka narastajúcej teplote okolia sa postupom času prúd nakrátko I_{SC} a účinnosť η mali znižovať.



Obr. 9. VA charakteristika merania v čase pre platínovú PE



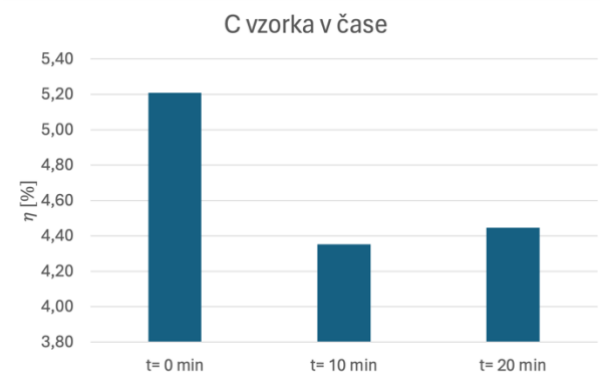
Obr. 10. Účinnosť v čase pre platínovú PE



Obr. 11. VA charakteristika merania v čase pre uhlíkovú PE
Časy: $t_1 = 0$ minút, $t_2 = 10$ minút, $t_3 = 20$ minút

Tab. 5. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie v čase platínová PE

	U_0 [V]	I_{SC} [μA]	P_{max} [μW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
t_1	0,4769	1,67	0,151	0,190	720	0,00084
t_2	0,5571	2,73	0,257	0,169	501,3	0,00205
t_3	0,5752	3,07	0,295	0,167	695,5	0,00169



Obr. 12. Účinnosť v čase pre uhlíkovú PE

Tab. 6. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie v čase pre uhlíkovú PE

	U_0 [V]	I_{SC} [A]	P_{max} [W]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
t1	0,7624	0,00187	0,000660	0,462	506,6	5,21
t2	0,7409	0,00189	0,000759	0,542	697,2	4,35
t3	0,7389	0,00193	0,000774	0,542	696,2	4,45

5 Záver

Predložené DSSC články sme merali v dvoch odlišných sériách rozdelených podľa použitého materiálu na protielektróde. Zistili sme, že po rozdelení vzoriek podľa účinnosti sa dve najlepšie vzorky, jedna z každej série podrobili procesu degradácie časom. Pri platínovej vzorke sme eliminovali možnosť veľkej degradácie v čase. Pri uhlíkovej vzorke sa proces degradácie prejavil výraznejšie.

Nerovnomerné hodnoty účinnosti medzi vzorkami sú pravdepodobne spôsobené nedokonalým procesom výroby zo strany poskytovateľa vzoriek.

Pod'akovanie

Patrí môjmu školiteľovi Ing. Milanovi Pernému, PhD za trpezlivosť a pevné nervy. Ďalej by som chcel poďakovať páňovi Ing. Pavlovi Gemeinerovi, PhD a pani Ing. Tatiane Buchlovej z fakulty chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave za dodanie vzoriek DSSC článkov na meranie.

Tento článok bol podporovaný Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0049 a Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt Medzinárodné centrum excelentnosti pre výskum inteligentných a bezpečných informačno-komunikačných technológií a systémov – II. etapa, kód ITMS: 313021W404, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] D. MEDVEĎ. *Farbivom senzitivované slnečné články (DSSC) | ELEKTROENERGETIKA*, dostupné na: <https://jeen.fei.tuke.sk/index.php/jeen/article/view/336>
- [2] M. DHONDE, K. SAHU, M. DAS, A. YADAV, P. GHOSH, a V. V. S. MURTY. *Review—Recent Advancements in Dye-Sensitized Solar Cells; From Photoelectrode to Counter Electrode*, *J. Electrochem. Soc.*, roč. 169, č. 6, s. 066507
- [3] DZÚR. *Sledovanie parametrov fotovoltaických článkov*. Bakalárska práca, 2022.
- [4] C. A. REYNAUD, R. CLERC, P. B. LECHÊNE, M. HÉBERT, A. CAZIER, a A. C. ARIAS. *Evaluation of indoor photovoltaic power production under directional and diffuse lighting conditions*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 200, s. 110010, sep. 2019.

Sekcia 4

Elektronika a fotonika, Elektrotechnika

Hybridný napájací systém nanosatelitu s využitím batérie a superkapacitora

Bc. Jakub Gavenda¹, Bc. Lukáš Gardian², Bc. Martin Brázda², Ing. Matej Novák²

Ústav Elektroniky a Fotoniky, Slovenská Technická Univerzita
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská Republika

jakub.gavenda.218@gmail.com

Abstrakt - Článok sa zaoberá metodikou pre vývoj hybridného napájacieho systému pre Nanosatelity s využitím batérie a superkapacitora ako zdroja energie. Nanosatelit je satelit, ktorého hmotnosť je medzi 1kg až 10 kg. Budeme sa zaoberať popisáním možných využiteľných komerčných batérií a superkapacitorov. Teoretickým návrhom napájacieho systému pričom spomenieme rôzne konštrukcie systému, jeho výhody a jeho nevýhody. Budeme sa zaoberať nanosatelitom typu „CubeSat“ nakoľko sa jedná o štandardizovaný a používaný typ nanosatelitu. „CubeSat“ je kocka, ktorej rozmery sú 10cm a hmotnosť neprekračuje 1,33kg. Jedná sa o štandard vyvinutý v roku 1999 a jej špecifikácie sú voľne prístupné pre každého, kto chce vypustiť takýto satelit. Článok môže slúžiť ako teoretické obohatenie pre konštruktéra vyvíjajúci hybridný napájací systém.

1 Úvod

Medzi najpoužívanejšie typy nanosatelitov patrí „CubeSat“. Jedná sa o malé, lacné satelity, zvyčajne vypustené na obežnú dráhu blízko zeme, štandardné veľkosti CubeSat sú dostupné v rozmeroch 10cm x 10cm x 10cm, ktoré sú reprezentované ako jednotka „U“ (Unit). Jednotky „U“ môžeme na seba napájať pre potreby experimentu realizovaného „CubeSatom“. Príkladom môže byť kocka „3U“ ktorej rozmery sú 30cm x 10 cm x 10 cm. Hmotnosť „CubeSatu“ nesmie prekročiť 1,33 kg. Jedná sa o používaný štandard, vďaka ktorému sa cena vynesenia na obežnú dráhu znižuje. Do decembra 2023 ich bolo vynesene viac ako 2300 na obežnú dráhu [1].

Pre „CubeSat“ sa používa ako napájací systém solárne články, ktoré dobíjajú lítium-iónovú batériu. Využité aj batérie, aj superkapacitorov nie je až tak bežné, avšak má mnohé výhody. Medzi najpoužívanejšie batérie sa radia lítium-iónové batérie, ktoré sa vyznačujú vysokou špecifickou energiou od 200Wh/kg do 250 Wh/kg, zatiaľ čo superkapacitory môžu poskytovať vysoký špecifický výkon viac ako 10kWh/kg s oveľa nižšou pracovnou teplotou. Môže ponúknuť aj ďalšie výhody, najmä s ohľadom na vysokú prúdovú schopnosť pri nižších teplotách spolu s dlhšou životnosťou cyklu. To je spôsobené zmiernením degradačných mechanizmov. Batéria cyklovaná pri nízkej teplote je viac náchylná k degradácii. Správne nakonfigurovaný napájací systém môže zabrániť predimenzovaniu konvenčnej lítium-iónovej batérie. Spojenie týchto dvoch častí do napájacieho

systému ponúka výhody z každej technológie. Takýto hybridný napájací systém bol úspešne demonštrovaný v rámci elektro mobility a vojenských aplikáciách [1].

Tab. 1. [2]

Vlastnosť	Li-ión batéria	Superkapacitor
Energia (W*kg ⁻¹)	100-265	4-10
Energia (W*m ⁻¹)	220-400	4-14
Výkonová hustota (W*kg ⁻¹)	1 500	3 000-40 000
Napätie článku (V)	3,6	2,7-3
Účinnosť (%)	75-90	98
Cyklovateľnosť (-)	500-1 000	500k.-20mil.
Životnosť (rok)	5-10	10-15
Samovybijanie (mes.)	2	40-50
Teplota nabíjania (°C)	Od 0 do 45	Od -40 do +65
Teplota vybíjania (°C)	Od -20 do +60	Od -40 do +65
Možnosť podbitia	Áno	Nie
Preťažiteľnosť	Áno	Nie
Riziko výbuchu	Áno	Nie

Superkapacitory uchovávajú energiu na princípe fyzikálneho procesu. Superkapacitory obsahujú dve elektródy ponorené do elektrolytu oddelené membránou priepustnou pre ióny. Pri privedení napätia sa ióny v elektrolyte hromadia na povrchu elektród a vytvárajú elektrostatické pole, ktoré ukladá energiu. Tento mechanizmus umožňuje rýchle nabíjanie a vybíjanie, keďže nezahŕňa pomalé chemické reakcie. Preto sú superkapacitory vhodné pre dodanie alebo prijatie veľkého množstva energie za pomerne malý čas, využiteľné napríklad pri rekuperačných systémoch [3].

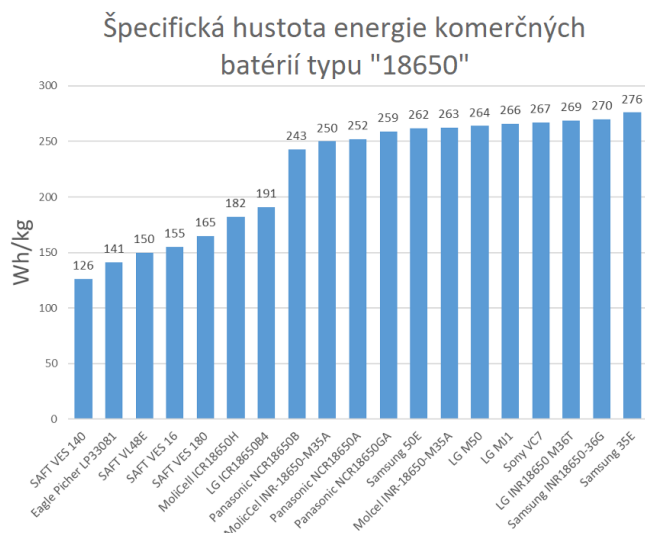
Lítium-iónové batérie na druhej strane fungujú na chemickom princípe. Pozostávajú z anódy, často vyrobenej z grafitu a katódy zvyčajne z oxidu lítneho a elektrolytu. Elektrolyt umožňuje lítiovým iónom pohybovať sa medzi elektródami. Počas vybíjania prechádzajú lítiové ióny cez elektrolyt z anódy na katódu, zatiaľ čo elektróny, prúdiace cez

vonkajší obvod poskytujú elektrickú energiu. Opak nastáva počas nabíjania. Lítium-iónové batérie sú používané pre svoju vysokú hustotu energie a schopnosť uchovávať v relatívne malom a ľahkom obale. Preto sú vhodné pre aplikáciu, kde je rozhodujúca trvalá dodávka energie [3].

2 Batérie v nanosatelitoch

Počas prevádzky nanosatellitu nie je vždy k dispozícii slnečná energia. Batérie sa preto využívajú na skladovanie energie a sú klasifikované podľa ich rozdielnej elektrochémie. Nenabíjateľné batérie sa využívajú zvyčajne na krátke trvanie misií. Typicky sa používa striebro-zinok, pretože sa s nimi ľahšie manipuluje a vybijajú sa vyššou rýchlosťou, existujú však aj rôzne primárne batérie na báze lítia, ktoré majú vyššiu energetickú hustotu, vrátane lítia oxidu siričitého (LiSO₂), lítium-uhľoňatého fluoridu (LiCF_x) a tionylchloridu lítneho (LiSOCl₂) [3].

Nabíjateľné batérie zahŕňajú nikel-kadmiové (NiCd), nikel-vodíkové (NiH₂), lítium-polymérové (LiPo) a lítium-iónové (Li-ion), ktoré sa v minulosti vo veľkej miere používali na malých kozmických lodiach. Nabíjateľné batérie na báze lítia sa bežne používajú v prenosných elektronických zariadeniach z dôvodu ich nabíjateľnosti, nízkej hmotnosti a vysokej energie a stali sa všadeprítomnými na misiách kozmických lodí. Vo všeobecnosti sú pripojené k primárnemu zdroju energie (napr. solárny panel) a môžu poskytovať dobíjacie napájanie na požiadanie. Každý typ batérie je spojený s určitými aplikáciami, ktoré závisia od parametrov výkonu, vrátane hustoty energie, životnosti cyklu a spoľahlivosti. Obrázok číslo 1 zobrazuje niektoré populárne lítium-iónové články veľkosti 18650 a ich špecifické hustoty energie. Zatiaľ čo staré typy článkov mali špecifickú energiu menej 200 Wh/kg, najnovšie typy prekročili 240 Wh/kg.



Obr. 1 : Špecifická hustota batérií [2].

V článku [4] "LITHIUM ION BATTERY PERFORMANCE IN LOW EARTH ORBIT SATELLITE APPLICATIONS" môžeme vidieť porovnanie hlavných typov batérií podľa ich vnútornej chémie katódy a to NMC (LiNiMnCoO₂), NCA (LiNiCoAlO₂) a LFP (LiFePO₄).

V článku autor vyberal najvhodnejší typ chémie katódy v rámci používaných komerčných batérií pre napájanie satelitu pričom simuloval teplotné a tlakové podmienky na nízkom orbite zemského povrchu po dobu jedného roka. Cykly batérií boli realizované v laboratóriu pri atmosférickom tlaku (101 kPa) a regulovanej teplote 20°C, taktiež v klimatickej komore pri teplote 10°C a atmosférickom tlaku (101kPa) a pri tlaku podobnom vákuu (0,2 kPa) a zároveň v klimatickej komore pri teplote 10°C. záver z tohto výskumu jasne poukázal na výhody batérie s chémiou katódy LFP. Jej operačné okno pre SoE „State of Energy a SoC „State of Charge“ je oveľa väčšie. Taktiež jej rýchlosť degradácie je oveľa nižšia ako pri NMC a NCA a prevyšuje ich tak životnosťou a energetickou účinnosťou. Autor jednoznačne odporúča využitie chémie katódy LFP v budúcich vývoch satelitov pre nízky orbit a experimentálny výskum [4].

Batéria s chémiou NCA sa vyznačovala ako priveľmi závislá od teploty prostredia pri vybíjaní. Pri nižších teplotách vykazovala zväčšenú mieru degradácie a veľký nárast SEI vrstvy v porovnaní s LFP [4]. Batéria s chémiou NCM vykazovala nevýhody vo všetkých, v článku uvedených experimentoch.

Článok však ako napájací systém uvažoval iba solárny článok a batériu pre uskladnenie energie. V hybridom systéme s využitím superkapacitára môžu byť dosiahnuteľné iné výsledky, nakoľko v rámci izbovej teploty 20°C má batéria typu NCA výhody pred batériou LFP ako napríklad vyššiu nominálnu kapacitu vzhľadom na veľkosť článku alebo váhu článku, taktiež širšie využiteľné spektrum SoC [5].

3 Superkapacity a ich aplikácia

Použitie superkapacitorov v zariadeniach pre vesmír prináša stále viac a viac možností novým projektom. V tejto časti si preto pre bližšie porozumenie predstavíme ich základné vlastnosti, typ a použitie.

Superkapacity sa ukazujú veľmi perspektívne v aplikáciách, kde je potrebné krátkodobom napájaní s vysokým výkonom. Superkapacitor je vo všeobecnosti výhodný z rôznych hľadísk. Jeho schopnosť ako média na uskladnenie energie zachovať si kapacitu a vnútorný odpor v priebehu času mu dáva vysokú toleranciu pre viacnásobné cykly nabíjania/vybíjania [6]. Nemá pamäťový efekt, čím umožňuje flexibilný rozsah prevádzkového napätia a nevyžaduje proces obnovy. Vysoká hustota výkonu vďaka nízkemu vnútornému sériovému odporu a bez účasti chemických reakcií pri ukladaní energie [6]. Superkapacity majú schopnosť fungovať pri extrémnych teplotách, čo je výhodné pre vesmírne aplikácie, kde teploty môžu dosahovať extrémne hodnoty. Okrem toho majú superkapacity vysokú účinnosť pri prenose energie, čo znamená, že sú schopné rýchlo akumulovať a uvoľňovať energiu bez významných strát [7]. Najväčšími nevýhodami superkapacitorov je však ich vyššia samovybíjacia rýchlosť a nižšia energetická hustota v porovnaní s batériami vid' Tab. 1.

Existujú dva základné typy superkapacitorov: elektrochemické superkapacity (EC) a elektrostatické superkapacity (ES). EC superkapacity využívajú elektrochemické reakcie na ukladaní energie, zatiaľ čo ES superkapacity využívajú elektrostatické sily [7].

V článku Marín-Coca a kol. predstavujú viaceré aplikácie superkapacitorov pre nano satelity ako aj ich správny výber v závislosti od požiadaviek [7]. V projekte univerzity Santa Clara Benjamin Lynch a Callie Wallace využili superkapacity na účel napájanie majáka „Stenstat“ počas prechodu satelitu do zóny zatmenia [8].

4 Súhrn návrhových pravidiel pre úložiská energie

V návrhových pravidlách pre použitie batérií, superkapacity a hybridných systémov vo vesmírnych satelitoch platia nasledovné smernice:

Batérie a superkapacity musia mať špecifické energetické a výkonnostné vlastnosti vhodné pre požiadavky misie [9]. Energetické skladovacie systémy musia byť schopné fungovať v špecifikovanom teplotnom rozsahu v prostredí satelitu. Superkapacity poskytujú výhodu nižších prevádzkových teplôt oproti batériám. Taktiež sa uvádza, že hybridné systémy kombinujúce batérie a superkapacity ponúkajú výhody oboch technológií. [9]. Batérie, superkapacity a hybridné systémy musia podstúpiť environmentálne testovanie, vrátane testovania v termovákue a náhodných vibrácií, aby sa zabezpečila ich spoľahlivosť a výkon v priestorových podmienkach [9]. Dôležité je navrhovať systémy distribúcie energie s efektívnym riadením, aby sa zabezpečila správna dodávka energie do podsystemov satelitu [9]. Návrh energetických skladovacích systémov by mal zahŕňať bezpečnostné opatrenia na zabránenie prebitia, termálneho úniku a ďalších potenciálnych nebezpečenstiev [9]. Batérie, superkapacity a hybridné systémy musia byť kompatibilné s celkovými systémami a rozhraniami satelitov [9]. Systémy skladovania energie by mali byť navrhnuté tak, aby spĺňali obmedzenia hmotnosti a veľkosti satelitu, pričom sa zohľadňuje obmedzený dostupný priestor [9].

Pri návrhu elektrického napájacieho systému (EPS) je dôležité zohľadniť potreby misie. Na obrázku číslo 2 je zobrazený rozhodovací strom pre konfigurácie napájacieho systému pre rôzne charakteristiky misií malých satelitov.



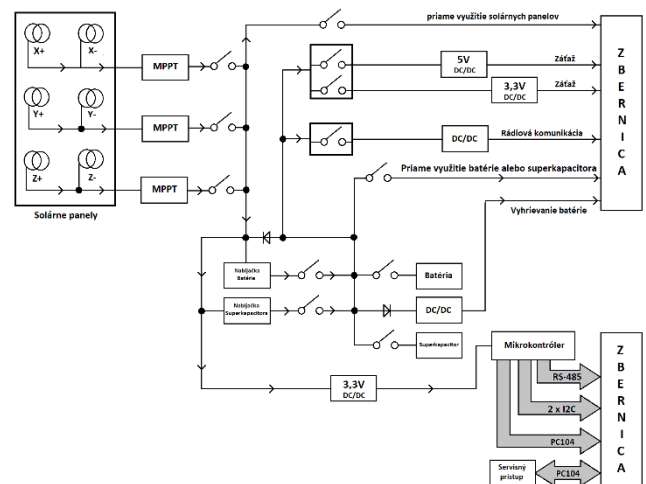
Obr. 2 : Rozhodovací strom pre návrh napájacieho systému

5 Hybridný napájací systém

V rámci nanosatelitov sa napájací systém označuje pod skratkou „EPS“, teda „Electronic Power System“. EPS je podsystem celého satelitu, ktorý riadi zber a distribúciu energie v satelite pomocou integrovaného systému správy úložiska energie. Všetky ostatné podsystemy a napájanie je riadené cez EPS pričom všetky výstupné kanály je možné zapínať alebo vypínať autonómne alebo pozemným príkazom. EPS taktiež ukladá vygenerovanú energiu do zabudovaného úložiska energie, najčastejšie samotné lítium iónové batérie [10].

Hybridné napájacie systémy využívajúce lítium-iónovú batériu a superkapacitor nie sú zvyčajné. Napriek tomu existuje pár príkladov prístupov ako by takéto hybridné zapojenie malo fungovať. V rámci článku „Flight Demonstration of a Hybrid Battery/Supercapacitor Energy Storage System in an Earth Orbiting CubeSat“ [1] vidíme využitie superkapacitora ako sekundárne úložiska energie ktoré sa využíva na ustálenie teploty batérie pre vyhovujúcu hodnotu [1]. Článok [4] svojim výskumom potvrdil, že využiť superkapacitor pre vyrovnanie teploty batérie je vhodné riešenie hybridného systému. Ďalšie vlastnosti superkapacitorov voči batérii ukazujú možné ďalšie využitia superkapacitora. Superkapacitor môžeme využiť ako dočasný primárny zdroj energie z dôvodu zväčšenia relaxačných časov batérie, ktoré sú dôležité pre ustálenie vnútornej chémie batérie a zároveň zvyšujú životnosť batérie [11][12]. Pre tento prípad by však satelitné systémy by museli byť na určitý čas napájaný aj superkapacitorom aj batériou. Čo môže spôsobiť nežiaduce javy na batérii a taktiež samotnom superkapacitore. Superkapacitor môže taktiež napájať niektoré systémy alebo experimenty v rámci satelitu, ktoré nie je možné vykonať lítiovou batériou.

Na obrázku číslo 3 vidíme príklad vyhotovenia blokovej schémy pre hybridný napájací systém nanosatelitu. Jedná sa o komplexnú blokovú schému EPS.



Obr. 3 : Blokova schéma hybridného napájacieho systému

Ako zdroj energie slúžia solárne panely. Sú zapojené v pároch na opačnej strane satelitu. Táto konfigurácia maximalizuje účinnosť získania slnečnej energie. Solárne svetlo svieti vždy len na tri strany satelitu naraz. To znamená

že vždy funguje jeden solárny panel z každého paralelného obvodu. Solárne panely napájajú hlavne batériu a superkapacitor ako hlavné úložiská energie. V prípade poruchy úložiska energie môžu napájať celé EPS [13].

MPPT „Maximum power point tracking“ je obvod, ktorý maximalizuje účinnosť premeny energie zo solárnych panelov. MPPT riadi prúd a napätie pre čo najväčší možný výkon. Tento typ regulátora sa bežne používa v solárnom priemysle [14].

Úložisko energie je v našom prípade hybridného systému batéria a superkapacitor. Podľa vyššie spomenutého článku je vhodné použiť batériu s vnútornou chémiou typu LFP. Pre zvýšenie životnosti je vhodné použiť taktiež nízky rozsah kapacity batérie a to približne od 40% SoC do 60% SoC. Taktiež pre rovnaký účel je vhodné použiť malé vybíjacie a nabíjacie prúdy [15]. Superkapacitor v blokovej schéme slúži na vyhrievanie batérie ale taktiež môže slúžiť ako hlavný zdroj napájania ESP. Jedná sa však o neoverené zapojenie superkapacitora, takže použitie nasledovnej blokovej schémy si vyžaduje ďalší výskum.

Všetky satelitné systémy sú napájané zo zbernice. Zbernica je výstupom EPS. Na privedenie energie do zbernice, ak to nie je vyslovene popísané sa využívajú DC/DC meniče na zmenu a stabilizáciu napätia z batérií. Príkladom v schéme je využívané napájacie napätie 5V a 3,3V, Niektoré kritické systémy, ako je napríklad komunikačné rádio, maj svoj vlastný DC/DC menič pre zabezpečenie robustnejšieho redundantného systému. Ak je to možné, sú vhodné zdvojené systémy DC/DC konvertorov, ktoré slúžia ako záloha v prípade poruchy.

Mikrokontroler spravuje spínače ktoré si môžeme všimnúť v blokovej schéme. Spínače sú umiestnené v blokovej schéme v prípade potreby tvrdého resetu. V schéme sú reprezentované v stave NC, teda „Normal Close“, čo znamená, že sú v normálovom stave zatvorené a obvodom tečie elektrický prúd. V prípade poruchy mikrokontrolera bude tým pádom systém stále fungovať. Mikrokontroler je vhodné mať zdvojený, kvôli prípadnej poruche jedného z nich.

Servisný prístup slúži ako nabíjací a zároveň programovací prístup. Pokiaľ satelit nie je vypustený na obežnú dráhu je riadený a nabíjaný pomocou práve servisného prístupu [15].

V blokovej schéme sa taktiež nachádzajú dve diódy. Slúžia ako dodatočné zvýraznenie pre smer prúdu pri daných systémoch. Smer prúdu je vo všeobecnosti ošetrený elektronickými systémami, ktoré sú však nad rámec blokovej schémy.

6 Záver

Článok popisuje možnosti konštrukcie hybridného napájacieho systému nanosatelitu pričom ako úložisko energie sú odprezentované možnosti použitia batérie a superkapacitora. Úvodom opisujeme samotný nanosatelit, čo nám dáva krátku predstavu o možnostiach pre napájací systém. Následne sú opísané batérie a ich doterajšie využitie v rámci nanosatelitov pričom výskumy a reálne lety nanosatelitov poukazujú na výhody lítium-iónovej batérie s vnútornou chémiou LFP. Následne sú opísané vlastnosti superkapacitorov. Odprezentované základné typy superkapacitorov a predstavené príklady využitia superkapacitorov v hybridných napájaciach

systémoch nanosatelitov. Po opísaní návrhových pravidiel bola ako príklad bola vytvorená blokovaná schéma pre hybridný napájací systém nanosatelitu kde sú zdrojom energie solárne panely a ako úložisko energie je batéria a superkapacitor. V danej kapitole je rozpisané možnosti hybridného systému a taktiež príkladná blokovaná schéma.

Pod'akovanie

Ďakujeme nášmu vedúcemu práce Docentovi Miroslavovi Mikoláškovi za pomoc pri vytvorení tejto práce. Táto práca bola riešená v rámci projektov APVV-22-0132, APVV-21-0231, VEGA 1/0707/24 a projektu BATSYS.

Literatúra

- [1] CHIN, Keith B., et al. Flight demonstration of a hybrid battery/supercapacitor energy storage system in an earth orbiting CubeSat. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2021.
- [2] Dostupné na internete: <<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/#3.4>>.
- [3] Dostupné na internete: <<https://eepower.com/tech-insights/supercapacitor-lithium-ion-combo-improves-energy-storage/#>>.
- [4] COOK, Riley. Lithium Ion Battery Performance in Low Earth Orbit Satellite Applications. 2020.
- [5] GOLUBKOV, Andrey W., et al. Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes—impact of state of charge and overcharge. *Rsc Advances*, 2015.
- [6] SHIMIZU, Tatsuo a Craig UNDERWOOD, 2013. Supercapacitor energy storage for micro-satellites: Feasibility and potential mission applications. *Acta Astronautica* [online]. 2013, roč. 85, s. 138–154. ISSN 0094-5765. Dostupné na: doi:10.1016/j.actaastro.2012.12.005
- [7] MARIN-COCA, S., E. ROIBÁS-MILLÁN a S. PINDADO, 2023. Analytical modelling and sizing of supercapacitors for spacecraft hybrid energy storage systems. *Acta Astronautica* [online]. 2023, roč. 211, s. 382–392. ISSN 0094-5765. Dostupné na: doi:10.1016/j.actaastro.2023.06.041
- [8] LYNCH, Benjamin a Callie WALLACE, 2014. CubeSat electronic power system. *Electrical and Computer Engineering Senior Theses* [online]. 2014. Dostupné na: https://scholarcommons.scu.edu/elec_senior/3
- [9] CHIN, Keith B., et al. Flight demonstration of a hybrid battery/supercapacitor energy storage system in an earth orbiting CubeSat. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2021, 36.5: 24-36.
- [10] Dostupné na internete: <<https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-electrical-power-system-eps/>>
- [11] RASHID, Muhammad; GUPTA, Amit. Effect of Resting Periods over Cycling Performance of a Li-Ion Battery. In: *Electrochemical Society Meeting Abstracts imlb2014*. The Electrochemical Society, Inc., 2014.
- [12] RAMOS, Nuno Laranjeira. *Satellite electrical power system*. 2018. PhD Thesis. MS thesis, Lisbon Univ., Lisbon, Portugal.

- [13] PENG, Li, et al. Design and validation of modular MPPT electric power system for multi-U CubeSat. In: *2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*. IEEE, 2017.
- [14] KNAP, Vaclav; VESTERGAARD, Lars Kjeldgaard; STROE, Daniel-Ioan. A review of battery technology in CubeSats and small satellite solutions. *Energies*, 2020.
- [15] GRILLMAYER, Lukas; ARNOLD, Saskia. Integrating the Cubesat Space Protocol into GSOC's Multi-Mission Environment. 2020.

Bezdrôtový open-source systém pre diaľkové ovládanie pojzdových motorov garážovej a vjazdovej brány

Bc. Lukáš Gardian¹, Bc. Jakub Gavenda¹, doc. Ing. Miroslav Mikolášek, PhD¹

¹Ústav Elektroniky a Fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská Technická Univerzita
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská Republika

gardianlukas@gmail.com

Abstrakt – IoT a open-source sú už veľmi dobre etablované riešenia, čo sa týka ovládania zariadení a zabezpečenia nielen v domácnostiach. Tieto technológie sú už ľuďom prístupné a známe, preto sa do ich vývoja a hľadania nových oblastí použitia investuje veľa času a prostriedkov. Jednou z výnikajúcich oblastí využitia IoT je ovládanie pojzdov pre otváranie a zatváranie vjazdových a garážových brán. Na trhu v tejto dobe existuje nespočet riešení od rôznych výrobcov v rôznych cenových kategóriách využívajúce rôzne technológie pre komunikáciu a napájanie. Avšak jedna z oblastí zostala relatívne zanedbaná. Neexistuje veľa konkrétnych open-source riešení určených práve pre túto aplikáciu. Open-source je vhodný pre ľudí, ktorí chcú ušetriť, majú lepší pocit bezpečia, keďže ich zariadenia nespravuje žiadna firma a dáta su neni odosielané na cloud a baví ich zisťovať, ako zariadenia fungujú, aj keď sa v niektorých prípadoch jedná o laikov, čo sa vzdelania v elektronike a IT týka.

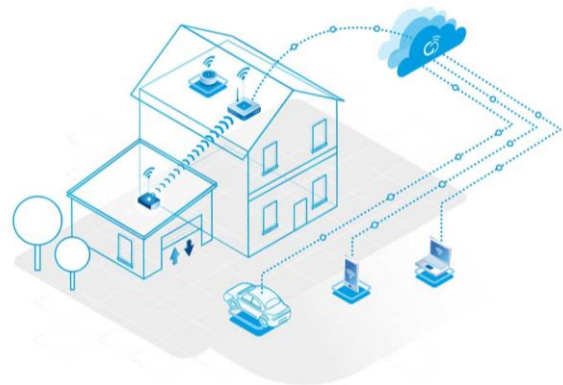
1 Úvod

Na začiatok by sme radi zadefinovali pojmy open-source a IoT, keďže tieto tvoria jadro tejto práce.

IoT (anj. – Internet of Things – Internet vecí) je sieť navzájom prepojených zariadení, ktoré komunikujú a zdieľajú dáta medzi sebou a s vonkajším svetom skrze internet. Zariadenia využívajúce IoT siahajú od jednoduchých domácich zariadení až po komplexnejšie systémy ako smart mestá a autonómne vozidlá [1].

Open-source je výraz, ktorý sa pôvodne používal najmä vo vzťahu k softvéru, ale postupne sa rozšíril do rôznych oblastí výroby, výskumu, vývoja a pod. Jedná sa o prístup k riešeniu problematiky, respektíve návrhu zariadení, pri ktorom autor poskytuje všetky nadobudnuté znalosti, vyvinuté zariadenia, výrobné postupy, návrhy, schémy, nákresy a návody na vývoj, výrobu, obsluhu a údržbu takýchto zariadení, technológií a riešení širokej verejnosti úplne zdarma a bez obmedzení. Verejnosť, respektíve ľudia zainteresovaní do tohoto procesu si takéto zariadenie môžu sami podľa poskytnutých materiálov a s pomocou dostupných komponentov a prvkov sami vyrobiť, implementovať upraviť alebo vylepšiť ho, prípadne môžu nájdené chyby nahlásiť alebo rovno vyriešiť a poslať autorovi tohoto zariadenia, ktorý ich implementuje a tým prispieť k zlepšenej funkcčnosti tohoto zariadenia alebo riešenia. Jedná sa v podstate o komunitu zdieľajúcu technológie, nápady a riešenia [1].

Ovládanie motorového pojzdu pre otváranie garážovej a vjazdovej brány je jednou z ideálnych aplikácií pre IoT zariadenia – možnosť monitorovania otvárania, spotreby, ovládanie na diaľku, zvýšená bezpečnosť a mnohé iné – Obr. 1 Taktiež ako sme spomenuli už v abstrakte, na trhu existuje široké spektrum riešení tejto problematiky. Nami navrhnuté zariadenie bude na rozdiel od zariadení výrobcov plne prístupné verejnosti a jeho zostavenie a sprevádzkovanie zvládne aj menej skúsený laický elektrotechnik. Zameraný je tiež na nízku cenu a jednoduchosť riešenia bez potreby cloudu, gateway zariadení (potrebné napr. pre zariadenia využívajúce Zigbee protokol). Pri návrhu sme sa tiež nespoliehali na drahé a zbytočne komplexné zariadenia typu Raspberry Pi, ESP32 a ďalšie.



Obr. 1 – IoT ovládanie garážovej brány [1].

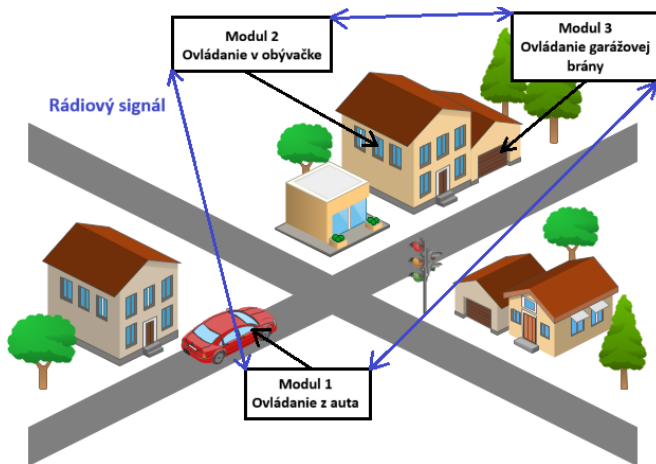
2 Požadované parametre a vlastnosti

Pred začatím návrhu sme si stanovili požadované parametre a vlastnosti, ktoré by mal náš navrhovaný systém a zariadenia obsahovať a dodržiavať. Určili sa taktiež technológie, moduly, komponenty a postupy pre dosiahnutie týchto parametrov. Najdôležitejšími stanovenými cieľmi je nízka výrobná cena a jednoduchosť riešenia. Od tohoto sa odvíjali všetky dizajnové rozhodnutia.

Jadrom celého projektu je ekosystém Arduino, keďže MCU tohoto typu sú veľmi lacné, populárne, jednoduché na programovanie a je k nim online dostupné veľké množstvo návodov. Starajú sa o ovládanie elektronických zariadení

tvoriacich systém. Tieto elektronické zariadenia slúžiace k ovládaniu konkrétnych pojazďových jednotiek (umiestnené v garáži alebo na vjazdovej bráne), ale aj k prijímaniu a vysielaniu signálov (umiestnené napr. v dome alebo v aute) nazývame moduly. Sú základnými stavebnými prvkami nášho systému. Je k nim pripojené napájanie, ovládacie kontakty a prípadne rôzne senzory. Prvá verzia týchto modulov bola tvorená rôznymi návrhmi pre rôzne aplikácie a umiestnenia týchto modulov, avšak v druhej verzii sme sa rozhodli pre unifikáciu všetkých modulov, ktoré nakoniec používajú rovnaký dizajn. Funkčný systém musí byť tvorený najmenej dvoma modulmi, horný limit použitých modulov je 10 – závisí od softvérovej robustnosti, možnosti použitého MCU a použitých knižníc. Je potrebné mať na pamäti, že s pribúdajúcimi modulmi výrazne stúpa zložitosť systému.

Pre komunikáciu medzi modulmi sme sa rozhodli zvoliť rádiový modul pracujúci na frekvencii 433MHz – jedná sa o voľnú frekvenciu, preto nie je pre jej použitie potrebné žiadne povolenie. Oproti použitiu Wi-Fi alebo bluetooth modulov má toto riešenie výhodu v omnoho nižšej spotrebe el. energie, nižšej cene a vyššom dosahu. Zároveň moduly nepotrebujú k svojmu fungovaniu cloud a ani prístup k internetu, avšak táto funkcionálnosť môže byť do systému pridaná, ak si to niekto z komunity bude chcieť pridať. Na moduly sú tiež napojené senzory zaručujúce bezpečnosť pri používaní, alebo pri ochrane majetku – snímajú polohu brán a iné dôležité alebo automatizačné parametre.



Obr. 2 – Navrhovaný IoT systém [1].

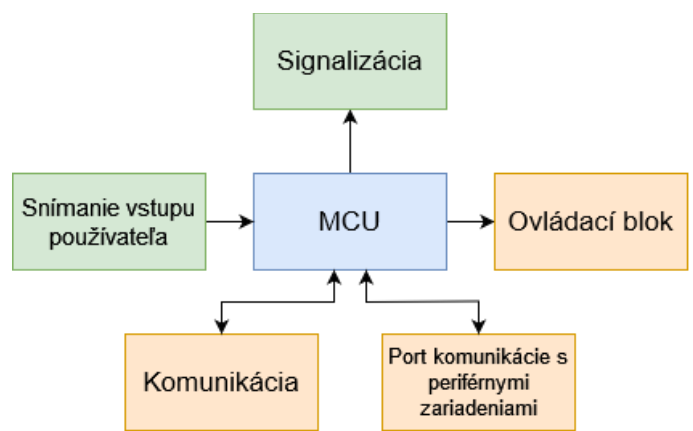
Systém je možné pomocou šikovných softvérových modifikácií a pridaní rôznych senzorov vylepšiť z hľadiska bezpečnosti, funkcionality a aj automatizácie. Napríklad sa brány môžu otvoriť automaticky pri prízjazde auta do dosahu modulu na bráne alebo v garáži.

3 Konštrukcia

V tejto časti si postupne predstavíme jednotlivé súčasti, z ktorých sa tento systém skladá. Pozrieme sa na ich návrh z hľadiska technický riešení, výroby aj používania. Na záver si zhrnieme špecifikácie a navrhujeme prípadné možnosti ďalších vylepšení a modifikácií.

3.1 Návrh elektronického hardvéru

V tejto časti sa budeme venovať návrhu elektronickej časti tohoto systému. Zameriame sa najmä na elektronickú časť samotných modulov. Po stanovení si požiadaviek na systém a konkrétne zariadenia sme pristúpili k prieskumu dostupnosti riešení a skonštruovali sme si blokovú schému budúceho zariadenia – Obr. 3. Popis k jednotlivým blokom tejto blokovej schémy je uvedený pod obrázkom. Vo verzii č.2 návrhu modulov sme sa rozhodli pre jednotný dizajn modulov naprieč spektrom všetkých aplikácií a úloh (líšiť sa budú softvérom a tým, ktoré bloky je potrebné a nutné pre danú aplikáciu osadiť). Sú však bloky, ktoré musia byť osadené v každom module, jedná sa o bloky MCU, Komunikácie, časti Signalizačného bloku a ovládacieho bloku. Následne sme nami vytvorenú blokovú schému využili ako podklad pre vytvorenie schémy.

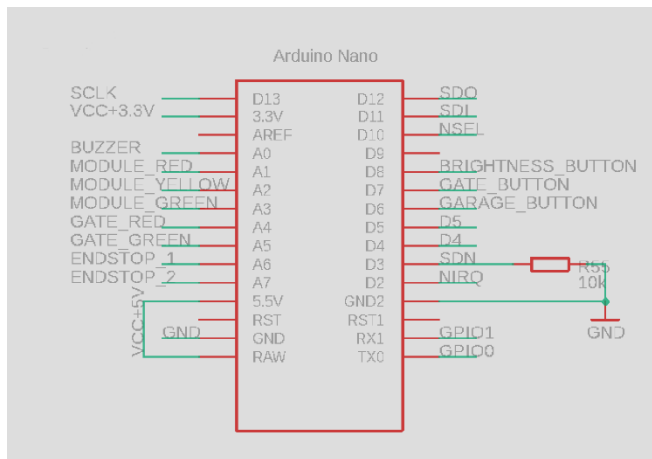


Obr. 3 – Bloková schéma modulu systému.

- MCU

Ako sme už v Kapitole 2 spomínali, ako hlavnú ovládaciu jednotku (MCU – z anj. Main Control Unit) sme si zvolili ekosystém Arduino kôli jeho dostupnosti, jednoduchosti, spoľahlivosti a nízkej cene. Konkrétne sme ako MCU zvolili model Arduino NANO kôli jeho malej veľkosti, integrovanému programátoru a USB portu, ktorým sa dá jednoducho pripojiť priamo do PC. K voľbe tiež prispelo to, že Arduino si so sebou prináša vlastný programovací editor Arduino IDE so zjednodušenou verziou jazyka C++, dobrou podporou a veľkým množstvom online návodov.

V našej DPS - doske plošných spojov je NANO zasunuté v päťci pre jednoduchú výmenu v prípade poruchy, päťicu si môžu používatelia bez problémov odstrániť ak ju považujú za zbytočnú, avšak nie je to potrebné keďže aj dizajn šasi počíta s päťcou. Arduino NANO je osadené jednojadrovým, 8-bitovým mikroprocesorom Atmel Atmega 328P v SMD puzdre. Nachádza sa tu tiež programovací FTDI čip a prevodník USB – Serial vďaka ktorému je možné pomocou PC nahrávať program do ROM a komunikovať s mikroprocesorom počas chodu programu. Doska NANO má tiež zabudované reset tlačidlo, lineárny stabilizátor napätia stabilizujúceho na 3.3V a vyvedené všetky potrebné piny mikroprocesora. Napájať je ju možné pomocou USB alebo príslušného napájacieho pinu, a vstupné napätie je v rozmedzí 3.3V až 18V.

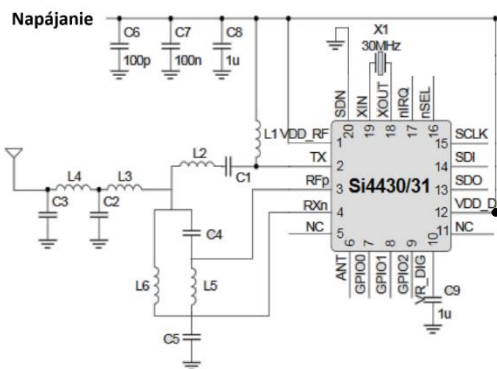


Obr. 4 – Schéma bloku MCU.

- Komunikácia

Tento blok sa stará o komunikáciu medzi moduolmi, prípadne s vonkajším svetom. Ako sme spomenuli už vyššie, ako hlavný spôsob komunikácie sme zvolili rádiovú komunikáciu pracujúcu na frekvencii 433MHz, keďže pre túto frekvenciu nie je potrebné vybavovať povolenia na úrade a zároveň sa jedná o riešenie, ktoré vie fungovať na dostatočne veľkú vzdialenosť, má nízku spotrebu energie a kompaktné rozmery.

Ako rádiový modul sme zvolili dosku s IC SI4432 od spoločnosti Silicon Labs. Jedná sa už o hotovú dosku s vyvedenými príslušnými kontaktmi, ktorú sme integrovali do finálneho riešenia. Doska je typu Transciever, čo znamená že môže slúžiť ako vysielateľ a zároveň ako prijímač. Modul je napájaný napätovým rozsahom 1.8V až 3.6V, preto je napájanie vedené zo stabilizátora na Arduino NANO. Vysielaciu frekvenciu IC je možné nastaviť v rozmedzí od 240MHz do 930MHz. V našom prípade používame spomínanú 433MHz frekvenciu, ktorá je nastavená pomocou kondenzátorov C1–C5 a cievok L1-L6 (zobrazených na Obr. 5) špecifických hodnôt osadených na doske modulu. Maximálny výstupný vysielací výkon je +20dBm, spotreba je 85mA. Ekonomický výkon je pri vysielacom výkone 13dBm, spotrebováva 30mA. O vysielanie a prijímanie signálov sa stará všesmerová anténa zvinutá do pružinového tvaru s dĺžkou 3cm.



Obr. 5 – Schéma modulu komunikácie.

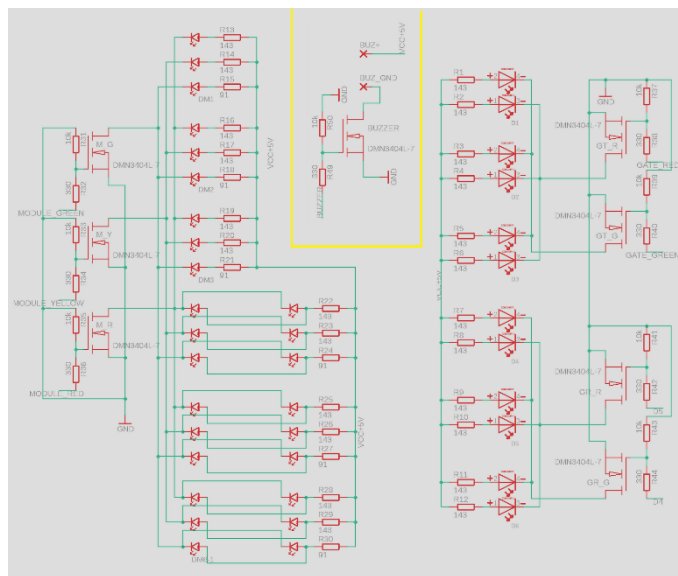
- Signalizácia

Tento blok sa stará o komunikáciu informácii zo systému používateľovi. Skladá sa z 2 častí, zvukovej a svetelnej signalizácie.

O zvukovú signalizáciu sa stará piezoelektrický bzuchák. Tento je ovládaný pomocou Mosfetu priamo jedným pinom Arduina. Slúži na upozornenie používateľa na vykonanie akcie bez nutnosti rozptyľovania pozornosti svetelnými signálmi, ktoré môže byť nebezpečné, napríklad počas jazdy autom.

Svetelnú signalizáciu tvoria dve skupiny LED diód, každá z týchto skupín je rozdelená na dve polovice. Dokopy teda tvoria 4 časti LED signalizácie, ktoré sú z dizajnového hľadiska umiestnené v rohoch DPS. Každá časť pozostáva z 3 diód, čo na celom DPS modulu činí 12 LED. Prvú skupinu tvoria trojfarebné LED (LED pozostávajúce z červenej, žltej a zelenej). Druhú skupinu tvoria dvojfarebné LED (LED pozostávajúce z červenej a zelenej)

LED Môžu byť používateľom naprogramované pre blikanie alebo svietenie a môžu signalizovať veľmi široké spektrum informácii, prvá skupina LED bola určená najmä pre signalizáciu stavu brány – brána zatvorená, otvorená, otvárajúca sa, zatvárajúca sa a pod. V podstate ide o signalizáciu dát čítaných zo senzorov. Druhá skupina je primárne určená pre signalizáciu stavu modulu – stav batérie, pripojenia, prípadných chýbách, poruchách a pod.



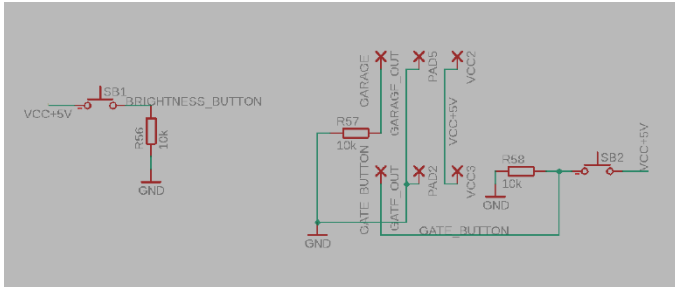
Obr. 6 – Schéma bloku signalizácie.

- Snímanie vstupu používateľa

Snímanie používateľského vstupu je riešené pomocou dvoch druhov tlačidiel. Je možné použiť klasické mechanické tlačidlá, alebo používateľ môže osadiť a použiť dotykové tlačidlá, ktoré sa kupujú ako samostatný modul s vyvedenými napájacími a logickými pinmi. Návrh krabičiek počíta s oboma verziami týchto tlačidiel, je ho však lepšie prispôsobiť konkrétnemu dizajnu – aby napr. nebola ponechaná diera pre neosadené tlačidlo.

Mechanické tlačidlo môže napríklad ovládať menej často používané funkcie, ako napr. nastavovanie jasu LED

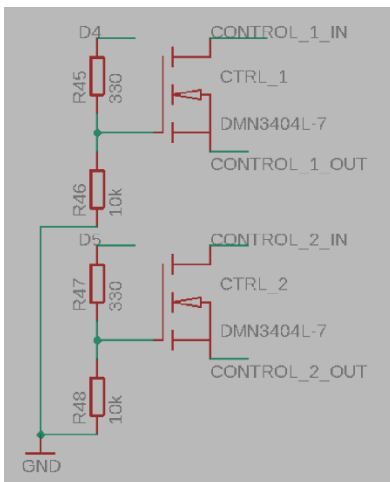
signalizácie, prepínanie módov a pod. Kapacitné dotykové tlačidlá odporúčame využívať pre častejšie používané funkcie, ako napr. ovládanie otvárania a zatvárania brány. Logické vstupy tlačidiel do Arduina sú ošetrené 10kΩ pull-down rezistormi.



Obr. 7 – Schéma bloku snímania vstupu používateľa.

- *Ovládací blok*

Tento blok sa stará o ovládanie externých zariadení pomocou modulu. Zabezpečuje komunikáciu medzi modulom a motorom pojazdu, prípadne s jeho zabudovaným ovládacím systémom (napr. staršie ovládanie pomocou tlačidiel, kde tlačidlo vymeníme a nahradíme našim modulom). Pozostáva z dvoch Mosfetov ktoré vedú spínať 2 kontakty, respektive vedú nahradiť až dve tlačidlá. Tento blok sa používa len v moduloch pripojených k bráne, a je prispôsobiteľný podľa potreby.

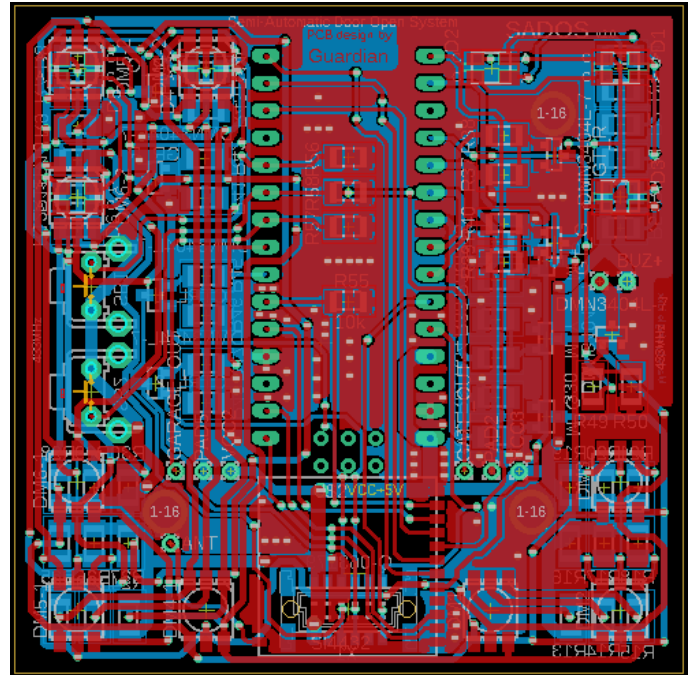


Obr. 8 – Schéma ovládacieho bloku.

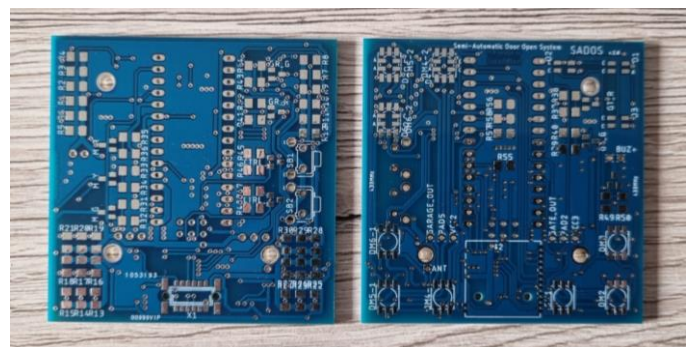
- *Port komunikácie s periférnymi zariadeniami*

Blok starajúci sa o napájanie a komunikáciu modulu so senzormi a inými zariadeniami. Jedná sa o konektor, vďaka ktorému je v prípade potreby možné zariadenie relatívne jednoducho odpojiť a opraviť, prípadne vymeniť.

Po nakreslení schémy a zvolení si správnych súčiastok a ich hodnôt sme pristúpili k návrhu DPS. Pri návrhu DPS sme sa snažili pomocou signalizačných a ovládacích prvkov vytvoriť moderný dizajn, a zároveň zachovať čo najmenšie rozmery modulu.



Obr. 9 – Navrhnuté DPS.

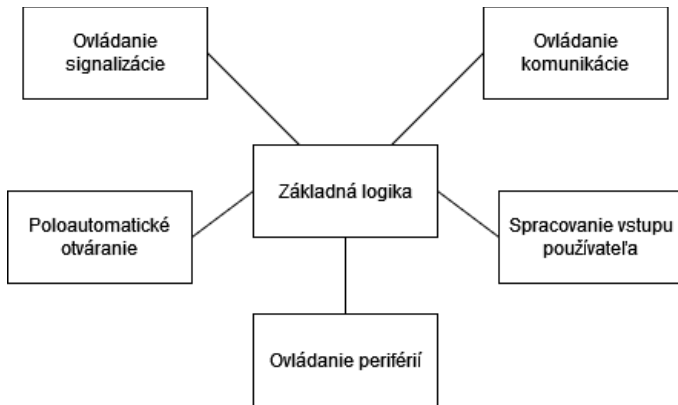


Obr. 10 – Vyrobené DPS.

O napájanie sa stará externý adaptér, ktorý mení striedavých 230V zo siete na jednosmerných 5V.

3.2 Návrh softvéru

Na začiatok uvedieme krátke vysvetlenie niektorých princípov. Moduly sa softvérom delia na dve základné skupiny, a to Client a Server. Server je v systéme vždy len jeden a nachádza sa na fixnom mieste (nie v aute napr.). Klientov môže byť maximálne 9. Neplatí pritom, že modul ovládajúci bránu musí byť server. Pre tento projekt je tiež vhodné v rámci komunikácie zvoliť nejaký systém šifrovania. rozhodli sme sa pre plávajúci kľúč, ktorý sa mení pri každom piatom odoslaní a prijatí správy. Šifrovanie je nutné z dôvodu, aby niekto cudzí s podobnou elektronikou nedokázal odchytať a následne replikovať správy posielané medzi modulmi, keďže by si takto mohol napríklad otvoriť garážovú bránu a vojsť bez problémov do domu. Softvér sa podobne ako elektronický hardvér skladá z niekoľkých podprogramov. Ich štruktúra je znázornená na vývojovom diagrame na Obr. 11.



Obr. 11 – Vývojový diagram softvéru modulu.

Celkovo na vývojovom diagrame vidíme 6 podprogramov, nižšie si v skratke popíšeme ich funkcionality.

- Základná logika

Blok obsahujúci základné procesy a funkcie potrebné k chodu zariadenia. Sú tu ovládané a volané všetky ostatné podprogramy. Je tu tiež vyčlenená časť, ktorá sa stará o formulovanie, interpretáciu a ukladanie správ prijatých alebo odoslaných ostatným modulom.

- Ovládanie komunikácie

Pravdepodobne jeden z najdôležitejších a najzložitejších podprogramov. Tvoria ho dve časti, komunikačná a šifrovacia. Komunikačná časť sa stará o obsluhu rádiového modulu a o odosielanie alebo prijímanie vopred pripravených polí charakterov. Pre ovládanie rádiového modulu sme použili verejne dostupnú knižnicu RF24.h.

- Ovládanie signalizácie

Blok starajúci sa o ovládanie všetkých LED. Prijíma príkazy od ostatných podprogramov a podľa nich vysvecuje určené farby. Pod tento podprogram spadá aj ovládanie jasu, ktorý sa dá pomocou tlačidla nastaviť až na 4 rôzne hodnoty. Užívateľ si tu môže jednoduchou modifikáciou prispôsobiť spôsob signalizácie jednotlivých stavov, prípadne po pridaní napr. ďalších periférnych zariadení pridať aj nové vzorce signalizácie.

- Ovládanie periférií

Podprogram, ktorý prijíma rozkazy od hlavného programu a podľa nich vytvára impulzy, ktoré riadia elektroniku dodávanú spolu s bránou. Tento podprogram, logicky, obsahujú len moduly, ktoré sú namontované na ovládaných bránach.

- Spracovanie vstupu používateľa

Blok snímajúci logické hodnoty z pinov pripojených na tlačidlá. Hodnoty zapisuje do premenných, odkiaľ majú k nim ostatné podprogramy prístup.

- Poloautomatické otváranie

V tejto časti môže používateľ naprogramovať čiastočnú automatizáciu. Môže sa napríklad aktivovať funkcionality automatického zatvorenia brány po prejazde auta, alebo po stanovenom čase od otvorenia. Brány sa môžu tiež automaticky otvoriť bez akéhokoľvek zásahu používateľa - po nadviazaní kontaktu s modulom v aute – príjazd autom domov.

3.3 Periférne zariadenia a senzory

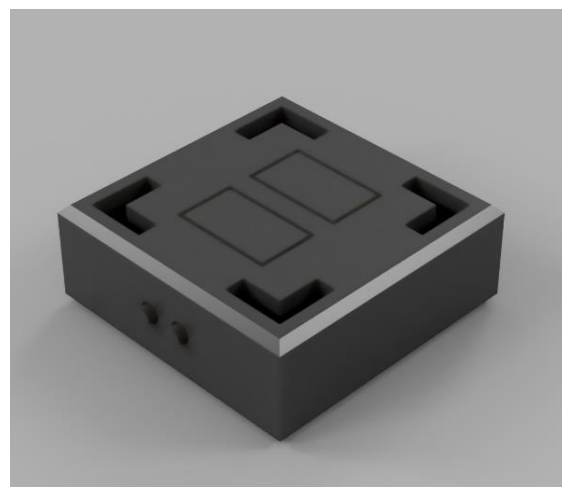
Pre správne fungovanie systému je v prípade niektorých modulov pripojiť aj periférne zariadenia. V nami vyvinutom systéme sa jedná o nutné minimum, a tým sú senzory na bráne, ktoré hovoria, či je brána otvorená alebo zatvorená – Obr. 12. Môže sa jednáť o akýkoľvek druh spínačov, či už mechanických, optických alebo magnetických, záleží na preferencii používateľa.



Obr. 11 – Optický snímač polohy [1].

3.4 Konštrukcia šasi zariadenia

Pre výrobu šasi (krabičky) modulov sme sa rozhodli využiť 3D tlač, keďže sa jedná o rýchle, jednoduché a ľahko modifikovateľné riešenie. Fotka prototypu krabičky je zobrazená na Obr. 12.



Obr. 12 – Šasi modulu.

3.5 Navrhované zlepšenia a modifikácie

Keďže sa jedná o open-source projekt, používatelia a komunita má možnosť si tento projekt ľubovoľne upraviť a vylepšiť podľa svojich priání, možností a potrieb. Medzi zaujímavé vylepšenia by mohlo patriť napríklad rozšírenie systému o rôzne senzory, napríklad o denný senzor, ktorý by prepínal systém napríklad medzi denným a nočným režimom, pohybový senzor a senzor okolitého svetla, ktorý by napríklad mohol automaticky nastavovať jas LED signalizácie.

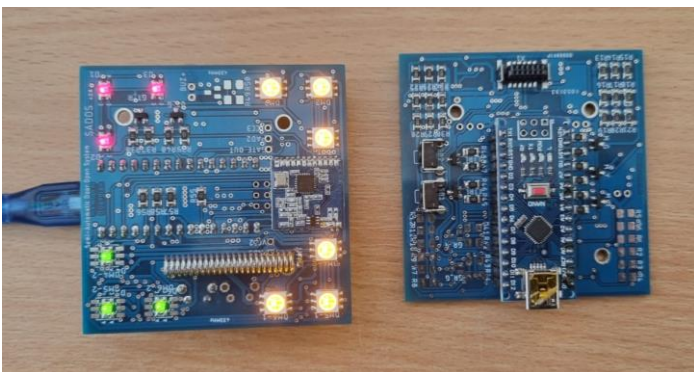
Medzi zložitejšie, ale o to zaujímavejšie rozšírenia by napríklad patrilo pridanie Wi-Fi alebo nejakej z Lo-Ra modulov, ktoré by systém prepojili napríklad s existujúcimi riešeniami v domácnosti používateľa. Medzi zaujímavé nápady tiež patrí kombinácia s ďalšími IoT projektami, ako je rozpoznávanie ŠPZ út pomocou kamery a Raspberry Pi, ktoré by bránu automaticky otvorili vopred prednastaveným vozidlám.



Obr. 13 – Rozpoznávanie EČV [1].

4 Testovanie a implementácia riešenia

Po návrhu a výrobe DPS sme sa rozhodli zložiť dva moduly, oživiť ich a otestovať ich funkčnosť. Zložené a oživené moduly môžeme vidieť na Obr. 14.



Obr. 14 – Osadené a zapojené DPS modulu.

5 Záver

V tomto článku sme si predstavili náš systém pre ovládanie vjazdovej, garážovej alebo inej brány s elektronickým vozidlom. Začali sme popisom problematiky a motiváciou, prečo sme sa začali touto problematikou zaoberať. Následne sme prešli k prehľadu riešenia konkrétnych častí problematiky, čo je veľmi dôležité z hľadiska povahy projektu. Na záver sme navrhli možné opravy a modifikácie, ktorými si môže komunita tento projekt vylepšiť a upraviť.

PodĎakovanie

Táto práca bola riešená v rámci projektov APVV-22-0132, APVV-21-0231, VEGA 1/0707/24 a projektu BATSYS. Touto cestou by sme sa taktiež chceli poďakovať Dominikovi Balúšikovi za poradenstvo pri konštrukcii šasi modulov, Jakubovi Kališikovi za pomoc pri testovaní funkčnosti systému a Ing. Martinovi Šmihálovi za odborné poradenstvo a vecné pripomienky k návrhu elektronickej časti systému.

Literatúra

- [1] BLESSING, E. POTTER, K. et al. 2024. *Security and Privacy in IoT: Considerations for securing IoT devices*. Dostupné z: researchgate.net/publication/377853082
- [2] Perens, B., 1999. The open source definition. *Open sources: voices from the open source revolution*, 1, pp.171-188.
- [3] IoT systém otvárania brán [online]. Dostupné na odkaze: <https://cameamericas.com/products/garage-door-opener-kit-came-ver08deu-120v-chain>
- [4] Nákrres princípu fungovania systému [online]. Dostupné na odkaze: <https://www.conceptdraw.com/examples/cartoon-3d-road-with-houses>
- [5] Koncové spínače vozidiel [online]. Dostupné na odkaze: <https://www.seemecnc.com/products/optical-endstop-switch-with-duet-connectors>
- [6] Systém skenovania ŠPZ [online]. Dostupné na odkaze: https://superacpov.live/product_details/23964042.html

Vplyv teploty substrátu na rast vrstvy organického polovodiča DNTT a jeho využitie v OFET prvkoch

Ondrej Kokavec, Miroslav Novota

Ústav elektroniky a fotoniky (Oddelenie organickej elektroniky a lekárskej elektroniky),
Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

xkokaveco@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zoberá optimalizáciou technológií prípravy organických polom riadených tranzistorov (OFET). Úpravou štruktúry, procesom depozície a zakomponovaním organického polovodiča DNTT, boli sériou experimentov pripravené rôzne verzie týchto prvkov. Vzorky boli podrobené elektrickej a morfolologickej charakterizácii, za účelom komplexného porozumenia správania sa jednotlivých aspektov a ich vzájomného prepojenia. Získané výsledky poskytujú dôležitý pohľad do skúmanej problematiky a majú značný potenciál pre budúce využitie.

1 Úvod

Každodenný život moderného človeka je úzko spätý s využívaním elektronických zariadení, ktoré mu uľahčujú alebo spríjemňujú život v najrôznejších oblastiach. Doteraz bola (a stále je) majorita trhu tvorená anorganickou elektronikou na kremíkovej báze. To je hlavne z dôvodu jednoduchej dostupnosti, vďaka hojnému zastúpeniu tohto prvku v zemskej kôre a v priebehu rokov zvládnuť technológiu prípravy, ktorá robí jeho spracovanie rýchle a lacné. Vývojom v ostatných oblastiach elektroniky boli objavené aj iné princípy realizácie, ktoré sa postupom času zdokonalili a dnes dokážu ponúknuť nielen zlepšenie aktuálnych vlastností elektronických prvkov, ale priniesť aj úplne nové. Príkladom takejto oblasti je organická elektronika, ktorá stále viac získava na popularite a realnej využiteľnosti.

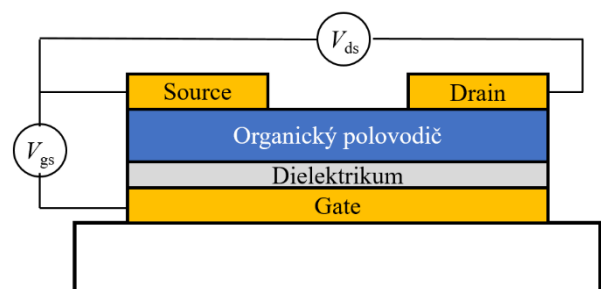
Prináša hned niekoľko výhod, ako je jednoduchšia a efektívnejšia výroba elektronických prvkov, vrátane nových spôsobov prípravy, ktoré sú po začlenení do výrobného procesu výrazne rýchlejšie a lacnejšie (viď. roll-to-roll proces). Vďaka syntéze je možné používané organické materiály modifikovať a "ušiť na mieru", čím sa dosiahnu žiadané vlastnosti, pričom ich príprava (aj likvidácia) je ekologicky prijateľnejšia. V rôznych aplikáciách ako OLED a nositeľnej elektronike sa taktiež uplatnili aj netradičnejšie vlastnosti, ako je ohybnosť alebo priehľadnosť. Medzi základné a najdôležitejšie prvky elektroniky však nesporne patria tranzistory. Používajú sa vo väčšine elektronických obvodov na spínanie alebo zosilňovanie elektrických signálov. V organickej elektronike je ekvivalentom organický polom riadený tranzistor (z angl. Organic Field Effect Transistor, skr. OFET), ktorý najčastejšie nachádza uplatnenie ako riadiaci prvok v už spomenutých OLED displejoch, alebo pre rôzne senzorké aplikácie. [1]

Prirodzene, technológia musí neustále napredovať a preto množstvo vedcov a výskumníkov neustále pracuje nielen na implementácii nových princípov činnosti, ale aj na optimalizácii aktuálne využívaných. U tranzistorov je cieľom zlepšenie vlastností, ako zvýšenie rýchlosti a spoľahlivosti spínania, efektivity a životnosti prvku, alebo väčšie prúdové a výkonové zaťaženie.

2 Experimenty

2.1 Teoretický základ

Organický polom riadený tranzistor funguje na podobnom princípe ako anorganický MOSFET, avšak v štruktúre je nahradená aktívna vrstva organickým polovodičom. Privedením napätia medzi elektródy Gate a Source vznikne elektrické pole, ktoré v tomto polovodiči vytvorí vodivý kanál. Po aplikácii napätia medzi elektródy Drain a Source sú následne schopné cez tento kanál putovať voľné nosiče náboja, ktoré tvoria tok elektrického prúdu. [1] Štruktúra OFET, doplnená o princíp činnosti, je vyobrazená na Obr. 1.



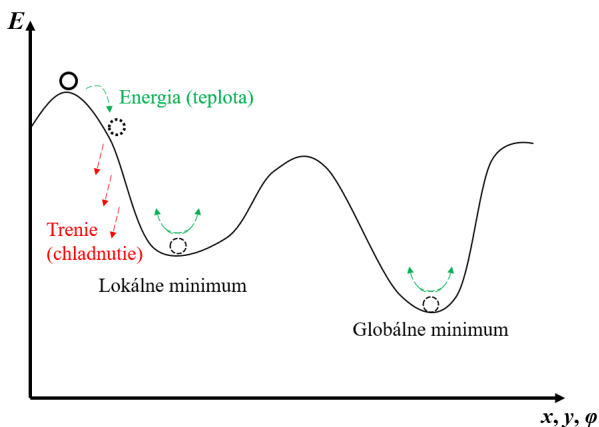
Obr. 1. Štruktúra OFET a znázornený popis jej činnosti.

Medzi konkrétne kroky, ktoré je možné vykonať pri procese vývoja OFET, patria nové výrobné technológie a postupy (resp. ich optimalizácia), výskum a použitie nových materiálov, alebo modifikácia vytváraných štruktúr. Jedným z hlavných cieľov tejto práce bolo overenie zakomponovania progresívneho a nie tak dopodrobna preskúmaného organického polovodiča Dinafto[2,3-b:2',3'-f]tieno[3,2-b]thiofén (skr. DNTT), s ohľadom na meniace sa parametre depozície materiálu. Od tohto si sľubujeme zlepšenie výkonu

OFET prvkov a nahradenie doteraz najčastejšie využívaného organického polovodiča pentacénu.

Druhým hlavným cieľom bolo overenie vplyvu samotnej optimalizácie výrobného procesu pri depozícii organického polovodiča na dodatočné zlepšenie vlastností. To je možné realizovať modifikáciou viacerých parametrov. Pri tepelnej depozícii vo vysokom vákuu sa konkrétne jedná o jej rýchlosť a súbežné vyhrievanie substrátu. Na základe predbežných výsledkov z predchádzajúcej série experimentov to bol práve vplyv teploty substrátu, ktorý preukázal viditeľnejšie zmeny. Preto sa dospelo k rozhodnutiu ho preskúmať podrobnejšie.

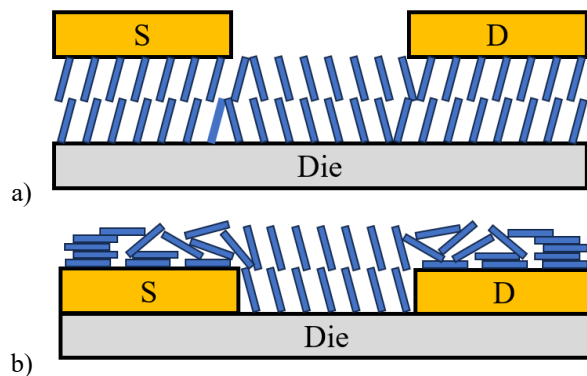
Tento jav pracuje s princípom, že energia častíc (atómov alebo molekúl) je daná ich teplotou. Po sublimácii materiálu, vďaka veľkej strednej dráhe pohybu, častice dopadajú (náhodne) priamo na substrát. Ten má však neporovnateľne väčšiu tepelnú kapacitu, preto mu pomerne rýchlo odovzdajú celú svoju energiu (teplo) a skondenzujú na mieste dopadu. Pri vyhrievaní substrátu sa však zvyšuje jeho energia a zároveň sa mení rozloženie jeho energetického potenciálu. Častica preto po dopade nielen že tak rýchlo nezahne, ale počas tohto procesu relaxácie sa snaží dostať do najvýhodnejšej polohy - hľadá energetické minimum. Tieto minimá sú najčastejšie zhodné s pozíciami, vďaka ktorým sa tvorí daná kryštalická mriežka a od kryštalizácie následne závisia elektrické vlastnosti materiálu. Dá sa teda predpokladať, že s vyššou kryštalinitou sa tieto vlastnosti zlepšujú a preto aj ich následné využitie v elektronických prvkoch môže pomôcť ku zlepšeniu výsledkov. [2] Tento princíp sa preukázal už pri spomenutom pentacéne a je bežne využívaný aj v iných problematikách. Jeho znázornenie možno vidieť na Obr. 2



Obr. 2. Fyzikálny princíp vplyvu vyhrievania substrátu.

2.2 Návrh a príprava

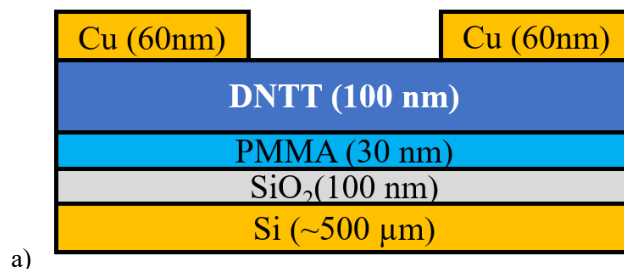
Pre porovnateľnosť experimentov bolo potrebné si na začiatku pevne definovať všetky postupy a podmienky. Z viacerých známych OFET architektúr, bola zvolená TopContact - BottomGate. Okrem toho, že je v našom laboratóriu dlhodobo zaužívaná a všetky procesy sú jej prispôsobené, predstavuje výhodu pri depozícii jednotlivých homogénnych vrstiev štruktúry. Taktiež v prípade polovodiča jeho rast nenaruša rozdielna energia predtým nanosených kontaktov, ako je tomu pri inom type architektúry, znázornenom na Obr. 3. [1]



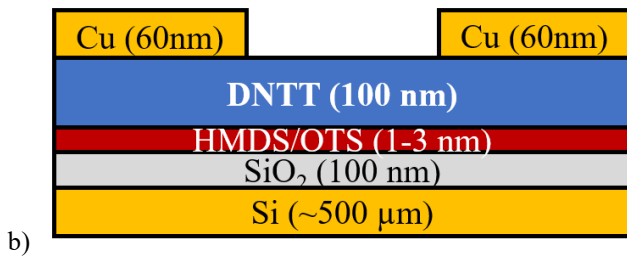
Obr. 3. Vplyv OFET architektúry a) TopContact - BottomGate a b) BottomContact - BottomGate, na výslednú kryštalizáciu.

Ako substrát a zároveň Gate elektróda bol použitý vysoko dopovaný kremík (*zn.* Si), na ktorom je od výroby termicky narastená vrstva oxidu kremičitého (*zn.* SiO₂) hrúbky 100 nm, slúžiaceho ako základné dielektrikum. Pre širšiu analýzu správania sa DNNT v OFET, boli vytvorené 4 verzie týchto prvkov na základe modifikácie ich dielektrika. Bez modifikácie SiO₂ pre účely referencie, so sekundárnou vrstvou dielektrika poly(metylmetakrylát) (*skr.* PMMA), a dve verzie so samo-usporiadanou monovrstvou (*z angl.* Self-Assembled Monolayer, *skr.* SAM) materiálov hexamtyldisilazán (*skr.* HMDS) a trichlór(octadecil)silán (*skr.* OTS). SAM vrstva označuje tenkú molekulárnu vrstvu, ktorá sa dokáže naviazať na povrchu substrátu chemickými väzbami. Jej prítomnosť následne mení vlastnosti povrchu, ako napríklad zmáčavosť, príľnavosť alebo elektrický náboj [3].

Pre vrstvu organického polovodiča DNNT bola zvolená hrúbka 100 nm na základe článku [4], kde bolo detailnejšie popísané správanie sa tohto materiálu. Pri malej hrúbke dochádza ku výraznému pnutiu väzieb, zatiaľ čo pri veľkej ku ich kompresii. To by sa mohlo prejaviť nežiadúcimi vedľajšími účinkami na elektrické vlastnosti a interferovať so skúmanými vplyvmi v tejto práci. Poslednou vrstvou boli medené kontakty o hrúbke 60 nm, slúžiace ako elektródy Drain a Source. Med' sa používa ako štandardne dostupný kov s dobrými kontaktnými vlastnosťami. Kompozíciu vytváraných štruktúr možno vidieť na Obr. 4.



a)



Obr. 4. Pripravované OFET štruktúry, s hybridnou vrstvou dielektrika využívajúce a) PMMA a b) SAM materiály.

Výroba prvkov začala narezaním Si wafera (s hrúbkou ~500 μm) na substráty o veľkosti 18x18 mm. Nasledovalo čistenie v ultrazvukovej vani (skr. UZ) *Kraintek K-5LE* zložené z niekoľkých etáp. Pri rezaní sa používa ochranný fotorezist, ktorý je potrebné najprv odstrániť. To prebiehalo za pomoci UZ v 3 krokoch: dvakrát v acetóne a jedenkrát v deionizovanej vode (s merným odporom 18,2 MΩ*cm). Každý z krokov mal trvanie 10 minút pri teplote ohrevu 56 °C (bod varu acetónu, pre účinnejšie čistenie). Samotné čistenie sa skladalo z dvoch krokov: jedenkrát v izopropylalkohole a jedenkrát v deionizovanej vode. Každý z krokov mal trvanie 15 minút pri teplote ohrevu 56 °C. Medzi každým krokom boli substráty opláchnuté v deionizovanej vode a na konci osušené dusíkovou pištoľou. Toto čistenie zabezpečí odstránenie všetkých anorganických nečistôt a prípadnej mastnoty. Potom boli substráty vystavené kyslíkovej plazme *Plasma Etch PE-25* po dobu 3 minút s výkonom 400 W, pri vákuu < 1 Torr a frekvenciou 20 až 50 kHz. Tento krok odstráni prípadné organické nečistoty a taktiež sa povrch stane zmačavejším, čo má pozitívne účinky pri depozícii ďalších vrstiev.

Modifikácia jednotlivých dielektrik prebiehala nasledovne. PMMA sa pripravilo rozpustením 0,75 hm% v toluéne. Potom sa nanieslo na substrát odstreďovaním s programom 500 ot/min po dobu 3 s a 3000 ot/min po dobu 30 s, pri akcelerácii 1000 (ot/min)/s. Potom bolo potrebné substrát umiestniť na výhrevné teleso pre odstránenie zvyškov rozpúšťadla. Tento proces prebiehal po dobu 45 minút pri teplote 145 °C. SAM vrstva HMDS sa na povrch substrátu naviaže z pár po 24 hodinách v exsíkátore. Následne je potrebné vzorky umiestniť na výhrevnú piecku po dobu 15 minút pri teplote 120 °C. A roztok OTS sa pripravil v pomere 12 mg OTS na 30 ml toluénu. SAM vrstva sa na povrch substrátu naviaže z roztoku po 60 minútach a opäť je potrebné vzorky umiestniť na výhrevnú piecku po dobu 15 minút pri teplote 120 °C.

Posledným krokom bola samotná tepelná depozícia organického polovodiča vo vysokom vákuu, ktorej nastavenia sa systematicky menili naprieč experimentami. Proces prebiehal v prístroji *Kurt J. Lesker SPECTROS* pri tlaku rádo vo 10⁻⁶ mBar a nižšom (bez prerušenia vákuu), za použitia pripravených tieniacich masiek pre jednotlivé vrstvy. Rýchlosť depozície bola konštantná 0,50 A/s a nastavená teplota vyhrievania substrátu sa menila od 25 (bez vyhrievania), 50, 75, až po 100 °C. Do momentu merania boli pripravené vzorky skladované v dusíkovom boxe, aby sa predišlo nožnej degradácii vplyvom ambientného prostredia.

2.3 Meranie a charakterizácia

V dostupnej literatúre [4, 5] bola popísaná pravdepodobnosť prejavu časovej rekryštalizácie DNTT. Preto boli vzorky charakterizované čo najskôr po ich príprave a elektrické aj morfológické merania prebiehali v rovnakom časovom horizonte. Pri každom experimente boli vytvorené dva substráty (vzorky) z každej modifikácie dielektrika. Na každej vzorke sa nachádzajú 4 rady po 7 OFET prvkov, pričom šírka kanála je zhodná 2,5 mm a dĺžka kanála sa mení od 50 po 200 μm s krokom 25 μm. Organický polovodič DNTT sa správa ako polovodič s P-typom vodivosti, takže tranzistor je riadený záporným napätím (aj vykazuje záporné prúdy).

Elektrické merania prebiehali na vymeriavači *Keysight B1500A*. Prevodové charakteristiky boli merané pre každý z tranzistorov. Riadiace napätie V_{gs} bolo rozmiatané od +40 do -40 V s krokom 0,5 V. Z nich boli následne vyhodnocované viaceré atribúty, avšak pre účely tohto príspevku sme zvolili prezentovať prahové napätie V_{th} , udávajúce kedy tranzistor prejde z podprahového do saturovaného režimu a pohyblivosť μ , popisujúcu rýchlosť prenosu voľných nosičov (skr. vn) náboja naprieč kanálom tranzistora. Oba atribúty (pre saturovaný režim) sa dajú vyjadriť na základe zjednodušenej rovnice (1), ktorú možno matematicky upraviť do tvaru (2). [1]

$$I_{ds} = \frac{WC_g}{2L} \mu (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (1)$$

$$\mu = \frac{2L}{WC_g} \left(\frac{\partial I_{ds}^{1/2}}{\partial V_{gs}} \right)^2 \quad (2)$$

kde I_{ds} je výstupný prúd (tečúci kanálom), V_{gs} je riadiace napätie, μ je pohyblivosť vn, V_{th} je prahové napätie, L je dĺžka kanála, W je šírka kanála a C_g je kapacita hradla.

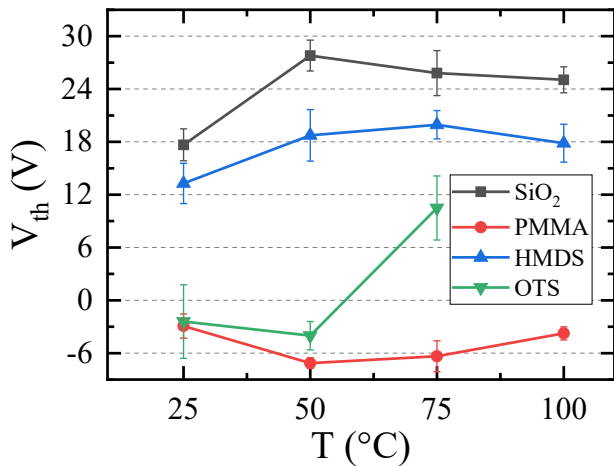
Výstupné charakteristiky boli merané pre dĺžky kanála 75, 100 a 125 μm. Aplikované napätie (na kanál) V_{ds} bolo rozmiatané od 0 do -40 V s krokom 0,5 V a riadiace napätie V_{gs} bolo krokované od 0 do -40 V po 8 V. Pri nich bol meraný a následne porovnávaný najvyšší dosiahnutý výstupný prúd I_{dsmax} .

Morfológické merania boli vykonané za pomoci mikroskopu atomárnych síl (z angl. Atomic Force Microscopy, skr. AFM) *Park Systems XE-100*. Pre jednu vzorku z každej modifikácie dielektrika, bol realizovaný laterálny sken o veľkosti 10x10 μm, pre lepší prehľad o kryštalizácii povrchu. Získané výsledky elektrických a morfológických meraní boli následne vzájomne porovnané pre hlbšie porozumenie jednotlivým súvislostiam.

2.4 Výsledky a diskusia

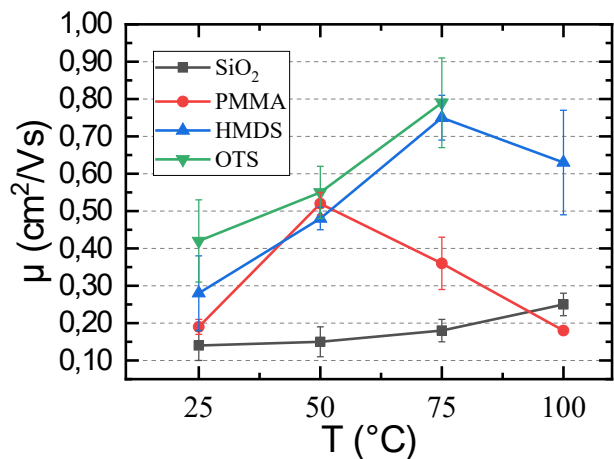
Každý experiment bol opakovaný dvakrát pre jednoznačnosť výsledkov. Nižšie sú uvedené závislosti skúmaných atribútov pre jednotlivé modifikácie dielektrika. Hodnoty všetkých dĺžok kanála boli spriemerované, aby jednoduchšie popisovali zhodné trendy (ich skutočný rozsah je vyjadrený chybovými úsečkami). Pri výstupnom prúde bola ako reprezentatívna zvolená stredná dĺžka kanála $L = 100 \mu m$. Už v úvode je potrebné upozorniť, že vzorky s OTS pri 100 °C nefungovali (ani opakovan), čo bude podrobnejšie analyzované a zhodnotené neskôr.

Na Obr. 5. je vykreslený graf prahového napätia v závislosti od teploty substrátu pri depozícii. Je žiadúce mať V_{th} čo najbližšie 0, aby bol tranzistor ľahšie ovládateľný a spínanie spoľahlivejšie. Pre všetky vzorky sa so stúpajúcou teplotou vzdďaľuje, až pri 100 °C sa začne opäť približovať.



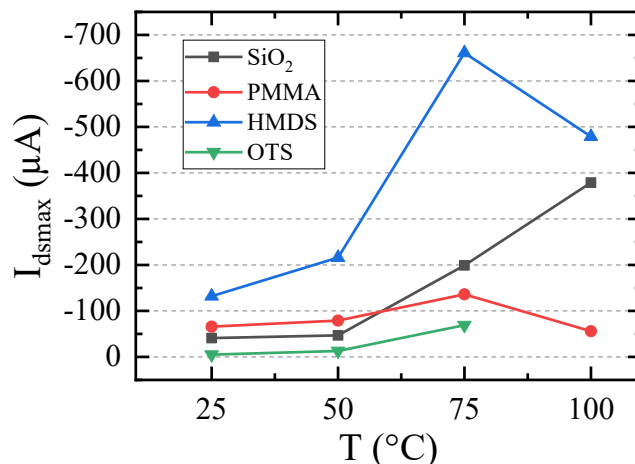
Obr. 5. Závislosť zmeny prahového napätia prvku, od teploty vyhrievania substrátu.

Na Obr. 6. je vykreslený graf pohyblivosti voľných nosičov náboja v závislosti od teploty substrátu pri depozícii. Je žiadúce mať μ čo najvyššiu, nakoľko ovplyvňuje rýchlosť spínania tranzistora a efektívnosť prenosu prúdu. Pre SiO₂ a OTS sa so stúpajúcou teplotou zvyšuje. Rovnako tak aj pre PMMA a HMDS, avšak tu sa trend otočí od 50, resp. 75 °C.



Obr. 6. Závislosť zmeny pohyblivosti vn prvku, od teploty vyhrievania substrátu.

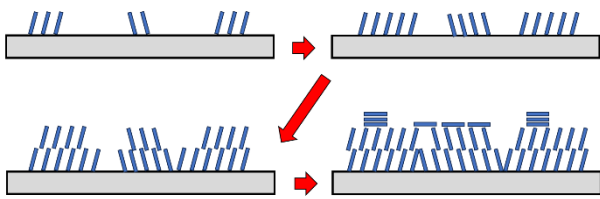
Na Obr. 7. je vykreslený graf výstupného prúdu v závislosti od teploty substrátu pri depozícii. Je žiadúce mať I_{dsmax} čo najvyššie, pretože je mu priamo úmerné najväčšie dosiahnuteľné výkonové zaťaženie tranzistora. Vo všetkých prípadoch so stúpajúcou teplotou narastá, ale opäť pre PMMA a HMDS pri 100 °C začne klesať.



Obr. 7. Závislosť zmeny výstupného prúdu prvku, od teploty vyhrievania substrátu.

Čo sa morfológickej charakterizácie pripravených prvkov týka, snímky povrchu jednotlivých vzoriek sú zosumarizované v Prílohe 1. Možný vplyv na vyššie uvedené elektrické vlastnosti je vyložený nasledovne. Pri 25 °C vidieť pre všetky vzorky najmenšiu veľkosť kryštálov - zrn. Pozornosť vzbudzujú biele artefakty tzv. ribonny, vyčnievajúce nad priemerom a označujúce rozdielny typ kryštalizácie. Najvýraznejšie sú pre PMMA a väčšinou elektrické vlastnosti zhoršujú. Pri 50 °C vidieť pre všetky vzorky zväčšenie útvarov, artefakty úplne vymizli. Dá sa aj povšimnúť výrazná zmena kryštalizácie, kedy sa na povrchu tvoria už súvislé vrstvy. Toto všetko aj v referencii na zlepšenie elektrických vlastností zatiaľ podporuje teoretické predpoklady. Aj keď sa na prvý pohľad pri 75 °C nezdajú útvary o nič väčšie, pozorným okom vidieť ich komplikovanejšiu kryštalizáciu. Tu hovoríme o tzv. clusteroch, označujúcich väčšie útvary, najčastejšie tvorené terasovitým rastom materiálu. Z elektrických meraní je evidentné opätovné zlepšenie, takže tento stupeň kryštalizácie má výrazne pozitívny vplyv na výsledné vlastnosti. Aj keď sú útvary pri 100 °C bez pochyb najväčšie, je to skôr k ich neprospechu. S vyššou kryštalinitou sa zároveň zväčšujú aj medzery medzi útvarmi čo môže vyústiť až v elektrickú nespojitosť vrstvy a zhoršenie elektrických vlastností - presne táto korelácia je evidentná z elektrických meraní. Okrem toho, pri OTS sú znateľné aj výrazné defekty, ktoré mohli prispieť k jeho nefunkčnosti.

Ďalším aspektom za zhoršením vlastností môže byť to, že skenujeme len povrch vzorky. Na ten sa nemožno bezvýhradne spoliehať, nakoľko v objeme materiálu môže pri raste dôjsť ku zmene jeho kryštalizácie, podobne ako je znázornené na Obr. 8. Ako už bolo predtým vysvetlené, rozdielna kryštalizácia má rozdielne elektrické vlastnosti a tie môžu byť priamo zodpovedné za zhoršenie výsledkov. Pre hlbšie porozumenie by bolo potrebné vykonať nadväzujúcu sériu experimentov s postupným rastom vrstiev rôznych hrúbok a ich priebežnou charakterizáciou. Avšak zachovanie rovnakých a takto detailných podmienok rastu je veľmi náročné. [2, 5]



Obr. 8. Postupná zmena kryštalizácie pri raste vrstvy.

V neposlednom rade, problémom môže byť aj prípadná zmena vlastností dielektrika pri zahrievaní vzorky. Tu už existoval predpoklad na základe článku [6], kde došlo k prekročeniu viskoelasticity PMMA (skleniu), čo malo za následok rapídne zhoršenie vlastností. So stúpajúcou teplotou rastie aj táto pravdepodobnosť, takže by nebolo prekvapivé že ku zhoršeniu výsledkov došlo práve pri 100 °C. Taktiež nemôže byť s určitosťou vylúčený prípadný, teplotne závislý jav, ovplyvňujúci prejavenu nefunkčnosť OTS. Z empirických výsledkov možno zhodnotiť, že OFET prvky s DNTT dosahujú najlepšie vlastnosti pri teplote vyhrievania substrátu 75 °C. Ich porovnanie je vizualizované formou Tab. 1.

Tab. 1. Porovnanie modifikovaných verzii OFET prvkov.

Dielektrikum	V_{th}	μ	I_{dsmax}
SiO ₂			
PMMA			
HMDS			
OTS			

Čo sa teda vyhodnotenia jednotlivých modifikácii týka, každá má určité klady a zápory. Aj keď SiO₂ má vysoké výstupné prúdy, prahové napätie je v podstate najvyššie, pohyblivosť najnižšia a často dochádzalo ku prierazom dielektrika, pravdepodobne spôsobených defektami. PMMA má najnižšie prahové napätie, pohyblivosť je vysoká ale pri vyšších teplotách klesá a prúdy sú v relatívnom porovnaní priemerné. HMDS má najvyššie výstupne prúdy a vysokú pohyblivosť, prahové napätie je však taktiež vysoké. OTS má najvyššiu pohyblivosť a nízke prahové napätie. Prúdy sú však najnižšie a je potrebné vyriešiť negatívny vplyv vysokej teploty na funkčnosť.

3 Záver

Sériou experimentov sa úspešne podarilo potvrdiť teóriu pozitívneho vplyvu vyhrievania substrátu na rast vrstiev organického polovodiča DNTT. Po detailných elektrických aj morfológických charakterizáciách boli preukázané priame súvislosti medzi týmito dvomi rovinami. Čím je teplota substrátu vyššia, tým sa zvyšuje aj kryštalinita vrstvy, a tým má lepšie elektrické vlastnosti. Avšak z výsledkov taktiež vyplynulo, že najlepšie vlastnosti sú dosiahnuté pri 75 °C. Potom sa začnú prejavovať negatívne vplyvy podrobnejšie popísané v diskusii, ktoré vedú ku zhoršeniu výsledkov.

Štandardne používaný referenčný materiál pentacén, bol nahradený progresívnym materiálom DNTT. Jeho funkčnosť, priamo aj s vplyvom teploty, sa prejavila na zlepšení

pohyblivosti μ a výstupného prúdu I_{dsmax} , zhoršovalo sa však prahové napätie V_{th} . Pre hlbšie porozumenie zakomponovania do OFET prvkov, boli vytvorené 4 verzie s rôznymi modifikáciami dielektrika. Ich jednotlivé výsledky boli hlbšie popísané v diskusii ale dá sa vyčítať, že najlepšie vlastnosti sa preukázali pri vzorkách so SAM vrstvami HMDS a OTS.

Tento príspevok priniesol celistvejší pohľad na optimalizáciu technológie prípravy OFET prvkov s organickým polovodičom DNTT. Bude slúžiť ako skvelý odrazový bod pre využitie, od nadväzujúcich výskumných aktivít až po plnohodnotnú realizáciu v aplikáciách.

Pod'akovanie

Moje úprimné pod'akovanie patrí Ing. Miroslavovi Novotovi, PhD., ako aj prof. Ing. Martinovi Weisovi, DrSc., za odborný dohľad nad touto prácou, a všetkým členom Oddelenia organickej elektroniky za cenné rady, vecné pripomienky a neutíchajúcu podporu. Taktiež srdečne aj Ing. Michalovi Sobotovi, ktorý nezištne obetoval nemalé množstvo času a energie pri výpomoci, počas rôznych fáz experimentov a bez ktorého by táto práca len ťažko dosiahla výslednej kvality.

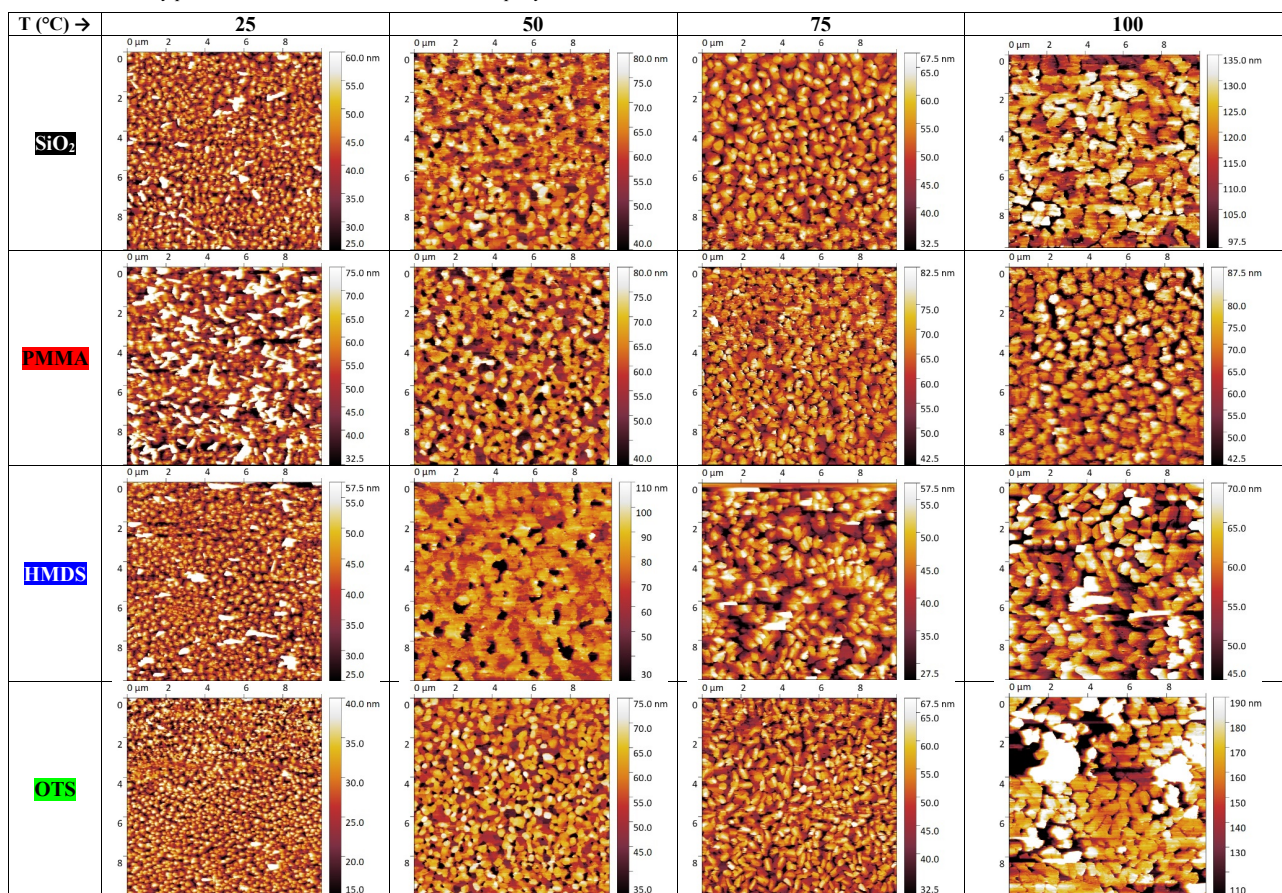
Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci projektu grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR APVV-22-0408.

Literatúra

- [1] MICJAN, Michal a WEIS, Martin. Organic electronic materials and devices. In: YURISH, Sergey Y. *Advances in Microelectronics: Reviews*. Vol. 3. Barcelona: IFSA Publishing, 2021, p. 19-74. ISBN 978-84-09-33338-7.
- [2] WANG, Qijing; JIANG, Sai; SHI, Yi a LI, Yun. Effect of access resistance on the experimentally measured temperature-carrier mobility dependence in highly-crystalline DNTT-based transistors. *Materials Advances*. 2020, roč. 1, č. 6, s. 1799-1804. ISSN 2633-5409.
- [3] SCHREIBER, F. Structure and growth of self-assembling monolayers. *Progress in Surface Science*. 2000, roč. 65, č. 5-8, s. 151-257. ISSN 00796816.
- [4] CHEN, Xiaosong; WANG, Zhongwu; QI, Jiannan; HU, Yongxu; HUANG, Yinan et al. Balancing the film strain of organic semiconductors for ultrastable organic transistors with a five-year lifetime. *Nature Communications*. 2022, roč. 13, č. 1. ISSN 2041-1723.
- [5] BREUER, Tobias; KARTHÄUSER, Andrea; KLEMM, Hagen; GENUZIO, Francesca; PESCHEL, Gina et al. Exceptional Dewetting of Organic Semiconductor Films: The Case of Dinaphthothienothiophene (DNTT) at Dielectric Interfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017, roč. 9, č. 9, s. 8384-8392. ISSN 1944-8244.
- [6] KIM, Choongik; FACCHETTI, Antonio a MARKS, Tobin J. Polymer Gate Dielectric Surface Viscoelasticity Modulates Pentacene Transistor Performance. *Science*. 2007, roč. 318, č. 5847, s. 76-80. ISSN 0036-8075.

Prílohy

Príloha 1. AFM skeny povrchu DNTT vrstiev a ich závislosť od teploty rastového substrátu.



Design of Resistance to Frequency Converter for Gas Sensor

Tomáš Gergely and Daniel Arbet

Institute of Electronics and Photonics, FEI STU v Bratislave

Department of IC Design and Test

xgergelyt@stuba.sk

Abstract – This article aims for a design and analysis of the Resistance-to-Frequency (R-F) converter for gas sensing applications. The proposed R-F converter is based on a resistance controlled oscillator (RCO) and it is designed in the 65 nm CMOS technology. Main emphasis was put on parameters such as accuracy, power consumption, compactness and linearity of the proposed circuit. Achieved results show a maximum non-linearity of 2%, dynamic range of 115 dB and a power consumption of 28.9 μ W in the worst case scenario.

1 Introduction

We live in a world where electronics have become an indispensable part of our everyday lives. Day after day, we learn from scientific articles or social media about how the field of electronics is gradually reaching heights that many thought were unreachable until the present day. Today, autonomous electrical systems such as smart households, cars powered by electricity and others are taken for granted. Designers put more emphasis on their parameters, reliability and compactness. Electronic systems usually need to communicate with the outside world to collect data and evaluate them in order to prevent dangerous situations [1] – that’s where sensors come in. Sensors are electronic devices able to detect physical quantity such as temperature, light, pressure, movement, acceleration and convert it to electrical signals. These signals are later processed by an electronic circuit called *Readout Interface* (RI) [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9]. Analog designers use different types of topologies today ranging from oscillation methods to AD converters [3]. Their choice strongly depends on the designer’s main focus and specific circuit’s parameter conditions. If the designer is to use AD converter in their RI, he has to be aware of potential power consumption being greater compared to oscillation methods. Overall design of the proposed circuit has to be able to withstand any temperatures ranging from -20°C up to 85°C . Rapid changes in temperature can cause current deviations, thus reducing linearity factor that can affect output waveform.

In this article, we deal with the design of the R-F converter for readout interface (RI) which will be a part of a complex sensing system on the chip SoC. The principle and selected topology of the R-F converter based on the RCO is described in Section 2. The achieved results are presented in Section 3. In the last section, the achieved results are discussed.

2 Principle and design of R-F converter

The proposed architecture of R-F converter is shown in Figure 1. It consists of two main parts – resistance-to-current converter (R-I), current-to-frequency converter (I-F). First part (R-I) includes operational amplifier (OPAMP) connected as a voltage follower with the negative feedback. This ensures the proper setting of fixed V_{SENS} voltage. Afterwards, I_{SENS} is generated proportionally to changing resistance R_{SENS} and can be expressed as follows:

$$I_{SENS} = \frac{V_{REF}}{R_{SENS}} \quad (1)$$

Since the value of R_{SENS} can range from hundreds of $k\Omega$ to $1\text{ G}\Omega$, the transistor N_0 should withstand currents from 1 nA up to 1 uA and dimensions should be selected accordingly. Best approach is to select the current exactly in the middle of the range and find the transistor’s dimensions. Beyond this range, the designer does not guarantee small output frequency offset and circuit’s nonlinearity. These parameters can be strongly affected by changing temperatures as well if not designed properly. The dimensions of transistor N_0 can be calculated by the following equation:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{N_0} = \frac{I_{SENS(MID)}}{2nV_T^2 K_{P(N_0)} I_{F(N_0)}} \quad (2)$$

where $I_{SENS(MID)}$ is an average value of the current range, I_F is the inversion factor, V_T is the thermal voltage, $K_{P(N_0)}$ is the technology parameter and n is the constant, often bearing the value of 1.2

If the gain of the operational amplifier OP_0 is too small, it can affect the current I_{SENS} by setting V_{SENS} incorrectly. Therefore, designer must also be aware of voltage offset α in the node V_{SENS} with respect to a reference voltage V_{REF} . The simplified equation (3) states that the gain of operational amplifier A_{MIN} should be infinite to set the voltage offset α to zero. In our case, the value α usually ranges from $7\text{ }\mu\text{V}$ to $17\text{ }\mu\text{V}$ with the gain A_{MIN} being roughly 100 dB .

$$\alpha \approx \frac{\sqrt{\frac{2I_{SENS(MID)}}{K_{P(N_0)}} \left(\frac{L}{W}\right)_{N_0}} + V_{TH(N_0)} + V_{REF}}{A_{MIN}} \quad (3)$$

Apart from the offset voltage α , there is also an independent need to ensure the stability of the loop. This is crucial as the circuit should operate normally under all specified

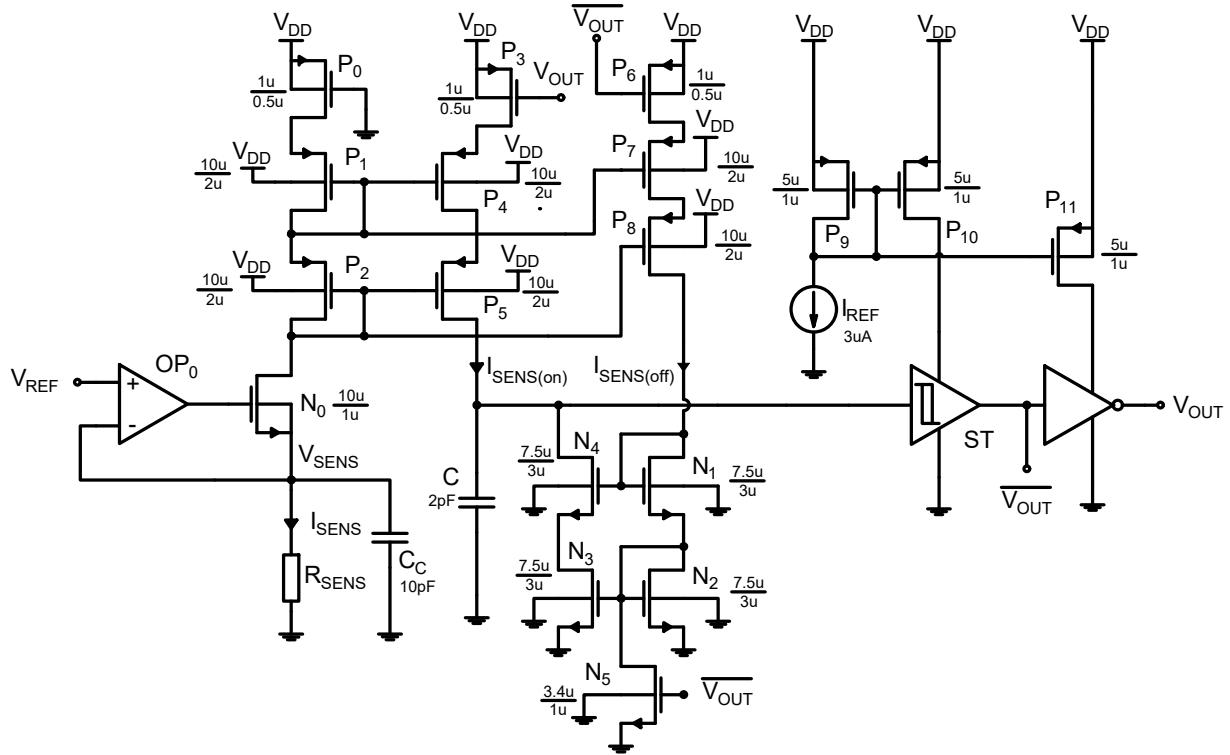


Figure 1: The proposed schematic of the R-F converter

conditions. The results of the stability analysis are presented in the following section. A generated current I_{SENS} is now mirrored by transistors P_1 and P_2 to I-F converter. As mentioned previously, only a very small deviation from the reference current I_{SENS} is allowed (we considered a maximum of 1% deviation). To make this possible, we use cascode current mirrors as they possess an adequate output resistance and a very good mirroring capability. The disadvantage arises from the output voltage range being lower compared to a simple current mirror. In our case, this does not pose a problem as V_{DD} is high enough to neglect this phenomenon. Next part, the I-F converter, contains a capacitor C and two switches responsible for charging and discharging of C . These NMOS and PMOS switches operate in the triode region. Since the charging current $I_{CHARGE} = I_{SENS}$ is constant throughout the whole charging process, voltage on the capacitor $V_C(t)$ rises linearly and it is given by following equation:

$$\frac{\Delta V_C}{\Delta t} = \frac{I_{CHARGE}}{C} \quad (4)$$

If $I_{CHARGE} = I_{DISCHARGE}$, we can observe the slope of V_C being the same in both charging and discharging process. This approach ensures the easy way to choose a duty cycle of 50% later in the paper. Since we have a limited value of V_{DD} , we are unable to charge the capacitor C infinitely.

If we exceed $V_{C(MAX)}$ on the capacitor C , the transistor P_5 forming the cascode current mirror can fall out of the saturation region and it may not be able to provide the current needed for proper charging. This also applies for the discharging part as it is made out of NMOS cascode current mirror. This, in fact, is one of the reasons for nonlinearity. Having $I_{CHARGE} = I_{DISCHARGE}$,

we assume t_{CHARGE} being equal to $t_{DISCHARGE}$. If we observe eq. 4 carefully, we can see it takes a certain amount of time until the capacitor charges to its pre-defined final value. To further digitalize the waveform, we will use the Schmitt trigger (ST) [3]. This poses an advantage since the ST circuit involves voltage window range, V_{HIGH} and V_{LOW} . We could have used two comparators instead of ST where each of them would have their own reference and single input [3]. However, this approach would increase the total chip area and power consumption. The drawback of the ST circuit could lie in reduced robustness of the process parameter variations due to its simple topology. Proper design of the circuit can partially reduce this. Observing Eq. 4 again, we clearly see that ΔV_C will be the corresponding voltage window $V_{HIGH} - V_{LOW}$ of ST circuit. As mentioned earlier, setting $I_{CHARGE} = I_{DISCHARGE}$ can now help us easily pick voltage values V_{HIGH} and V_{LOW} so that they are the same distance from each other. This finally ensures our requested duty cycle of 50%. Rearranging Eq. 4 for both charging and discharging, we can obtain a final frequency for our converter (Eq. 6). This equation holds after the initial charging since we have to get from zero to the value of V_{HIGH} .

$$f_{OUT} = \frac{1}{t_{charge} + t_{discharge}} = \frac{V_{REF}}{2C(V_H - V_L)R_{SENS}} \quad (5)$$

We clearly see that the output frequency is reciprocal to R_{SENS} . It is necessary to derive a period T_{OUT} since it poses a linear behaviour and it will help us determine nonlinearity.

$$T_{OUT} = \frac{2C(V_H - V_L)R_{SENS}}{V_{REF}} \quad (6)$$

Once the ST circuit digitalizes the voltage at the capacitor (V_C), we use this digitalized waveform V_{OUT} as one of the driving voltages for P_3 that switches between charging and discharging process. Our circuit contains NMOS switches as well, therefore the driving voltage V_{OUT} needs to be separate for N_5 and P_6 . Sometimes a problem may arise from digital switches creating current spikes through our analog circuit. If the spike is not reduced properly by a compensation circuit, or the transistor switches are too big in dimensions, it can cause an increase in power consumption and nonlinearity. For the charging process, the switch is located in the source of the transistor P_4 . Once the switch is on, it disconnects the whole charging branch without disconnecting the current source in the R-I part of the circuit. Discharging process has a switch located in parallel to the NMOS current mirror ($N_2 - N_4$), disconnecting gate-to-source voltage so that no mirroring can occur. Since we work with the digital part of the circuit (ST and switches), it should be noted that power consumption may increase. Slew rate of the signal at the capacitor should be higher in order to minimize this effect. If it is too low, ST circuit will have to wait in an undetermined state, which forces both NMOS and PMOS part of the ST circuit to be open at the same time. One way to fix this is to use the current source to limit the current coming to the ST circuit or increase L dimension of the transistors. Increasing L of our transistors poses an issue since it reduces the possibility for higher output frequencies making the ST slower. Therefore, we used the current starved ST which limited the overall current and reduced its power consumption.

3 Achieved Results

The results obtained by simulation of the proposed R-F converter are presented in this section. We considered the resistance range from 100 kΩ up to 1 GΩ. The process corners (TT - Typical, FF - Fast-Fast and SS - Slow-Slow) were taken into account and the design was simulated using Corner Analysis in temperatures ranging from -20°C to 85°C.

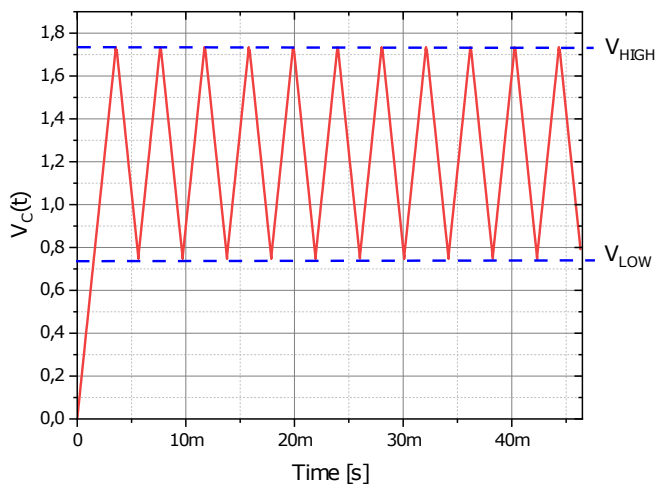


Figure 2: Voltage changing linearly on the capacitor C ($R_{SENS} = 200M\Omega$, temp = 27°C)

Fig. 2 and Fig. 3 reflects the functionality of the R-F converter. We can observe our proposed circuit reaching the duty cycle of 50% thanks to the equal slope in charging and discharging voltages on the capacitor C .

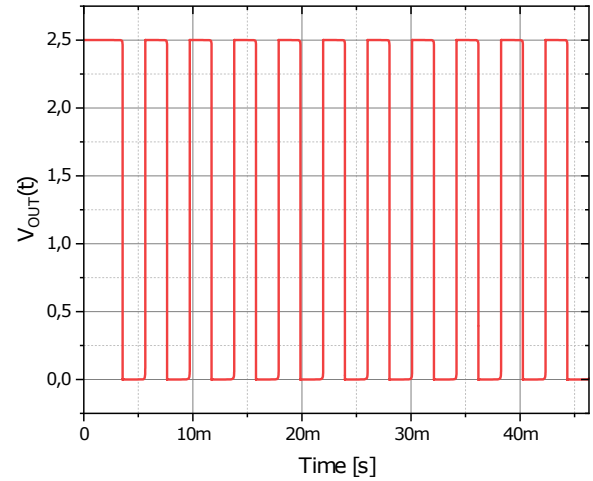


Figure 3: Digitalized output voltage of the ST ($R_{SENS} = 200M\Omega$, temp = 27°C)

T_{OSC} is dependent on sensing resistance value in different process corners as depicted in Fig. 4. The process corners influence the transistor's parameters and, in a certain way, create the different linear functions T_{OSC} . Overall, corners are crucial to keep our requested parameters in check and design the circuit accordingly.

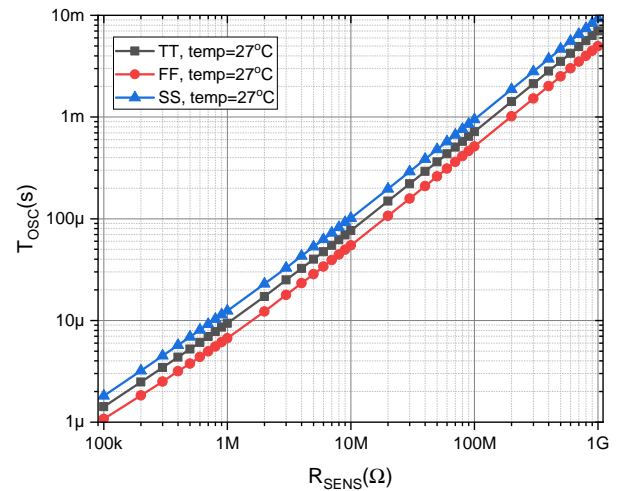


Figure 4: Dependence of T_{OSC} on sensing resistance across process corners

It is important to note that the offset and slope of T_{OSC} caused by the process corner can be tuned by introducing a calibration technique to compensate for process parameter variations.

Fig. 5 shows an absolute error of T_{OSC} in different process corners. It can be observed that FF corner represents a worst case scenario where the non-linearity of about 2% was achieved. If the non-linearity increased by one percent, there would be an error in our R_{SENS} value. If we provide 100 kΩ of R_{SENS} , the

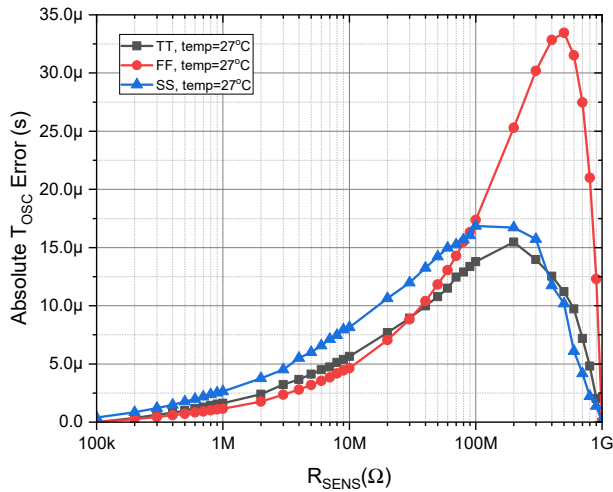


Figure 5: Absolute error from the ideal T_{OSC} linear function

actual value of the resistance might be increased or decreased by $1.8\text{ k}\Omega$. This, in fact, influences the output period as well. We can improve this by employing calibration technique mentioned above. Afterwards, this approach produces the output with very good accuracy.

The power consumption of the proposed R-F converter is shown in Fig. 6. In order to reduce the power consumption, we were forced to add additional current mirrors for the inverter as well as for ST. Reducing the current from $30\text{ }\mu\text{A}$ to roughly $3\text{ }\mu\text{A}$ improved the overall power consumption as estimated by 90% (Fig. 6). This approach increased the overall area of our design as the transistor current sources need an additional reference current source to be designed. On the other hand, linearity has decreased by an estimate of one percent due to this approach.

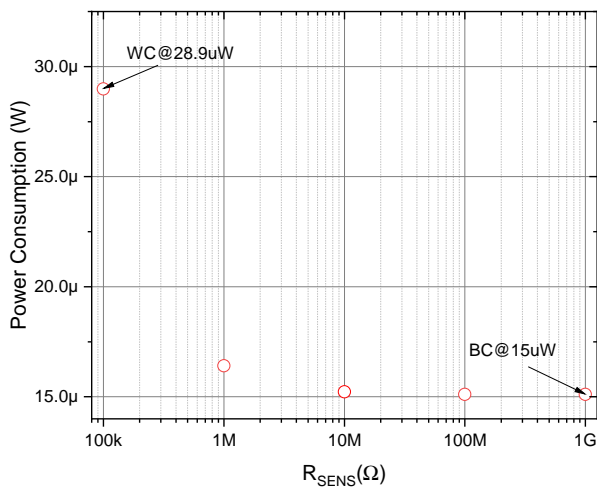


Figure 6: Power consumption (typical case)

Finally, we have also verified stability of the feedback loop used in the R-I part of the R-F converter. As depicted in Fig.7, phase margin of the feedback loop is around 105° and is therefore considered stable.

The most important parameters of the proposed R-F converter are shown in the Table. 1. The proposed circuit reliably

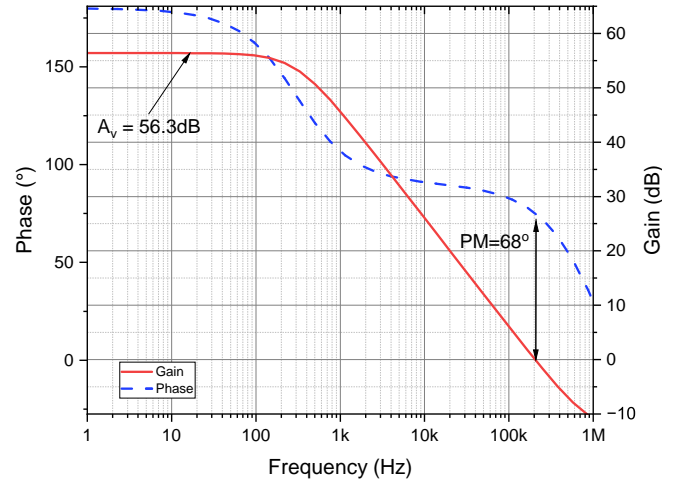


Figure 7: Gain and Phase of the feedback loop

works around 2.5V of power supply. Minimum requirement for our circuit to work as expected is at least 2V. Anything below this value might increase non-linearity. The worst case dynamic range of 114 dB was achieved in the resistance range from $100\text{ k}\Omega$ to $1\text{ G}\Omega$.

Parameter	Min	Typ	Max	Units
Supply Voltage	2	-	2.5	V
Power Consumption	12	-	28.9	μW
Temperature	-20	27	85	$^\circ\text{C}$
Non-linearity	1.1	-	1.8	%
Resistance Range	100k	-	1G	Ω
Dynamic Range	114	-	119	dB

Table 1: Design parameters of the R-F readout circuit

4 Conclusion

The R-F converter, based on the RCO designed in 65 nm CMOS technology, was presented. The proposed converter can be used in a gas sensing system as a part of readout interface. It is capable to reliably sense the resistance in a range from $100\text{ k}\Omega$ to $1\text{ G}\Omega$ with maximum non-linearity of 1.8%.

In an upcoming work, we would like to enhance the circuit with a differential part of the converter [5]. This will provide the reference resistance value which can be compared to the actual value of R_{SENS} . Additionally, this provides an opportunity to eliminate the temperature noise as well, however at the cost of an increased chip area.

References

- [1] GARDNER, Julian W., et al. CMOS interfacing for integrated gas sensors: A review. IEEE Sensors Journal, 2010, 10.12: 1833-1848.

- [2] CICIOTTI, Fulvio, et al. A 450- μ A 128-dB Dynamic Range A/D CMOS Interface for MOX Gas Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19.24: 12069-12078.
- [3] QI, Weijie, et al. A high-resolution interface circuit based on resistance-to-frequency conversion for resistive gas sensor. In: 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). IEEE, 2021. p. 486-491.
- [4] Jayaraman, Balaji, and Navakanta Bhat. "High precision 16-bit readout gas sensor interface in 0.13 μ m CMOS." 2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2007.
- [5] Lee, Tzung-Je, and Meng-Lin Tsai. "A High Dynamic-Range Readout Circuit with Differential Resistance-to-Time Conversion for Gas Sensor." 2023 21st IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS). IEEE, 2023.
- [6] E. Sacco, J. Vergauwen and G. Gielen, "A 96.9-dB-Resolution 109 μ W Second-Order Robust Closed Loop VCO-Based Sensor Interface for Multiplexed Single-Ended Resistance Readout in 180-nm CMOS," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 9, pp. 2764-2777, Sept. 2022.
- [7] A. V. Radogna, S. Capone, L. Francioso, P. A. Siciliano and S. D'Amico, "A 296 nJ Energy-perMeasurement Relaxation Oscillator-Based Analog Front-End for Chemiresistive Sensors," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no. 3, pp. 1123-1133, March 2021.
- [8] Y. Lee, B. Cho, C. Lee, J. Kim and Y. Chae, "A 0.5-ms 47.5-nJ Resistor-to-Digital Converter for Resistive BTEX Sensor Achieving 0.1-to-5 ppb Resolution," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, no. 3, pp. 827-837, March 2023.
- [9] K. Park et al., "An Energy-Efficient Multimode Multichannel Gas-Sensor System With Learning-Based Optimization and Self-Calibration Schemes," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 3, pp. 2402-2410, March 2020.

Zelená energia v športe

Bc. Tibor Rózsár

Ústav elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

xrozsar@stuba.sk

Abstrakt – Zelená energia sa vo svete športu stáva čoraz populárnejšou, pričom mnohí športovci a organizácie využívajú udržateľné postupy. Integrácia technológií zelenej energie, ako je výroba energie počas bicyklovania alebo používanie solárnych panelov na napájanie zariadení, pomáha znižovať uhlíkovú stopu a podporuje starostlivosť o životné prostredie. Využitím sily obnoviteľných zdrojov energie sa šport môže stať ekologickejšim a môže byť pozitívnym príkladom pre fanúšikov aj súťažiacich.

1 Úvod

Zelená energia, známa aj ako obnoviteľná energia, sa stáva čoraz populárnejšou, keďže je dopyt po znížení svojej závislosti od fosílnych palív a prejsť na udržateľnejšie zdroje energie. Zelená energia pochádza z prírodných zdrojov, ako je slnečné svetlo, vietor, voda či geotermálne teplo. Tieto zdroje energie sa považujú za „zelené“, pretože majú menší dopad na životné prostredie ako tradičné formy výroby energie a vzhľadom na tie „nezelené“ sú nevyčerpatelné.

Technológie zelenej energie produkujú elektrickú energiu s minimálnymi alebo takmer nulovými emisiami skleníkových plynov alebo iných škodlivých znečisťujúcich látok, čo z nich robí kľúčovú zložku úsilia v boji proti zmene klímy a podpore udržateľnosti. Niektoré z najbežnejších foriem zelenej energie zahŕňajú solárnu energiu, veternú energiu, vodnú energiu a geotermálnu energiu.

2 Vývin získavania zelenej energie

2.1 História

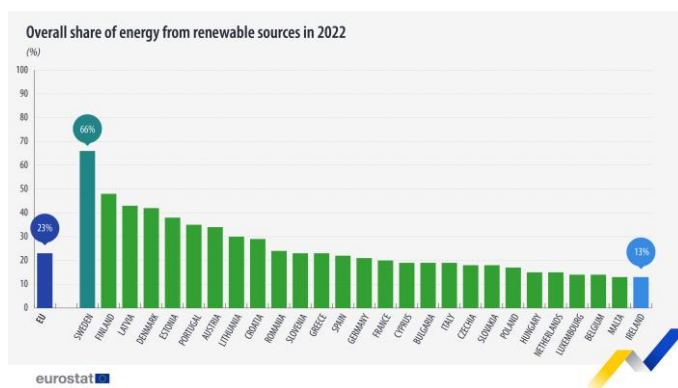
História zelenej energie siaha až do starovekých civilizácií, ktoré využívali obnoviteľné zdroje energie, ako je vietor a voda, na rôzne účely vrátane mletia obilia a čerpania vody. Moderná éra zelenej energie sa však začala v 70. rokoch 20. storočia ropnou krízou a rastúcimi obavami z vplyvov fosílnych palív na životné prostredie.

V nasledujúcich desaťročiach došlo k významnému pokroku v technológiách zelenej energie, čím sa znížili náklady a zvýšila sa účinnosť. Solárne panely sú čoraz dostupnejšie a rozšírenejšie, veterné turbíny sú väčšie a výkonnejšie a vodná energia či geotermálna energia naďalej zohrávajú významnú úlohu v globálnom energetickom mixe.

2.2 Súčasný stav a budúcnosť

Zelená energia dnes predstavuje rastúci podiel celosvetovej výroby elektriny, pričom krajiny po celom svete investujú do infraštruktúry obnoviteľných zdrojov energie a stanovujú si ambiciózne ciele na zníženie emisií uhlíka.

V rámci Európskej únie je podľa štatistík Eurostatu z roku 2022 priemerné využitie zelenej energie 23 %. Zoznamukraľuje Švédsko so 66 %, ale drvivá väčšina členských štátov nedosahuje ani 23 %, vrátane Slovenska.



Obr. 1. Celkový podiel energie z obnoviteľných zdrojov v Európe v roku 2022 [1].

Budúcnosť zelenej energie vyzerá sľubne, pretože pokroky v technológii naďalej znižujú náklady a zlepšujú výkon. Očakáva sa, že najmä solárna energia bude zohrávať kľúčovú úlohu pri prechode na čistejší a udržateľnejší energetický systém s potenciálom zabezpečiť významnú časť celosvetových potrieb elektrickej energie.

Veterná energia sa má v nadchádzajúcich rokoch výrazne rozšíriť, pretože nové projekty veternej energie na mori a pokroky v technológii turbín z nej robia nákladovo efektívny a spoľahlivý zdroj obnoviteľnej energie. Vodná energia a geotermálna energia budú aj naďalej zohrávať dôležitú úlohu a budú poskytovať energiu základnej záťaže a flexibilitu siete.

Okrem týchto zavedených foriem zelenej energie majú nové technológie, ako je prílivová energia a energia vln, ako aj inovatívne prístupy k skladovaniu energie a riadeniu siete, potenciál na ďalšiu revolúciu v energetickom prostredí a urýchlenie prechodu na nízkouhlíkovú budúcnosť.

3 Zelená energia v športe

Zelená energia v športe sa týka nielen využívania zdrojov energie šetrných k životnému prostrediu a postupov na napájanie športových podujatí, zariadení či vybavenia, ale aj „výroby“. Najčastejšie ide o premenu niektorých foriem energie (napr. mechanická) na elektrickú práve pri vykonávaní športových aktivít. Medzi takéto športy patria aj nasledovné:

1. Beh: Piezoelektrické materiály môžu byť umiestnené v podrážkach topánok alebo na bežeckých dráhach na výrobu elektriny zo stlačania a pohybu chodidla pri behu. Táto energia môže byť použitá na napájanie malých elektronických zariadení bežca.
2. Futbal: Kinetická energia môže byť využitá z pohybu hráčov na ihrisku pomocou špeciálnych dlaždíc alebo trávnik, ktoré dokážu zachytiť energiu generovanú počas hry. Túto energiu je možné premeniť na elektrickú energiu, uschovať ju v batériách a použiť na napájanie osvetlenia štadióna alebo inej elektronickej zariadenia.
3. Veslovanie: Veslovacie тренаžéry môžu byť vybavené generátormi, ktoré premieňajú pohyb veslovania na elektrinu. Dá sa použiť napríklad na napájanie displejov na stroji, prípadne rôznych zariadení s USB rozhraním.
4. Tenis: K tenisovej rakete je možné pripojiť zberač kinetickej energie, ktorý zachytáva energiu generovanú švihom a údermi počas hry. Túto energiu je síce tiež možné premeniť na elektrickú energiu, avšak jej využitie je náročné.
5. Jazda na bicykli: Pedálové generátory energie, ktoré sú pripojené k (stacionárnym) bicyklom, dokážu premieňať mechanickú energiu generovanú šliapaním na elektrickú energiu.

Práve jazda na bicykli, či už na stacionárnom alebo na klasicom nám spomedzi vyššie uvedených športov dokáže poskytnúť najväčší výkon, ktorý vie byť stabilne udržaný počas dlhšieho intervalu. Práve preto sa v ďalších kapitolách budeme zaoberať získaním elektrickej energie, jej uschovaním a použitím počas bicyklovania.

4 Elektrická energia získaná bicyklovaním

Bicyklovanie v exteriéri je populárna a príjemná forma cvičenia a dopravy, ktorá umožňuje jednotlivcom preskúmať svoje okolie a zároveň prospievať ich fyzickému zdraviu. Cyklistika sa dá robiť na rôznych terénoch, ako sú cesty, chodníky a hory, čo poskytuje cyklistom rozmanitý a náročný zážitok. Samozrejmosťou je aj bicyklovanie na stacionárnom bicykli, čo je možné vykonávať za každých poveternostných podmienok s možnosťou nastavenia náročnosti šliapania.

Jedným zo spôsobov výroby elektriny pri bicyklovaní je použitie dynamu. Dynamo je malý generátor, ktorý je pripravený ku kolesu bicykla a využíva rotačný pohyb kolesa na premenu mechanickej energie na elektrickú. Vyrobená elektrina môže byť použitá na napájanie svetiel, GPS zariadení, mobilných telefónov alebo iných elektronických zariadení počas bicyklovania.

Energia je generovaná dynamom iba počas pohybu. V prípade, ak zastavíme na križovatke alebo si doprajeme oddych, preruší sa výroba. Vo veľkých mestách, kde by sme viackrát stáli ako napr. v lese, by týmto (krátkodobými) výpadkami napájania zariadení mohlo dôjsť k poškodeniu batérie (v závislosti od typu). Vyrobená energia je preto zvyčajne uložená v dobíjateľnej batérii, čo, okrem iného, umožňuje cyklistovi využiť vyrobenú elektrinu aj neskôr, ak ju práve nepotrebuje. Tento spôsob výroby elektriny je šetrný k životnému prostrediu a poskytuje cyklistom udržateľný spôsob, ako napájať svoje zariadenia na cestách.

Našou úlohou je teda navrhnuť a zostrojiť obvody na čo najefektívnejšie spracovanie, uloženie elektrickej energie získanej z dynamu a jej následné prekonvertovanie na napätie, ktoré je v súlade s USB rozhraním.

5 Metodika práce

Dynamo generuje jednosmerný elektrický prúd (obsahuje komutátor). Napätie dynamu je úmerné rýchlosti otáčok. Z tohto dôvodu je potrebné stabilizovať napätie tak, aby sme ochránili obvody pred vysokým napätím, napr. keď cyklista ide dolu kopcom. Toto stabilizované napätie musí byť v rozsahu, ktoré je vhodné na napájanie nabíjacieho modulu pre batérie.

Batériu zvolíme lítium-polymérovú, ktorá na svoje malé rozmery je schopná akumulovať veľké množstvo energie a jej napätie sa pohybuje v intervale 3,6 V až 3,7 V (v závislosti od chemického zloženia). Plne nabitá batéria môže mať aj 4,2 V, čo je aj napätie, ktorým sa zväčša tieto batérie nabíjajú.

Uskladnenú energiu z batérie je potrebné zvýšiť na napätie, ktoré je v súlade s USB štandardom, teda 5 V \pm 5 %.

5.1 Spracovanie a stabilizovanie napätia z dynamu

Na výber máme hneď dve možnosti, ako vieme stabilizovať napätie, a to použitím:

- Lineárneho stabilizátora napätia.
- Spínaného stabilizátora napätia.

5.1.1 Lineárny stabilizátor napätia

Lineárny stabilizátor napätia alebo často nazývaný aj ako lineárny regulátor je systém používaný v elektronike na udržanie stabilného napätia a to v prípade, ak dochádza k zmene vstupného napätia, či zmene výstupného prúdu. Poznáme stabilizátory s prednastaveným výstupným napätím, ale aj programovateľné výstupné napätie, napr. pomocou odporového deliča na programovacej svorke stabilizátora [4].

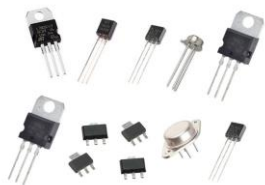
Lineárne regulátory môžu umiestniť regulačné zariadenie paralelne so záťažou (tzv. shuntový regulátor) alebo môžu umiestniť regulačné zariadenie medzi zdroj a regulovanú záťaž (sériový regulátor). Jednoduché lineárne regulátory môžu obsahovať len Zenerovu diódu a rezistor, komplikovanejšie regulátory zahŕňajú zdroje referenčného napätia, chybový zosilňovač a výkonový priepustný prvok. Pretože lineárny regulátor napätia je bežným prvkom mnohých zariadení, jednočipové regulátory sú veľmi bežné. Lineárne regulátory môžu byť tiež vyrobené zo zostáv diskretných komponentov [2].

Vyznačujú sa obvodovou jednoduchosťou a nenáročnosťou, keďže potrebujú zväčša iba filtračné kondenzátory na vstupné a výstupné svorky voči zemnaciemu potenciálu – GND. Dokážu poskytnúť stabilné výstupné napätie s veľmi malým zvlnením pri celom rozsahu vstupného napätia.

Majú však nízku účinnosť, keďže na nich vzniká stratový výkon daný vzťahom

$$P = |U_{IN} - U_{OUT}| \cdot I \quad (1)$$

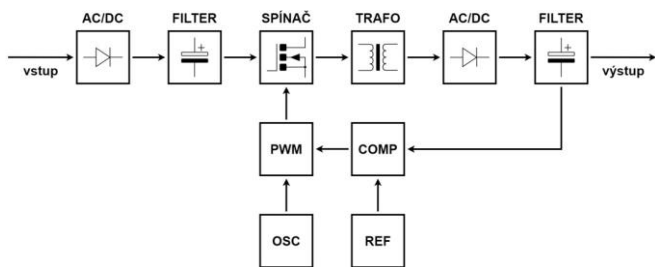
Tento stratový výkon je pretransformovaný na teplo, ktoré sa uvoľňuje do prostredia. Dôležité je teda myslieť aj na chladenie regulátora a použitím správneho chladiča zabezpečiť efektívny odvod tepla. Stratový výkon je možné minimalizovať práve vtedy, keď je rozdiel vstupného a výstupného napätia najmenší, avšak (pre správnu činnosť) minimálne taký, aký udáva výrobca v parametroch súčiastky. Toto v našom prípade nevieme zabezpečiť, pretože napätie získané z dynama závisí nielen od modelu dynama, ale aj od rýchlosti bicykla (otáčok kolesa). Dôraz teda kladieme na zabezpečenie efektívneho odvodu tepla.



Obr. 2. Rôzne modely a puzdra lineárnych regulátorov napätí [3].

5.1.2 Spínaný stabilizátor napätia

Spínaný zdroj sa v porovnaní s lineárnym zdrojom (viď. Tab. 1) vyznačuje vysokou účinnosťou najmä v prípadoch obmedzeného výkonu dodávaného batériou, malou hmotnosťou a rozmermi. Napriek komplikáciám návrhu sa percento spínaných zdrojov stále zvyšuje [2].

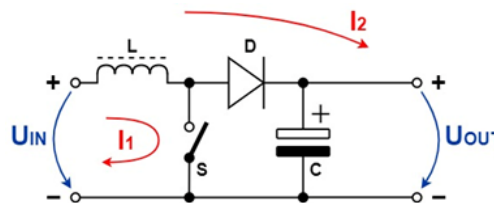


Obr. 3. Bloková schéma spínaného zdroja s konštantnou frekvenciou a premennou šírkou impulzu [4].

Spínané zdroje sa rozvinuli vďaka lacným polovodičom. V súčasnosti je tak efektívnejšie a finančne výhodnejšie použiť malý transformátor s feritovým jadrom s prídavnou elektronikou ako veľký s jadrom z elektrotechnickej ocele. Maximálny výstupný prúd spínaným zdrojom je prevažne obmedzený indukčnosťou cievky. Zo vzťahu

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (2)$$

vyplýva, že čím má cievka vyššiu indukčnosť, tým je priamo úmerne schopná akumulovať viac energie. V každej perióde dôjde k jej „nabitíu“ a následnému „vybitíu“ ako ďalšieho zdroja napätia zapojeného do série. Podľa zapojenia súčiastok v spínaných zdrojoch vieme získať na výstupe napätie nižšie („step-down“) alebo vyššie („step-up“) ako na vstupe zdroja [4].



Obr. 4. Schéma zapojenia DC-DC Step-up meniča [4].

5.1.3 Porovnanie a výhody jednotlivých spôsobov stabilizácie napätia

Oba vyššie uvedené spôsoby sú vhodné na naše účely a každý má svoje výhody a nevýhody. Zhrnutie týchto parametrov je uvedené v tabuľke nižšie:

Tab. 1. Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov [2]

parameter	lineárny zdroj	spínaný zdroj
účinnosť	30 [%]	75 [%]
veľkosť	0,05 [W/cm ³]	0,2 [W/cm ³]
merná hmotnosť	20 [W/kg]	100 [W/kg]
výstupné zvlnenie	5 [mV]	50 [mV]
šumové napätie	50 [mV]	200 [mV]
skoková odozva	20 [μs]	1 [ms]
nábežná doba	2 [ms]	20 [ms]
cena	rastie s výkonom	približne konštantná

Po zhodnotení všetkých výhod oboch druhov sme sa rozhodli pre nasledujúce kroky:

1. Vstupné napätie stabilizujeme lineárnym stabilizátorom napätia, pretože má jednoduché zapojenie obvodu, nízky šum ako aj nízku cenu súčiastok, ale hlavne pre jeho vysoké potlačenie vplyvu kolísania vstupného napätia.
2. Na zvýšenie napätia batérie na výstupné napätie použijeme spínaný stabilizátor napätia, ktorého účinnosť je násobne vyššia ako v prípade (kaskádovej) násobičky napätia či podobných obvodov.

5.2 Úschova/akumulovanie energie

Ako už bolo spomenuté, myslíme aj na uloženie získanej elektrickej energie na „horšie časy“. Litium-polymérové batérie je možné zakúpiť aj s tromi vývodmi, kde dva z nich slúžia na napájanie. Tretí vývod je pripojený k vstavanému termistoru, čo je typ teplotného senzora, ktorý mení odpor v závislosti od zmeny teploty.

Keď je lítiová batéria pripojená k nabíjačke alebo monitorovaciemu systému, teplotný snímač na treťom vývode môže poskytovať údaje o teplote v reálnom čase, aby sa zabezpečilo bezpečné nabíjanie a používanie batérie. Ak teplota batérie stúpne nad bezpečnú úroveň, nabíjačka alebo monitorovací systém môže prijať opatrenia na zabránenie prebitia alebo prehriatia batérie.

Takýto „monitorovací“ systém (obvody) v sebe zahŕňa integrovaný obvod TP4056.

TP4056 je kompletná lineárna nabíjačka s konštantným prúdom/konštantným napätím pre jeden článok lítium-iónovej batérie. Jeho SOP puzdro a nízky počet externých komponentov robia z TP4056 vhodnú lineárnu nabíjačku pre prenosné aplikácie. Tepelná spätná väzba reguluje nabíjací prúd, aby sa obmedzilo prílišnému zvýšeniu teploty batérie počas prevádzky s vysokým výkonom alebo vysokej okolitej teploty. Nabíjacie napätie je pevné (4,2 V) a nabíjací prúd môže byť naprogramovaný externe pomocou jediného odporu.

6 Prototyp zariadenia

Po navrhnutí obvodov sme zostrojili prototypy jednotlivých častí.

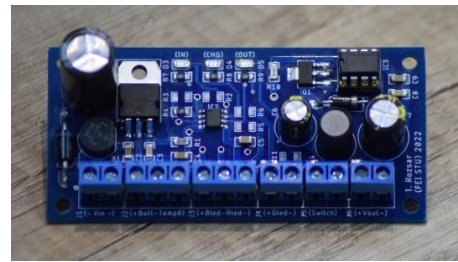
Pri testovaní dynamu sme si všimli fakt, že hoci je predávané ako „dynamo“, ide v skutočnosti o zdroj striedavého prúdu, nakoľko neobsahuje komutátor, čiže ide o alternátor. Klasickej žiarovky s (často) wolframovým vláknom to nevaďí, ale našim obvodom už áno.

Problémy v našom obvode nastali iba pri poslednej časti, kedy sme na riadenie (spínanie) tranzistora spínaného zdroja využili IC MAX608, ktorý potrebuje na spínanie výlučne tranzistor, ktorý uvádza výrobca. Nebol by to však problém, ak by zostrojienie zariadenia neprebiehalo v období najväčšej „čipovej krízy“. Podarilo sa nám však zohnať niekoľko kusov. Rozdiel medzi týmto tranzistorom (MMFT3055) a inými je vo výslednom maximálnom prúdovom zaťažení a od neho závislého výstupného napätia. Porovnanie závislosti veľkosti odoberaného prúdu a napätia nášho obvodu a komerčne dostupnými USB nabíjačkami uvedieme neskôr v grafe.

7 Výsledky

Problémy so vstupným striedavým napätím sme vyriešili použitím usmerňovača (v našom prípade v mostíkovom zapojení). Máme tak usmernené obe polvlny. Nevýhodou je galvanické oddelenie GND, čo môže spôsobiť rozdiel potenciálov GND našich obvodov a GND rámu bicykla v prípade, ak dynamo má GND vodivo spojené s rámom bicykla. Mohlo by tak dôjsť k poškodeniu nabíjaného zariadenia. Riešením je použiť dynamo, ktorého oba vývody sú izolované od úchyty, prípadne samotný úchyt odizolovať.

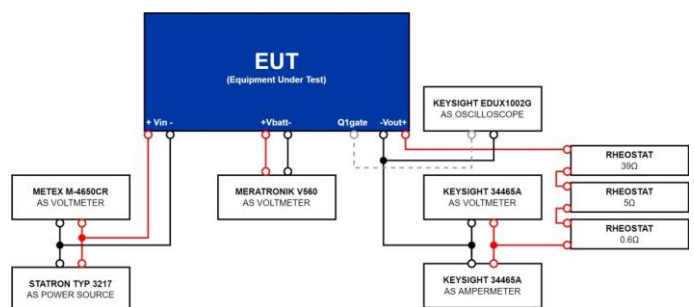
Po vyladení obvodu do stavu, kedy spĺňa naše očakávania sme navrhli, vyrobili a osadili finálnu dosku s plošnými spojmi (DPS).



Obr. 5. Vyrobená DPS s osadenými súčiastkami [4].

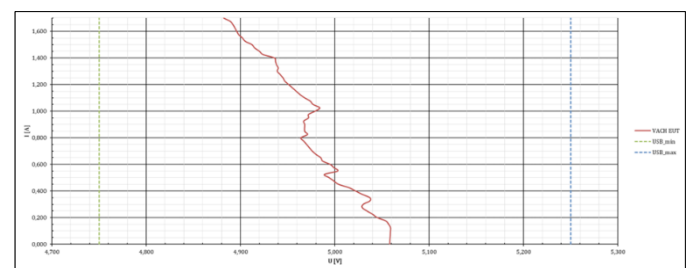
7.1 Testovanie a meranie vlastností zostrojeného zariadenia

Bloková schéma výsledného komplexného merania je znázornená na Obr. 6.



Obr. 6. Bloková schéma zapojenia prístrojov počas výsledného merania [4].

Začali sme zmeraním závislosti výstupného napätia a odoberaného prúdu, kde sme v grafe zobrazili aj minimálnu a maximálnu hodnotu napätia USB, teda 4,75 V a 5,25 V.



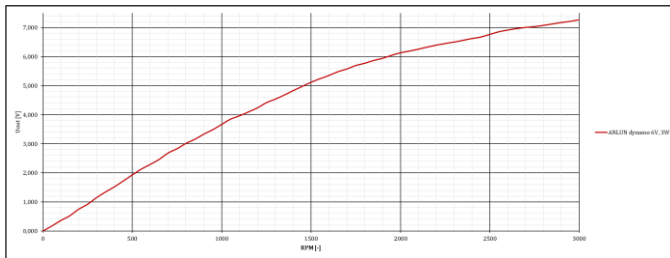
Obr. 7. Závislosť výstupného napätia prototypu a odoberaného prúdu na výstupe [4].

Výstupné napätie je v celom rozsahu odoberaného prúdu 0 – 1,5 A v tolerancii USB napätia. Výstupné obvody sú teda plne funkčné a pristúpili sme k nameraniu závislosti generovaného napätia od otáčok dynamu.



Obr. 8. Meranie závislosti generovaného napätia od frekvencie otáčok dynamu [4].

Otáčky dynamu sme postupne zvyšovali v intervale $RPM_D = 0 \sim 3000$ ot./min⁻¹ s krokom 50 ot./min⁻¹, ktoré sme kontrolovali pomocou otáčkomeru.



Obr. 9. Závislosť výstupného napätia dynamu ANLUN od rýchlosti otáčok za minútu [4].

Pre prepočet otáčok za minútu na otáčky za sekundu (teda frekvenciu otáčania) platí vzťah

$$RPS = f = \frac{\text{ot./min}^{-1}}{60} \quad (3)$$

Taktiež potrebujeme určiť obvod „hlavice“ dynamu a obvod kolesa vo vzdialenosti od jeho osi, kde sa dotýka dynamo, aby sme vedeli vypočítať pomer otáčok kolesa bicykla k otáčkam dynamu. Na výpočet obvodu použijeme všeobecný vzťah

$$o = 2\pi r = \pi d \quad (4)$$

Obvod dynamu je $o_D = 5,696$ cm a obvod kolesa použitého bicykla vo vzdialenosti od osi otáčania $r_{B-mid} = 30$ cm (kde sa dynamo dotýka kolesa) $o_{B-mid} = 188,495$ cm. Výpočtom sme taktiež získali vonkajší obvod kolesa ($o_{B-ext} = 205,774$ cm), čo predstavuje prejdenu vzdialenosť bicykla pri 1 otočení kolesa. Aby sme pri tejto vzdialenosti mohli určiť počet otočení dynamu, potrebujeme určiť prevodový pomer i_{B-D} ako

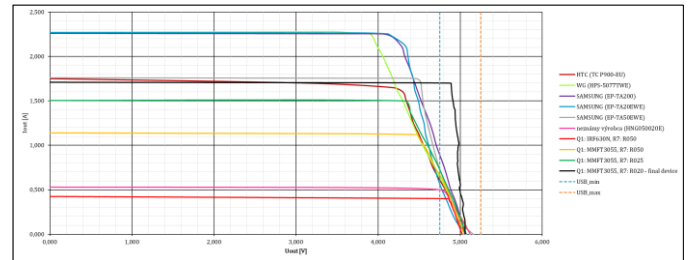
$$i_{B-D} = \frac{o_{B-mid}}{o_D} = \frac{188,495 \text{ cm}}{5,696 \text{ cm}} = 31,579 \quad (5)$$

Ak teda podľa parametrov zostrojeného zariadenia (nabíjačky) potrebujeme pre správnu činnosť na výstupe dynamu napätie U_{Dout_min} minimálne o hodnote 6,6 V, potrebujeme, aby sa bicykel pohyboval rýchlosťou najmenej

$$v_{B_min} = \frac{f_{D_min} \cdot o_{B-ext}}{i_{B-D}} = \frac{40 \text{ s}^{-1} \cdot 205,774 \text{ cm}}{31,579} \quad (6)$$

$$v_{B_min} = 260,65 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

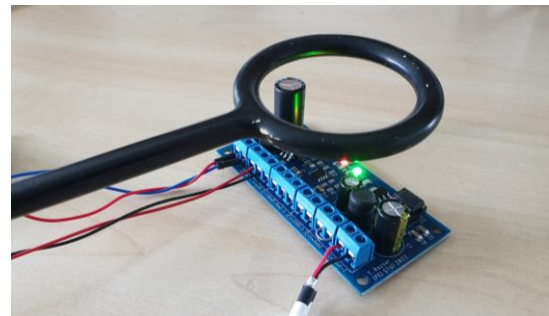
Pre porovnanie, priemerná rýchlosť chôdze človeka je $\approx 4,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ [5], čo je $\approx 1,333 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Stačí sa teda bicyklovať približne dvakrát rýchlejšie ako je priemerná rýchlosť chôdze.



Obr. 10. Porovnanie VACH dostupných USB nabíjačiek, zostrojených prototypov a výsledného zariadenia [4].

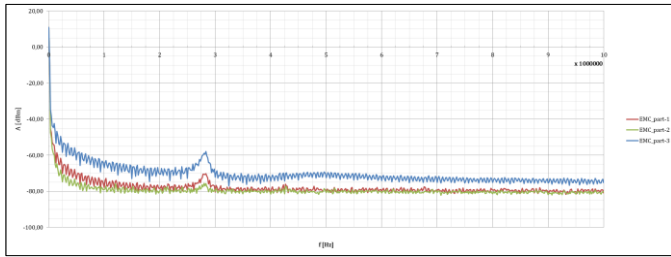
Výsledné zariadenie bolo pôvodne dimenzované na výstupný prúd maximálne 1,5 A. Podľa meraní je však zdroj stabilný ešte aj pri 1,6 A. Vzhľadom na voľne dostupné komerčné nabíjačky naša nabíjačka poskytuje USB napätie v tolerancii po celom rozsahu odoberaného prúdu.

Keďže sme v obvode použili aj spínané prvky, rozhodli sme sa na záver zmerať aj vyžarovanie zariadenia z hľadiska EMC.



Obr. 11. EMC meranie pomocou spektrálneho analyzátoru a sondy [4].

Meranie sme sa snažili robiť pri reálnych podmienkach, t. j. pri takých, pri akých bude zariadenie používané – s pripojeným zdrojom napätia a batériou, zopnutým spínačom či pripojenou záťažou s USB rozhraním. Taktiež sme prívodné vodiče zo zdroja či vodiče z batérie zakrútili, čím sme z nich vytvorili „krútenú dvojlinku“, aby sme minimalizovali externý vplyv elektrického prúdu vo vodičoch pri EMC meraní. Začali sme meraním EMC vyžarovania nad lineárnym stabilizátorom napätia (LSN) a jeho (vstupnými) obvodmi. Nasledovalo meranie nad nabíjacím čipom TP4056 a k nemu prislúchajúcimi súčiastkami/obvodmi. Posledné parciálne meranie sme uskutočnili nad DC-DC meničom.



Obr. 12. Závislosť amplitúdy vyžarovania troch častí obvodov DPS od frekvencie [4].

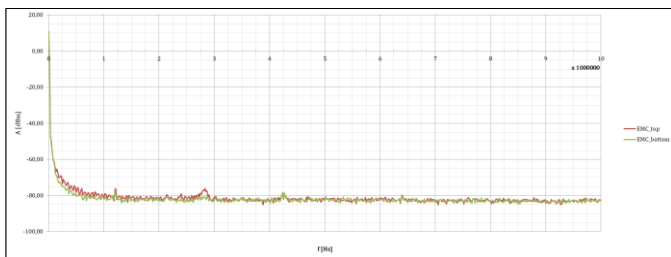
Ako sme mohli očakávať, najvýraznejšie EMC vplyvy v amplitúde sme si mohli všimnúť na tretej časti obvodu, teda pri cievke a DC-DC meniči, kde amplitúda (prenos) je vzhľadom na šumové prostredie vyššia o približne 12 dBm. Využitím vzťahu na konverziu prenosu A z dBm na W

$$P_{(W \cdot m^{-2})} = \frac{1 \text{ W} \cdot 10^{\frac{P_{(dBm \cdot m^{-2})}}{10}}}{1000} \quad (7)$$

po úprave a dosadení získavame prenos nad DC-DC meničom vo Wattoch rovný približne

$$P_{(W \cdot m^{-2})} = 0,0158 \text{ W} \cdot m^{-2} = 15,8 \text{ mW} \cdot m^{-2} \quad (8)$$

Graf na Obr.13 zobrazuje závislosť vyžarovaného elektromagnetického poľa v dBm od frekvencie v Hz, ktorú sme získali pomocou sondy umiestnenej 5 cm nad (pod) celou DPS. V týchto prípadoch bol prenos A (teda nežiaduce „vyžarovanie“ do prostredia) nad DPS vzhľadom na šumové prostredie už násobne nižší a to približne o polovicu. Prenos bol teda vo výške 5 cm nad DPS už iba okolo 6 dBm, čo je použitím vzťahu (7) približne iba 3,981 mW/m². V prípade sondy v rovnakej vzdialenosti pod DPS už bol prenos skoro na úrovni šumového prostredia a nebol väčší ako 1 dBm (1,259 mW/m²). Je tak preto, že nevyužitá spodná vrstva DPS bola pripojená na GND.



Obr. 13. Závislosť amplitúdy vyžarovania DPS zhora a zdola od frekvencie [4].

8 Konštrukcia krytu

Poslednou časťou zariadenia je vyhotovenia krytu (krabice) s návrhom obalu. Krabica je vyrobená z plastu (ABS) a sú v nej osadené LED diódy indikujúce stavy zariadenia, USB konektor s krytkou a z boku je spínač na pripojenie batérie k výstupným obvodom (zapnutie spínaného zdroja).

Krabička je po zoskrutkovaní oboch dielov vodeodolná, na kolískový spínač pridáme gumený kryt, ako aj gumené tesnenia na/vo vývodke. LED diódy sú pevne a vodeodolne

vložené do vrchného krytu a USB konektor je taktiež vodeodolný s gumenými tesneniami s krytím IP65. Môžeme teda deklarovať, že výsledné zariadenie uložené v kryte je vodeodolné. Avšak maximálny stupeň vodeodolnosti/ /vodotesnosti je možné určiť až po (certifikovaných) skúškach vodotesnosti.



Obr. 14. Výsledné zariadenie uložené v kryte s potlačou [4].

9 Záver

Navrhli sme a zrealizovali nabíjačku akumulátorov s USB výstupom, ktorej zdroj napätia je dynamo. Vstupné obvody obsahujú aj usmerňovač, čím je zariadenie vhodné aj pre napájanie z alternátora.

Vstavaná LiPo batéria je dobíjaná aj pri nízkej rýchlosti testovaného bicykla, a to už od rýchlosti 2,6 m/s.

Zariadenie taktiež absolvovalo EMC testy, kde sme si mohli všimnúť iba veľmi slabé vyžarovanie magnetického poľa do prostredia spôsobené prevažne obvodmi DC-DC meniča. Riešením, ako (ďalej) znížiť toto vyžarovanie, by mohlo byť pripojenie aj nevyužitej hornej vrstvy na zemiaci potenciál (GND) alebo v maximálnej možnej miere zmenšiť vzájomnú vzdialenosť súčiastok. Tento krok by však niekoľkonásobne sťažil manuálnu prácu pri osadzovaní súčiastok na dosku s plošnými spojmi.

Aj napriek obmedzeniam (s dostupnosťou súčiastok), s ktorými sme sa stretli pri realizácii zariadenia, nám do budúca stále zostáva veľký priestor na vylepšenie vlastností, parametrov obvodov nabíjačky, rozmerov DPS či použitie doplnkových solárnych panelov na bicykli alebo rekuperácie.

Literatúra

- [1] < https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/e/e1/Renewable_energy_2022_infogra_phic.jpg >
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. 1997. *Napájecí zdroje I: základní zapojení analogových a spínacích napájecích zdrojů*. 2. vyd. Praha: BEN - Technická literatura, 1997. 351 s. ISBN: 80-86056-02-3
- [3] < <https://components101.com/sites/default/files/components/Voltage-regulators.jpg> >
- [4] RÓZSAR, Tibor. *USB nabíjačka napájaná dynamom* [bakalárska práca] Slovenská technická univerzita v Bratislave: Fakulta elektrotechniky a informatiky; Ústav elektrotechniky. Vedúci práce: prof. Ing. Vladimír Jančárik, PhD. Bratislava: FEI STU, 2022. 59 s.
- [5] < <https://fitness.cvict.sk/fitness-1/zakladom-pohybu-je-ch-dza> >

Merací systém intenzity osvetlenia pre účely skúšobníctva EMC

Bc. Dominik Galdun

¹ Ústav elektrotechniky, FEI STU v Bratislave
FEI

xgaldun@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca je zameraná na návrh a konštrukčné vyhotovenie prototypu zariadenia, ktoré je schopné merať intenzitu osvetlenia v priestore s veľkým elektromagnetickým (EM) poľom. Využitie takeého meracieho zariadenia je napr. pre účely skúšobníctva v oblasti EMC. V závere práce sú opísané typové skúšky merača intenzity osvetlenia podľa príslušných noriem EN a ISO.

1 Úvod

Podnet na riešenie tejto problematiky nám dali vedeckí a skúšobní pracovníci laboratória EMC na FEI STU, ktorí vykonávajú typové skúšky svietidiel určených pre rôzne technické prostredia podľa medzinárodných noriem [1], [2]. Súčasťou týchto skúšok je aj skúška odolnosti voči EM poľu, kde sa pri ožiarení príslušným EM poľom overuje ich funkčnosť.

Doteraz sa funkčnosť svietidiel počas skúšky overovala tak, že intenzitu svetla monitoroval skúšobný technik pomocou kamerového systému. Išlo o zdĺhavé a pre meracieho technika únavné monitorovanie funkčnosti svietidla, pri ktorom sa navyše zvyšovalo riziko chybného vyhodnotenia. Ďalším nedostatkom bolo, že ľudským okom sa cez kamerový systém nedal vždy presne rozlíšiť mierny pokles intenzity osvetlenia voči referenčnej úrovni.

Našou úlohou bolo navrhnuť zariadenie, ktoré bude samostatne plniť tieto úlohy a umožní tak testovací proces automatizovať. Vzhľadom na špecifické požiadavky musí konštrukčný návrh zohľadňovať extrémnu odolnosť voči EM poľu, kompaktné rozmery a nesmie mať žiadne metalické spojenie (pre prenos meraných dát, napájanie, ...) aby nedošlo k ovplyvneniu homogenity EM poľa v tienenej kabíne.

2 Normy pre skúšky odolnosti voči EM poľu

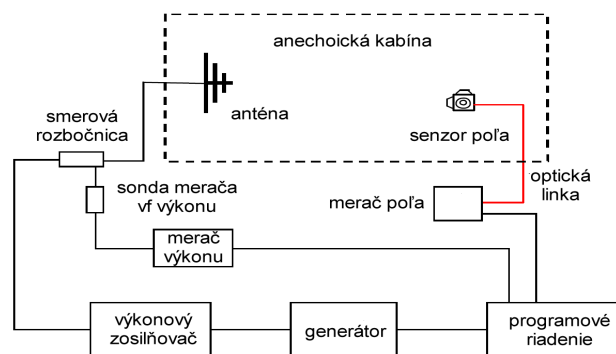
Všeobecne platí, že požiadavky na svietidlá sa posudzujú hlavne podľa prostredia, kde sa nachádzajú, používajú alebo kde sa predpokladá ich použitie. Ďalej si názorne v tabuľkách ukážeme, čo nám predpisujú normy v jednotlivých prostrediach. Pre bytové prostredie je určená výrobková norma EN IEC 61547, ktorá nám popisuje požiadavky na odolnosť svietidiel. Odvoláva sa na príslušné základné normy v našom

prípade na normu EN IEC 61000-4-3. Svietidlá musia zniesť pole 3 V/m vo frekvenčnom rozsahu (80 až 1000) MHz bez ovplyvnenia ich funkcie. V prostredí železníc sa EMC venuje norma EN 50121-3-2 (a aj ďalšie normy), ktorá sa znovu odvoláva na základnú normu EN IEC 61000-4-3 avšak požaduje sa oveľa vyššia prísnosť skúšky (Tab. 1).

Tab.1: Prísnosť skúšky voči EM poľu v prostredí železníc

EN 61000-4-3	20 V/m; (80 ÷ 1000) MHz; AM
	10 V/m; (1,4 ÷ 2,0) GHz; AM
	5 V/m; (2,0 ÷ 2,7) GHz; AM
	3 V/m; (5,1 ÷ 6,0) GHz; AM

Základná norma EN IEC 61000-4-3 podrobne opisuje skúšku odolnosti voči vyžarovanému EM poľu. Skúška pozostáva z dvoch krokov. Z kalibrácie a samotnej imunitnej skúšky. Pri kalibrácii kalibrujeme oblasť homogénneho EM poľa. Kalibrácia je potrebná raz za rok, po každom zásahu do tienenej kabíny alebo, ak sa zmení testovacia technika. Cieľom kalibrácie je zabezpečiť, aby vo vertikálnej rovine poľa UFA (bez EUT) bolo pole požadovanej intenzity do prípustnej nehomogenity. Pre kalibráciu je potrebné zostaviť pracovisko. Tam, kde sa testuje zariadenie je uložená širokopásmová (všesmerová) sonda elektrickej zložky EM poľa. Intenzita poľa musí byť 1,8-krát vyššia ako intenzita použitá pri skúške. Je to z dôvodu zabezpečenia linearoty výkonového zosilňovača tak, aby sa spracoval modulovaný signál bez prebudenia výkonového zosilňovača. Nastavenie sa vykonáva v celom frekvenčnom pásme s príslušným frekvenčným krokom a pre vertikálnu a horizontálnu polarizáciu vysielacej antény. Pracovisko pre kalibráciu môžeme vidieť na obrázku 1.



Obr. 1: Pracovisko pre kalibráciu EM poľa [1]

Výstupom tejto kalibrácie sú hodnoty budiacich výkonov pre jednotlivé frekvencie a obe polarizácie antény.

Samotná skúška odolnosti je vykonávaná tou istou aparátúrou. Signálová amplitúda je daná hodnotami získanými pri kalibrácii. Frekvencia EM poľa je zvyšovaná s krokom 1% celého frekvenčného pásma. Norma stanovuje minimálny čas pol sekundy zotrvania na jednotlivých frekvenciách, minimálne však jeden pracovný cyklus testovaného zariadenia. Merací technik musí priebežne overovať funkčnosť testovaného zariadenia v našom prípade svietidla. V tom mu má účinne pomôcť predkladaný merací systém intenzity osvetlenia.

Pri automobilovom prostredí je pre odolnosť voči EM poľu základná norma ISO 11452-2, definuje usporiadanie skúšobného stanovišťa a určuje jednotlivé stupne prísnosti skúšok (Tab. 2). Na ňu a ďalšie základné normy ISO potom nadväzujú príslušné normy jednotlivých výrobcov automobilovej techniky. Jednotliví automobiloví výrobcovia môžu mať prísnejšie požiadavky, ako príklad možno uviesť normu Volvo STD 515-0003.

Tab.2: Prísnosť skúšky voči EM poľu pre automobilové prostredie [2]

LEVEL	Hodnota V/m
I	25
II	50
III	75
IV	100

3 Návrh a realizácia prototypu

Zariadenie na zaznamenanie zmeny intenzity osvetlenia pre svietidlá musí spĺňať nasledujúce požiadavky:

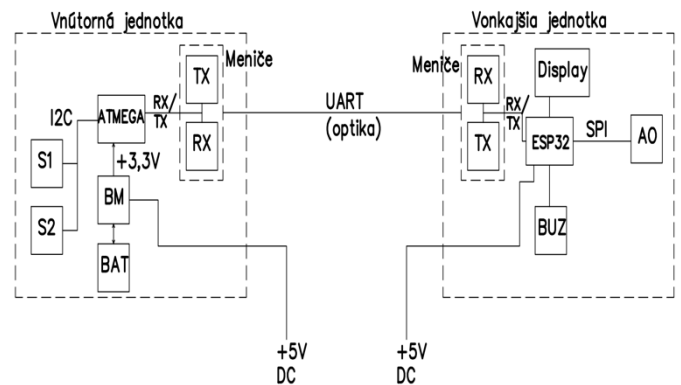
- rýchlosť odozvy niekoľko vzoriek za sekundu,
- maximálna intenzita nad 10000 lux,
- ideálne lineárna odozva,
- minimálne jeden merací senzor, nie je potrebná smerová charakteristika,
- intenzita EM poľa minimálne 100 v/m,
- odolnosť do 6 GHz,
- mechanická kompaktnosť
- nezávislé napájanie s výdržou minimálne 1/2 dňa až deň,
- prenos signálu cez optické vlákno.

Užívateľský interface musí taktiež obsahovať:

- analógový výstup 0 až 5 voltov úmerný intenzite svetla,
- digitálny výstup rs232,
- numerická indikácia
- upozornenie pri prekročení hraničnej hodnoty,
- možnosť nastavenia konfiguračných parametrov.

Na základe požiadaviek sme navrhli koncept vnútornej a vonkajšej jednotky. Tie budú medzi sebou komunikovať optickým vláknom. Nabíjanie / napájanie jednotiek je riešené 5 V DC. Vnútrošná jednotka bude na základe príkazu od vonkajšej jednotky prijímať konfiguračné nastavenia a posielat

späť výsledné a spracované údaje. Na obrázku (2) vidíme principiálnu blokovú schému.



Obr. 2: Bloková schéma

Legenda:

- S1, S2 – senzory svetla,
- BAT – batéria,
- BM – Batériový manažér systém,
- ATMEGA – mikrokontrolér,
- ESP32 – vývojová doska
- RX, TX – meniče elektro – opto a opačne,
- BUZ – zvuková signalizácia,
- AO – analógový výstup 0 – 5V s BNC konektorom,

Kľúčové súčiastky pre túto prácu sme vyberali podľa vlastností a hlavne podľa dostupností u dodávateľa. Dôležité bolo vybrať správne meniče so správnym konektorom. Vybrali sme vysieláč HFBR-1412TZ a prijímač AFBR-2418TZ s BNC konektorom pre optické vlákno. Batériový manažment systém (ďalej BMS) musel nabíjať batériu, kontrolovať jej teplotu (v prípade prehriatia vypnúť celý systém) a dodávať 3,3 V výstupné napätie. To celé sa musí dať riadiť cez tlačidlo, ktoré obvod zapína a vypína. Požiadavkám vyhovoval LTC3554EUD-1PBF. Senzory sme vybrali dva a to OPT3005DTSR (ďalej OPT) a VEML6031X00 (ďalej VEML). Obe sú schopné merať osvetlenie nad požadovaný rozsah, majú piny prerušenia a na komunikáciu používajú I2C. Okrem I2C komunikácie sme použili sériovú UART komunikáciu (medzi jednotkami) a SPI pre analógový výstup. Ten môže mať na výstupe 0 až 5 voltov v závislosti od osvetlenia a nastaveného rozsahu. V oboch jednotkách je použitá 3,3 voltová sústava. Vo vonkajšej jednotke spracováva napájacie napätie priamo step – znižujúci menič na doske mikrokontroléra a na vnútornej jednotke sa o všetko stará BMS. Ten batériové napätie príslušným meničom konvertuje na požadované napätie. Batéria jednotky zabezpečí nezávislosť od napájania. Vonkajšia jednotka bude obsahovať tlačidlá a otočný enkodér pre rýchly a pohodlný pohyb v MENU.

Principiálne zariadenie funguje nasledovne: po zapojení a spustení je potrebná konfigurácia senzorov. Po navolení konfiguračných nastavení, vonkajšia jednotka posielá cez optické vlákno zakódované príkazy vnútornej jednotke. Tá to spracuje a následne pošle informáciu príslušnému senzoru. Ten urobí potrebné meranie alebo merania a pošle naspäť hodnotu osvetlenia. Jednotka informáciu spracuje a následne posielá späť hodnotu aj s identifikátorom. Jednotka okrem informácií osvetlenia posielá aj hodnotu napätia batérie. Batériové napätie

požíva napätie väčšie ako logický článok (3,3V). Vyriešili sme to zmenšením napätia napät'ovým deličom (kvôli spotrebe sme zvolili veľké odpory).

Dôležité je si uvedomiť to v akom prostredí bude vnútorná jednotka a aké pole bude musieť znášať. EM tienenie je dôležitý odrušovací prostriedok, ktorý nám zvýši odolnosť zariadenia zoslabením intenzity elektromagnetického poľa. Pri návrhu tienenia je potrebné posúdiť jeho účinnosť SE. Tento parameter je logaritmickou mierkou koeficientu tienenia K_S , ten je u elektrického poľa daný pomerom intenzity poľa v určitom bode za tienením, k intenzite ktorá dopadá na povrch tieneneho materiálu.

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} \quad (1)$$

V prípade logaritmickkej miery pre koeficient tienenia platí vzťah:

$$SE = 20 \cdot \frac{1}{|K_S|} \quad (2)$$

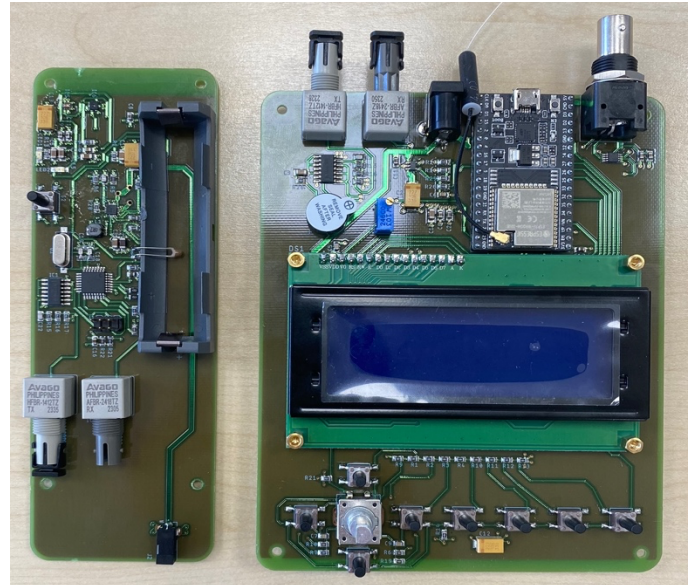
Tienenie sa posudzuje buď pre blízke alebo vzdialené pole. V prípade vzdialeného aj blízkeho poľa je výsledná účinnosť tienenia daná súčtom jednotlivých útlmov a to útlm odrazom R, absorbný útlm A a útlm vplyvom mnohonásobných odrazov M. Vzťahy pre jednotlivé útlmy sú dané podľa toho aké pole posudzujeme [3].

$$SE = R + A + M [dB] \quad (3)$$

Tab.3: Kategorizácia účinnosti tienenia [4]

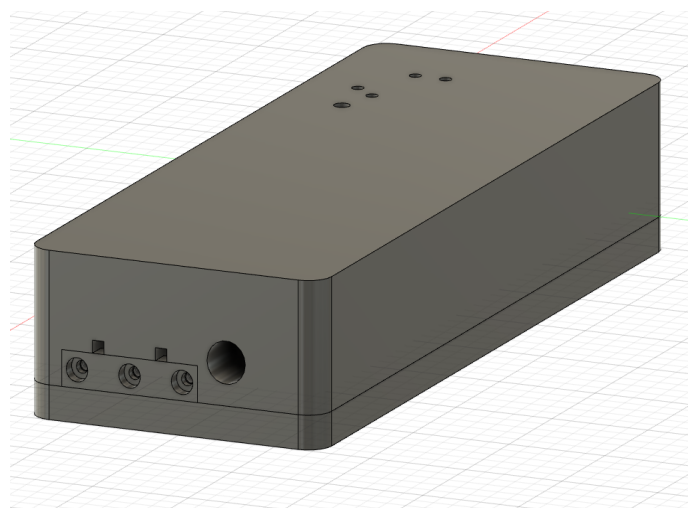
Nedostatočné tienenie	0 - 10 dB
Tienenie pre minimálne požiadavky	10 - 30 dB
Tienenie dostačujúce pre väčšinu bežných požiadaviek	30 - 60 dB
Veľmi dobré tienenie	60 - 90 dB
Vysoko kvalitné tienenie	90 - 120 dB

Pre našu aplikáciu bolo potrebné aby útlm poľa bol väčší 30 dB. Návrh tienenej skrinky a DPS prebiehal súčasne. Po uložení súčiastok v programe sme určili výsledné rozmery. Všetky hrany boli zaoblené (R6 polomer), kvôli technicko – výrobným limitom výrobného zariadenia.

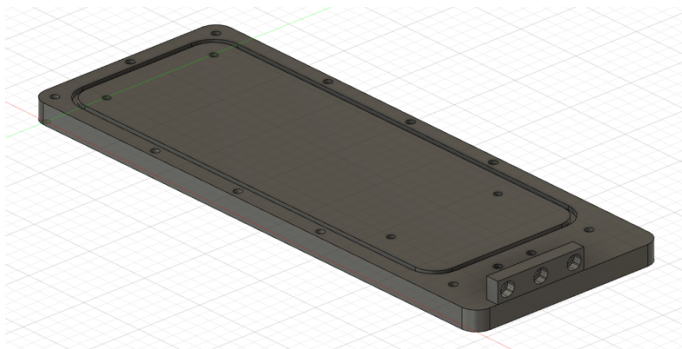


Obr. 3: Navrhnuté DPS jednotiek

Skrinku neodporúčame zemniť, a to kvôli novej deformácii poľa. To by bolo v rozpore so zadaním úlohy, ktoré sme dostali. Jediné účinné opatrenie, ktoré sme zvolili bolo pasívne tienenie. Podľa hĺbky vniku vieme, že požiadavku na ochranu elektroniky sme splnili mnohonásobne. Problém so spojom, kde sa spájajú časti sme riešili väčším počtom skrutiek a elektromagnetickým tesnením. Otvory sme navrhovali tak, aby spĺňali takzvaný princíp stratového vlnovodu. V princípe, ak je priemer okrúhlej diery rovnaký ako hrúbka tienenia, vonkajšie pole bude prechodom cez vlnovod potlačené o 20 dB. Ak je hrúbka tieneneho materiálu dvakrát taká ako priemer diery, potlačenie poľa bude 40 dB. Pre našu aplikáciu je 40 dB postačujúcich.



Obr. 4: Finálna krabica

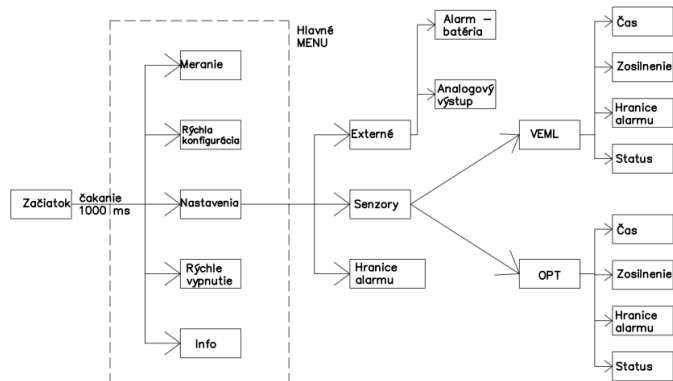


Obr. 5: Finálna krabica – vrch

Na obrázku 3 vidíme aj drážku pre už spomínané tesnenie. Treba poznamenať, že na túto krabicu bol použitý väčší počet skrutiek ako sa bežne používa. Je to kvôli zabráneniu vniku EM vlny do vnútra cez spoje.

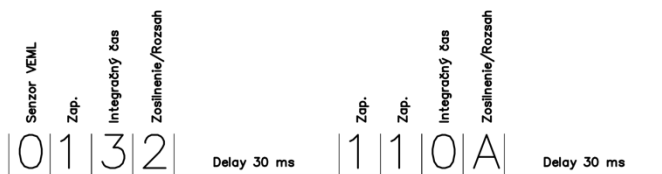
4 Firmware

V tomto zariadení sa používajú tri typy komunikácií. SPI komunikácia slúži na výstup údajov vonkajšej jednotky externému zariadeniu (osciloskop, multimeter,...). Je tu použitý BNC konektor na výstup a pred ním používame digitálny - analógový prevodník, ktorý pracuje cez SPI komunikáciu. Druhým typom komunikácie je UART komunikácia cez sériovú linku. Táto komunikácia slúži na komunikáciu medzi vonkajšou a vnútornou jednotkou. Keďže používame vysielateľ na konverziu elektrického signálu na optický, ktorý potrebuje mať budený signál, zvolili sme si ho budiť NAND hradlami. To ako sa neskôr ukázalo viedlo k invertovaniu spôsobu komunikácie. Vyriešili sme to softwarovo a to zmenou parametra. Keďže sme si vytvorili na vonkajšej jednotke vlastné RX/TX piny, na obrátenie polarity čítania a zapisovania stačila zmena už spomínaného parametra. Na vnútornej jednotke nebol tým pádom potrebný zásah do spôsobu komunikácie. Posledná komunikácia používaná v tejto práci je paralelná I2C komunikácia. Tá vo vnútornej jednotke slúži na komunikovanie senzorov s mikrokontrolerom. Vonkajšia jednotka má jednoduché menu, kde sa môžu nastaviť konfiguračné parametre. Kvôli univerzálnosti je v angličtine.



Obr. 6: Blokovaná schéma Menu vonkajšej jednotky

Na rýchle meranie slúži quick config. Tu sa nastavujú základné vopred nastavené parametre, na oživenie senzorov a následné meranie. Pri voľbe settings v main menu vieme samy nakonfigurovať senzor a nastaviť upozornenia. Shut down slúži na urýchlené vypnutie senzorov a po voľbe measure vstúpime do okna hlavného merania, kde vidíme hodnoty a aktivuje sa analógový výstup. Po každom nastavení alebo konfigurácii musíme stlačiť tlačidlo, ktoré posielajú zvolené konfiguračné parametre.



Obr. 7: Príklad komunikácie

Jednotlivé príkazy sa posielajú ako znakový reťazec. Kódujeme to takzvaným hexadecimálnym kódom. Ako vidieť na obrázku 7. Najprv posielame zakódované parametre pre prvý senzor a o 30 milisekúnd pre druhý senzor. Tabuľky príkazov pre oba senzory môžeme vidieť v tabuľkách 4 a 5.

Tab.4: Príkazy pre prvý senzor

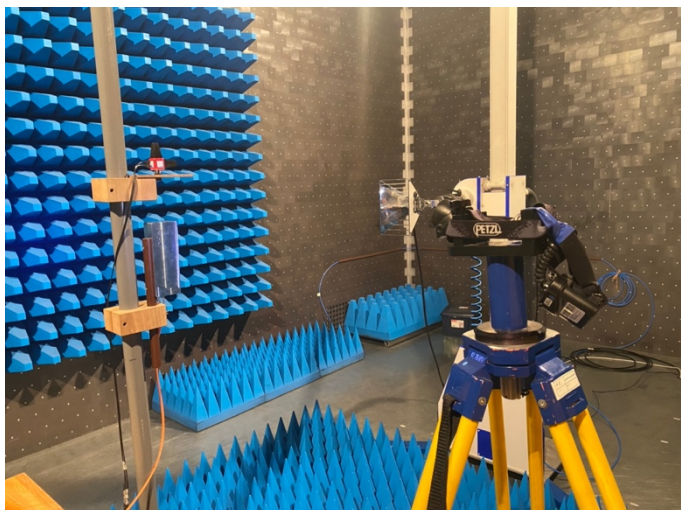
S1: VEML	KÓD	HODNOTA	JEDNOTKA
ČAS	0	3,125	ms
	1	6,25	ms
	2	12,5	ms
	3	25	ms
	4	50	ms
	5	100	ms
	6	200	ms
	7	400	ms
Zosilnenie / rozsah	0	x1	-
	1	x2	-
	2	x0,66	-
	3	x0,5	-

Tab.5: Príkazy pre druhý senzor

S2: OPT	KÓD	HODNOTA	JEDNOTKA
ČAS	0	100	ms
	1	800	ms
Zosilnenie / rozsah	0	81,9	-
	1	163,8	-
	2	327,6	-
	3	655,2	-
	4	1310,4	-
	5	2620,8	-
	6	5241,6	-
	7	10483,2	-
	8	20966,4	-
	9	41932,8	-
	A	83865,6	-
B	167731,2	-	

5 Testovanie a výsledky

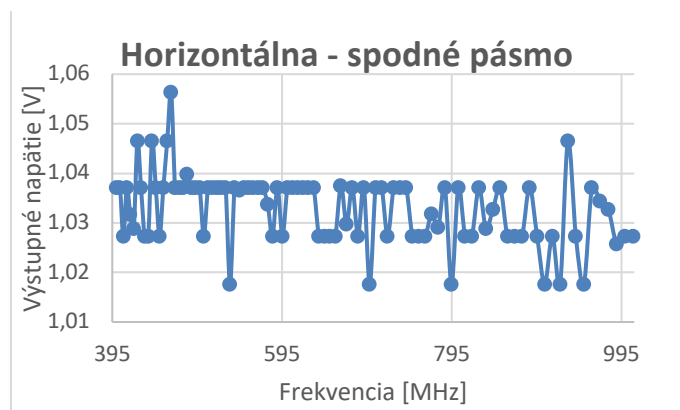
Najprv sme si overili funkčnosť jednotlivých obvodových blokov v meracej a aj vo vyhodnocovacej jednotke. Overili sme napájacie a signálové cesty, tj. správne hodnoty napätí v dôležitých uzloch obvodovej schémy. Následne v nadväznosti na vyvíjaný firmware sme overili jeho správnu funkciu vzhľadom na vývojový diagram firmware. Overili sme prenos celého meracieho reťazca s využitím LED svietidla.



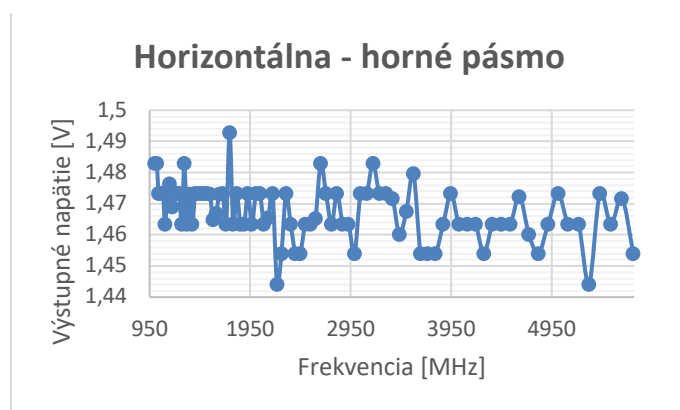
Obr. 8: Meranie v EMC komore

Ďalej sme testovali meracie zariadenie v EM poli v tienenej kabíne laboratória EMC. Počas prevádzky sme meracie zariadenie ožarovali EM poľom v celom frekvenčnom pásme, kde sa predpokladá jeho využitie (80 MHz – 6 GHz)

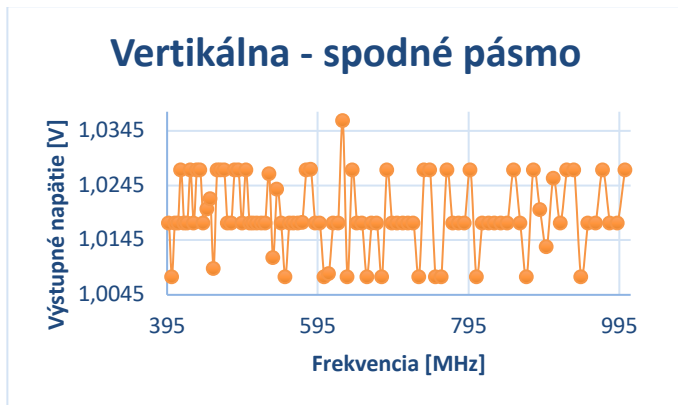
a s maximálnou intenzitou EM poľa, ktorú je momentálne EMC laboratórium schopne dosiahnuť (okolo 100 V/m, kde v niektorých častiach frekvenčného pásma boli odchýlky maximálne +/- 6 dB). Po ožarovaní meracieho zariadenia bez osvetlenia sme následne použili referenčné svietidlo, o ktorom sme vedeli, že spoľahlivo pracuje v príslušnom EM poli a sledovali sme, či nedošlo k chybnému meraniu intenzity osvetlenia meranej predmetným meracím zariadením. Ukázalo sa, že merací systém nie je citlivý na vyžiarené EM pole príslušnej intenzity. Isté doladenie systému je potrebné z hľadiska merania intenzít osvetlenia rôznych zdrojov, ktoré sa štandardne testujú, čo zahŕňa pomerne široký rozsah intenzít. Príkladáme aj výsledné grafy. Pre horizontálnu a vertikálnu konfiguráciu v spodných a vrchných pásmach. Dodávame, že kolísanie nebolo väčšie ako 1%. Na základe tohto výsledku zhodnocujeme, že počas merania nebol pokles ani výpadok osvetlenia zaznamenaný.



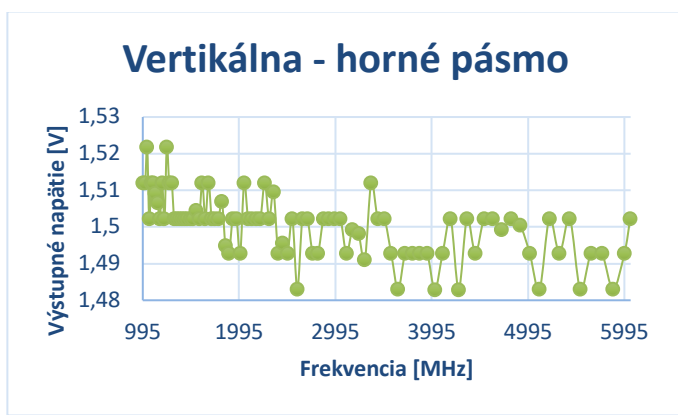
Obr. 9: Graf výsledkov pre spodné pásmo v horizontálnej konfigurácii



Obr. 10: Graf výsledkov pre horné pásmo v horizontálnej konfigurácii



Obr. 11: Graf výsledkov pre spodné pásmo vo vertikálnej konfigurácii



Obr. 12: Graf výsledkov pre horné pásmo vo vertikálnej konfigurácii

6 Záver

Navrhli a realizovali sme meracie zariadenie podľa požiadaviek zadávateľa. Možno konštatovať, že merací systém spĺňa požiadavky zadávateľa. Merací systém môže byť užitočný pri odstránení manuálneho vyhodnocovania správania sa osvetľovacích telies pri skúškach odolnosti voči EM poľu. To prináša zjednodušenie a urýchlenie práce meracieho technika.

Ak si uvedomíme, že test odolnosti vyžarovaným rušením je jeden z najdôležitejších a najčastejšie vykonávaných testov v Laboratóriu EMC na FEI STU, potom prínos dosiahnutý používaním tohto meracieho systému môže byť značný.

Pod'akovanie

Moje úprimné pod'akovanie patrí Ing. Jozefovi Hallonovi PhD. za odborný dohľad, cenné rady a skúsenosti. Firme Q-PRODUCTS, ktorý vyrábali tienenu skrinku a asistovali pri osádzaní plošných spojov. Ďalej vďaka patrí aj Bc. Petrovi Kubáňovi, ktorý nezištne obetoval nemalé množstvo času a energie pri pomoci s návrhom skriniek oboch jednotiek.

Samostatne by som sa chcel srdečne poďakovať aj Mgr. Kataríne Šušmákovéj, ktorej morálna podpora dopomohla ku vzniku tejto práce.

Literatúra

- [1] STN EN IEC 61000-4-3:2020 Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Časť 4-3: Metódy skúšania a merania. Skúška odolnosti voči vyžarovanému vysokofrekvenčnému elektromagnetickému poľu
- [2] ISO 11452-2:2019 Road vehicles Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy. Part 2: Absorber-lined shielded enclosure
- [3] NOVÁČEK, Z., Generování a snímání elektromagnetického pole při měření útlmu stínění. Závěrečná a výzkumná správa, 2004
- [4] HANUS, S., SVACINA, J., Vysokofrekvenčná a mikrovlnná technika. Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií. Skriptum VUT v Brně, 2002

Sekcia 5

Jadrové a fyzikálne inžinierstvo

Štatistický klasický a kvantový opis zrážky dvoch častíc

Roman Michelko¹, Peter Bokes¹

¹Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Slovenská Republika

xmichelko@stuba.sk, peter.bokes@stuba.sk

Práca je venovaná klasickému štatistickému opisu sústavy s štatisticky zadanou počiatočnou podmienkou a kvantovému opisu identicky zadanej sústavy. V jednorozmernom prípade sústavy dvojice častíc interagujúcich krátkodosahovými silami je možné na základe východísk štatistickej mechaniky nájsť analytické riešenie klasického problému. Obdobný problém je možné sformulovať a vyriešiť prostredníctvom formalizmu kvantovej mechaniky. Identifikáciou kľúčových parametrov je možné v súlade s princípom korešpondencie a klasickej limity kvantovej mechaniky dosiahnuť porovnateľné výsledky na základe klasického a kvantového prístupu.

1 Úvod

Opis dynamiky pružného rozptylu v jednoduchých fyzikálnych sústavách predstavuje v súčasnej fyzike dôležitú úlohu rovnako v rámcoch klasickej aj kvantovej teórie. Konkrétnym príkladom takejto úlohy je jednorozmerná konzervatívna sústava dvoch častíc interagujúcich krátkodosahovou silou. Riešenie takejto úlohy s jednoznačne zadaným počiatočným stavom je v klasickej prístupe triviálne.

V prípade, v ktorom však počiatočná podmienka nie je zadaná jednoznačne, je nutné pri riešení použiť východiská klasickej štatistickej mechaniky. Kľúčovým poznatkom tejto teórie je *Liouvilleova veta klasickej štatistiky*, na základe ktorej je možné vybudovať koncept *súboru sústav* slúžiaceho k charakterizácii stavov dostupných sústave v ľubovoľnom čase. V počiatočnom čase je tak súboru sústav, reprezentujúcemu sústavu, možné predpísať distribučnú funkciu vo fázovom priestore. Časový vývoj takejto sústavy následne zodpovedá časovému vývoju distribučnej funkcie. Združené súradnice jednotlivých častíc súboru je možné v ľubovoľnom čase určiť spriemerovaním cez distribučnú funkciu súboru. V prípade vyššie uvedenej sústavy dvoch častíc s počiatočnou distribučnou funkciou zadanou štvordimenzionálnym normálnym rozdelením je možné úlohu analyticky vyriešiť až po nájdenie distribučnej funkcie stavov sústavy v ľubovoľnom čase závislej len od polohy častíc.

Pri kvantovom opise vyššie uvedenej sústavy dvoch častíc sa hľadá riešenie vo forme vlnovej funkcie závislej od polohy častíc a času. Takáto vlnová funkcia je riešením *Schrödingerovej rovnice* so zadaným počiatočným stavom.

Narozdiel od klasického prípadu je však voľba počiatočného stavu obmedzená *princípom neurčitosti*. Použitím vhodných prirodzených jednotiek je možné Schrödingerovu rovnicu s interakčným potenciálom zodpovedajúcim delta bariére vyriešiť pre nájdenie úplnej sústavy vlastných stavov. Identifikáciou trojice nezávislých parametrov je možné úplne ovplyvňovať dynamiku sústavy. Riešenie zodpovedajúce lokalizovanému vlnovému balíku je možné definitívne nájsť ako lineárnu superpozíciu vlastných stavov. Štvorec veľkosti vlnovej funkcie, reprezentujúcej vlnový balík, zodpovedá v ľubovoľnom čase rozdeleniu pravdepodobnosti namerania sústavy v stave s danou polohou častíc.

Výsledky kvantového prístupu je možné na základe princípu korešpondencie v klasickej limite zosúladiť s výsledkami klasickej prístupu. Navrhnutím vhodného kvantifikátora je možné tieto výsledky porovnať i kvantitatívne.

2 Liouvilleova veta a opis dynamiky súboru

Stav klasickej konzervatívnej sústavy N častíc je jednoznačne určený pomocou sady súradníc a združených hybností pre každú časticu, zodpovedajúcej bodu vo fázovom priestore \mathbf{x} . Ak stavu takejto sústavy v počiatočnom čase $t = 0$ zodpovedá bod vo fázovom priestore \mathbf{x}_0 , potom je možné pomocou Hamiltonových pohybových rovníc v hociktorom inom čase $t > 0$ nájsť bod \mathbf{x}_t , presne určujúci stav sústavy. Pri štatistickom opise klasickej sústavy sa zavádza pojem *súboru sústav*. Súbor sústav pozostáva z veľkého množstva kópií sústavy, z ktorých každá sa samostatne vyvíja na základe rovnakých mikroskopických pohybových zákonov. Mikroskopický stav každej kópie sústavy v súbore je v ľubovoľnom čase určený bodom vo fázovom priestore. V elementárnom okolí bodu \mathbf{x}_0 sa v čase $t = 0$ nachádza objem fázových bodov $d\mathbf{x}_0$. Po uplynutí času $t > 0$ sa pozdĺž trajektórie $\mathbf{x}_t(\mathbf{x}_0)$ objemový element $d\mathbf{x}_0$ transformuje na nový objemový element $d\mathbf{x}_t$. *Liouvilleova veta klasickej štatistiky* hovorí, že počet bodov fázového priestoru v objemovom elemente sa v ľubovoľnom čase zachováva [1].

$$d\mathbf{x}_0 = d\mathbf{x}_t \quad (1)$$

Body fázového priestoru zodpovedajúce sústavám súboru sú charakterizované distribučnou funkciou $f(\mathbf{x}, t)$. Počet bodov

fázového priestoru patriacich do súboru v elementárnom okolí bodu \mathbf{x} je rovný $f(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x}$. Časový vývoj distribučnej funkcie nad súborom je určený *Liouvilleovou rovnicou*:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\dot{\mathbf{x}}f) = 0. \quad (2)$$

Pre konzervatívne sústavy, pre ktoré platí $\nabla \cdot \dot{\mathbf{x}} = 0$, má rovnica tvar:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \dot{\mathbf{x}} \cdot \nabla f = 0. \quad (3)$$

V takomto prípade je distribučná funkcia pozdĺž trajektórie bodov fázového priestoru v čase nemenná, teda platí:

$$f(\mathbf{x}_0, 0) = f(\mathbf{x}_t, t). \quad (4)$$

Pre nájdenie distribučnej funkcie v bode \mathbf{x}_t a čase t , preto stačí vyjadriť počiatočný bod $\mathbf{x}_0(\mathbf{x}_t, t)$ ako funkciu aktuálnych súradníc a času.

2.1 Sústava dvoch častíc v jednom rozmere

Prípád, ktorému je práca venovaná, súvisí s opisom sústavy dvoch bodových častíc v jednom rozmere, ktorých vzájomná interakcia je sprostredkovaná pôsobením krátkodosahových síl. Vo fázovom priestore zodpovedá stavu sústavy vektor $\mathbf{x} = (x_p, x_b, v_p, v_b)^T$. Pre takúto sústavu sa uvažuje štatisticky zadaný počiatočný stav s normálne rozdelenými počiatočnými veličinami.

$$\begin{aligned} x_{p0} &\sim N(\bar{x}_{p0}, \sigma_{x,p}), & x_{b0} &\sim N(\bar{x}_{b0}, \sigma_{x,b}), \\ v_{p0} &\sim N(\bar{v}_{p0}, \sigma_{v,p}), & v_{b0} &\sim N(\bar{v}_{b0}, \sigma_{v,b}). \end{aligned} \quad (5)$$

Častice sú označované ako *projektyl* a *barierová častica*. Pre počiatočné súradnice a rýchlosti častíc platí nasledovné:

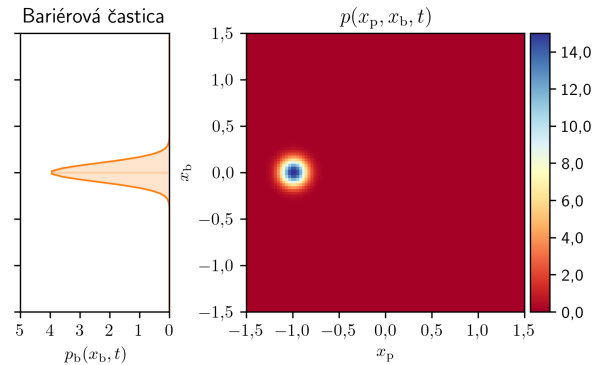
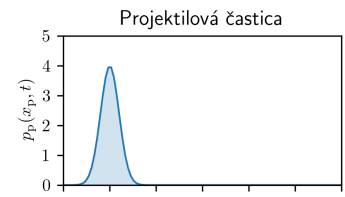
$$\begin{aligned} \bar{x}_{p0} &< \bar{x}_{b0} = 0, \\ \bar{v}_{p0} &> 0, & \bar{v}_{b0} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Je užitočné zaviesť sadu relatívnych bezrozmerných jednotiek vzťahujúcich sa na sústavu. Za týmto účelom sa definuje jednotka vzdialenosti ℓ , jednotka času τ a jednotka rýchlosti vyplývajúca z predchádzajúcich dvoch jednotiek.

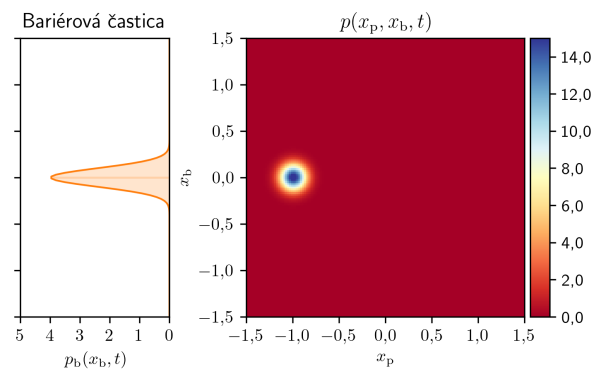
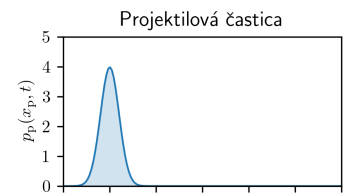
$$\ell = |\bar{x}_{p0} - \bar{x}_{b0}|, \quad \tau = \left| \frac{\bar{x}_{p0} - \bar{x}_{b0}}{\bar{v}_{p0}} \right|, \quad v = 1 \ell \cdot \tau^{-1} \equiv v. \quad (7)$$

Prirodzenou voľbou pre jednotku vzdialenosti je počiatočná vzdialenosť medzi strednou polohou dvoch častíc ℓ , relatívna jednotka vzdialenosti je potom definovaná ako $\tilde{x} = x/\ell$. Prirodzenou voľbou pre jednotku času je čas, za ktorý častica zo strednou rýchlosťou projektylu prekoná vzdialenosť medzi počiatočnými strednými polohami častíc τ , potom relatívny čas je vyjadrený ako $\tilde{t} = t/\tau$. Na základe predchádzajúceho je potom jednotka rýchlosti určená pomerom jednotky vzdialenosti a jednotky času. Obdobne pre relatívnu rýchlosť platí $\tilde{v} = v/v$.

V ďalšom texte práce sa vo všetkých matematických výrazoch uvažuje použité vyššie zadané prirodzené bezrozmerných jednotiek, pre zlepšenie prehľadnosti sa však upúšťa od označovania relatívnych jednotiek $\tilde{x} \rightarrow x$, $\tilde{t} \rightarrow t$ a $\tilde{v} \rightarrow v$.



Obr. 1: Počiatočné rozdelenie pravdepodobnosti pri klasickom výpočte



Obr. 2: Počiatočné rozdelenie pravdepodobnosti pri kvantovom výpočte

2.2 Prechod do ťažiskovej sústavy

Opis problému zrážky dvoch častíc sa výrazne zjednoduší prechodom z laboratórnej do ťažiskovej sústavy. Výsledky získané v ťažiskovej sústave je potom možné jednoducho späť previesť naspäť do laboratórnej sústavy. Vektor súradníc obidvoch častíc v laboratórnej sústave $(x_p, x_b)^T$ sa prevedie maticou

prechodu \mathbf{P}^{-1} na vektor súradníc v ťažiskovej sústave $(X, x)^T$:

$$\begin{pmatrix} X \\ x \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ 1 & -1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{P}^{-1}} \begin{pmatrix} x_p \\ x_b \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_p \\ x_b \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 1 & -\alpha \end{pmatrix}}_{\mathbf{P}} \begin{pmatrix} X \\ x \end{pmatrix}, \quad (8)$$

kde X je poloha ťažiska sústavy, x je relatívna poloha dvoch častíc a dvojica bezrozmerných parametrov $\alpha = m_p/(m_p + m_b)$ a $\beta = m_b/(m_p + m_b)$ vyjadruje pomery hmotností oboch častíc.

2.3 Vývoj distribučnej funkcie

Pre opísaný prípad sústavy je možné vytvoriť súbor sústav s počiatočnou distribučnou funkciou určenou predpisom v skrátenom maticovom zápise:

$$f(\mathbf{x}_0, 0) = N \exp\left(-(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)^T \mathbf{A} (\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)\right), \quad (9)$$

kde $\mathbf{A} = \text{diag}\left((2\sigma_{x_p}^2)^{-1}, (2\sigma_{x_b}^2)^{-1}, (2\sigma_{v_p}^2)^{-1}, (2\sigma_{v_b}^2)^{-1}\right)$ je inverzná kovariačná matica, $\bar{\mathbf{x}}_0$ je vektor počiatočných stredných hodnôt polôh a rýchlostí častíc a $N = 1/(\pi^2 \sqrt{|\mathbf{A}|})$ je normalizačná konštanta. Distribučnú funkciu je možné v ľubovoľnom čase vyjadriť na základe počiatočnej distribučnej funkcie v ťažiskovej sústave v zmysle rovnice (4):

$$f(\mathbf{x}'_0(X, x, V, v, t), 0) = f(X, x, V, v, t), \quad (10)$$

kde $\mathbf{x}'_0 = (X_0, x_0, V_0, v_0)^T$ je vektor počiatočných veličín v ťažiskovej sústave. Funkciu hustoty pravdepodobnosti, že v čase $t > 0$ je poloha ťažiska sústavy X a relatívna poloha častíc x je možné na základe distribučnej funkcie (10) určiť integrovaním cez všetky rýchlosti V a v :

$$p^{\text{cm}}(X, x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(X, x, V, v, t) dV dv. \quad (11)$$

Tento integrál je pre prípad rozoberaný v práci možné vychádzajúc z predchádzajúcich argumentov vyjadriť analyticky¹.

Polohu projektylu a bariéry v ľubovoľnom čase charakterizujú funkcie hustoty pravdepodobnosti $p_p^{\text{cm}}(x_p, t)$ a $p_b^{\text{cm}}(x_b, t)$ určené integrálmi:

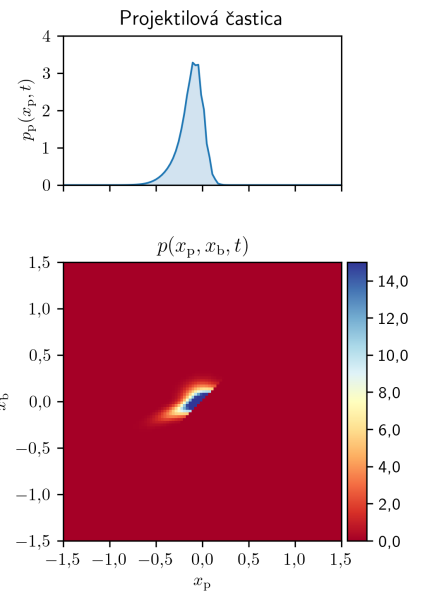
$$p_p^{\text{cm}}(x_p, t) = \int_{-\infty}^{\infty} p^{\text{cm}}(x_p, x_b, t) dx_b, \quad p_b^{\text{cm}}(x_b, t) = \int_{-\infty}^{\infty} p^{\text{cm}}(x_p, x_b, t) dx_p. \quad (12)$$

Pri známom analytickom tvare funkcie $p^{\text{cm}}(x_p, x_b, t)$ je možné nájsť funkcie $p_p^{\text{cm}}(x_p, t)$ a $p_b^{\text{cm}}(x_b, t)$ numericky, čím sa úloha klasického štatistického opisu považuje za vyriešenú.

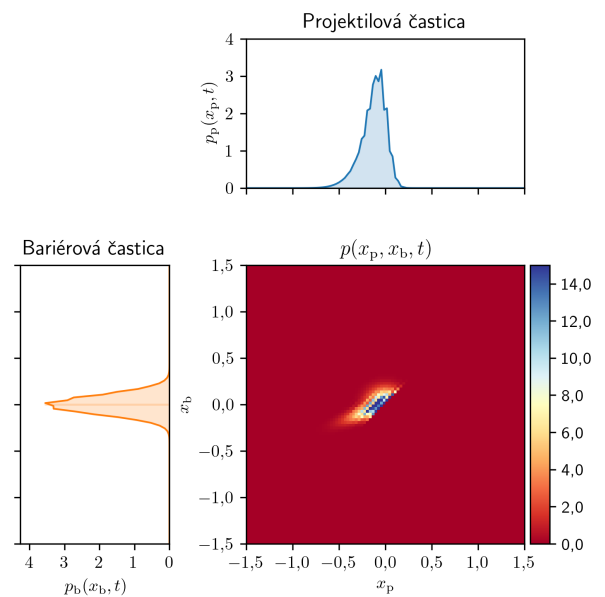
3 Kvantový opis sústavy dvoch častíc

Na rozdiel od klasického prípadu, kvantová teória nepripúšťa a deterministický opis sústavy. Častice sú pri kvantovom opise reprezentované lokalizovanými vlnovými balíkmi, ktoré zodpovedajú pravdepodobnosti nájdenia častice v priestore.

¹Riešenie kvôli svojej komplikovanej podobe nemožno uviesť v rozsahu tejto práce, je však súčasťou rozpracovanej diplomovej práce R. Michelka.



Obr. 3: Klasický výpočet v čase $t = 1$



Obr. 4: Kvantový výpočet v čase $t = 1$

Časový vývoj sústavy určuje vlnová funkcia $\Psi(x_p, x_b, t)$, ktorej štvorec veľkosti $|\Psi(x_p, x_b, t)|^2$ zodpovedá hustote pravdepodobnosti $p^{\text{qm}}(x_p, x_b, t)$ namerať v čase $t > 0$ projekty na pozícii x_p a bariéru na pozícii x_b . Pre hustoty pravdepodobnosti $p_p^{\text{qm}}(x_p, t)$ a $p_b^{\text{qm}}(x_b, t)$ potom platí úplná analógia s klasickým prípadom (12).

Poloha a hybnosť častice sú zviazané princípom neurčitosti $\sigma_x \sigma_p \geq \hbar/2$ vďaka čomu nie je možné zadať počiatočnú podmienku ľubovoľne. Počiatočný stav sústavy s dvoma

časticami je možné zadať pomocou distribučnej funkcie $f_0(x_p, x_b) = |\Psi_0(x_p, x_b)|^2$. Funkcia $\Psi_0(x_p, x_b)$ pre počiatkový stav sústavy dvoch častíc, kde v čase $t = 0$ platí $x_p \sim N(\bar{x}_{p0}, \sigma_{x,p})$ a $x_b \sim N(\bar{x}_{b0}, \sigma_{x,b})$ je zadaná ako:

$$\Psi_0(x_p, x_b) = N \exp\left(-(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + i \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{x}\right), \quad (13)$$

kde $\mathbf{x} = (x_p, x_b)^T$ je vektor súradníc polohy častíc, $\mathbf{A} = \text{diag}\left((2\sigma_{x,p})^{-2}, (2\sigma_{x,b})^{-2}\right)$ je inverzná kovariančná matica, $N = \sqrt{2}/(\sqrt{\pi^2 |\mathbf{A}|})$ je normalizačná konštanta a $\mathbf{k}_0 = (k_{p0}, k_{b0})^T$ je vektor vlnových čísel zodpovedajúcim stredným počiatočným rýchlostiam častíc \bar{v}_{p0} a \bar{v}_{b0} . Obdobne ako v klasickom prípade je možné pokračovať v riešení úlohy v ťažiskovej sústave, kde bude počiatočný stav zadaný funkciou $\Psi_0(X, x)$.

3.1 Schrödingerova rovnica a prirodzené jednotky

Dynamika sústavy dvoch častíc sa riadi vlnovou funkciou $\Psi(X, x, t)$, ktorá spĺňa nasledovnú Schrödingerova rovnicu vyjadrenú v zavedených bezrozmerných prirodzených jednotkách:

$$i \frac{\mu \ell^2}{\hbar \tau} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\mu}{2M} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\mu \ell}{\hbar^2} \lambda \delta(x) \Psi(X, x, t), \quad (14)$$

kde sa ako potenciál pri pružnej zrážke častíc uvažuje delta bariéra $\lambda \delta(x)$. Nájdením vlnovej funkcie $\Psi(X, x, t)$, ktorá je riešením predchádzajúcej rovnice a spĺňa počiatočný stav $\Psi_0(X, x)$, je možné jednoducho prejsť naspäť do laboratórnej sústavy k vlnovej funkcii $\Psi(x_p, x_b, t)$. V predchádzajúcom tvare Schrödingerovej rovnice je možné identifikovať trojicu bezrozmerných parametrov kompletne ovplyvňujúcich dynamiku sústavy:

$$\Lambda = \frac{M}{\mu}, \quad \nu = \frac{\hbar \tau}{\mu \ell^2}, \quad \eta = \frac{\lambda / \ell}{\mu \omega^2}. \quad (15)$$

Parameter Λ zohľadňuje rozloženie hmotností sústavy medzi dvoma časticami, druhý parameter ν reprezentuje vo zvolených prirodzených jednotkách Planckovu konštantu, tretí parameter η reprezentuje silu delta bariéry, ktorá je v prirodzených jednotkách určená vzťahom: $\tilde{\lambda} = \eta \cdot \nu^{-2}$. Pri parametri ν zodpovedajúcom \hbar v prirodzených jednotkách nadobúda Heisenbergov princíp neurčitosti polohy a hybnosti častice podobu $\sigma_x \sigma_p \geq \nu/2$.

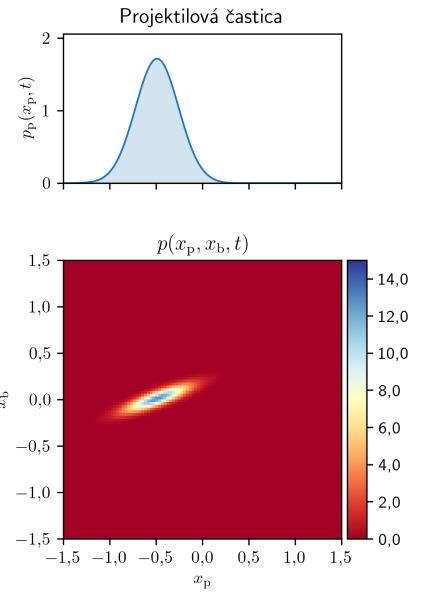
3.2 Lineárna kombinácia stacionárnych stavov

Lokalizované riešenie $\Psi(X, x, t)$, ktoré zodpovedá počiatočnému stavu $\Psi_0(X, x)$, je možné vyjadriť ako lineárnu kombináciu nájdených stacionárnych stavov:

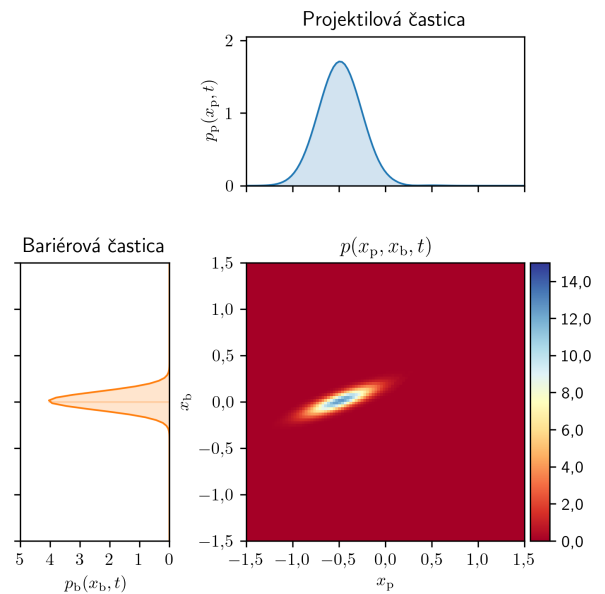
$$\Psi(X, x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(K, k) \Phi_K(X) \psi_k(x) \exp(-i \nu t (E_K / \Lambda + \varepsilon_k)) dK dk. \quad (16)$$

Využitím úplnosti stacionárnych stavov $\Phi_K(X)$ a $\psi_k(x)$ je možné funkciu $c(K, k)$ nájsť riešením integrálu:

$$c(K, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_0(X, x) \Phi_K^*(X) \psi_k^*(x) dX dx. \quad (17)$$



Obr. 5: Klasický výpočet v čase $t = 1,5$



Obr. 6: Kvantový výpočet v čase $t = 1,5$

Integrál je možné vyriešiť analyticky. Stacionárne riešenia relatívneho pohybu vystupujúce v predchádzajúcich integráloch majú tvar:

$$\psi_k(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(ikx) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} r_k \exp(-ikx), & x < 0, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} t_k \exp(ikx), & x > 0, \end{cases} \quad (18)$$

kde platí: $k > \sqrt{2\varepsilon} > 0$, pretože sa uvažujú len stavy zodpovedajúce časticam pohybujúcim sa voči sebe. Pre koeficienty odrazu r_k a prechodu t_k platí: $r_k = -\lambda / (\lambda + 2ik)$ a $t_k = 2ik / (\lambda + 2ik)$ [2].

Integrál vyjadrujúci vlnovú funkciu $\Psi(X, x, t)$ (16) je potom možné riešiť numericky využitím algoritmu dvojrozsmernej rýchlej Fourierovej transformácie na diskretných bodoch množiny $\{K\} \times \{k\}$.

4 Porovnanie klasického a kvantového opisu

Predchádzajúce časti práce sa venovali opisu sústavy dvoch zarážajúcich sa častíc. Pre prípad klasickej sústavy, ktorej presný počiatkový stav je neznámy, sa využíval koncept súboru a východiská *Liouvillovej vety*. Druhá časť sa venovala podobnej sústave v rámci kvantovej teórie, ktorej neoddeliteľnou súčasťou je štatistický opis fyzikálnych dejov. Za riešenie problému sa v klasickom prípade považovalo nájdenie pravdepodobnosti $p^{cm}(x_p, x_b, t) dx_p dx_b$, že sa pri štatisticky zadanej počiatkovej podmienke v čase $t > 0$ projektyl nachádza na pozícii x_p a bariéra na pozícii x_b . V kvantovom prípade sa za riešenie považuje nájdenie vlnovej funkcie $\Psi(x_p, x_b, t)$, charakterizujúcej časový vývoj lokalizovaného vlnového balíka. Pravdepodobnosť $p^{qm}(x_p, x_b, t) dx_p dx_b$ namerania projektylu na pozícii x_p a bariéry na pozícii x_b v čase $t > 0$ je rovná štvorcu normy vlnovej funkcie. Nadchádzajúca časť práce sa venuje prípadom, v ktorých umožňujú paralely medzi výsledkami klasického a kvantového prístupu dospieť k zhodným výsledkom.

4.1 Počiatkový stav sústavy

Klasický štatistický opis, využívajúci princíp súboru sústav, umožňuje zadanie počiatkového stavu sústavy pomocou počiatkovej distribučnej funkcie vo fázovom priestore, ktorej parametre je možné voliť ľubovoľne. V prípade rozoberanom v tejto práci sa predpokladala počiatková podmienka v klasickom prípade zadaná štvorrozmerným normálnym rozdelením (9). Počiatkový stav je tak v klasickom prípade úplne charakterizovaný voľbou štyroch stredných hodnôt pre pozíciu a rýchlosť oboch častíc a im zodpovedajúcim štyrom smerodajným odchýlkam. Dynamika zrážky navyše závisí od pomeru hmotností častíc. Časový vývoj klasickej sústavy je tak úplne určený voľbou deviatich nezávislých parametrov.

Takáto voľnosť voľby parametrov však nie je v kvantovej teórii pri opise čistých stavov prípustná kvôli princípu neurčitosti. Počiatkový stav sústavy je zadaný tak, aby reprezentoval sústavu, v ktorej je počiatková pozícia častíc charakterizovaná dvojrozmerným normálnym rozdelením (13). Počiatkový stav, však na rozdiel od klasického prípadu, umožňuje len voľbu štvorice parametrov zodpovedajúcim počiatkovým pozíciám častíc a dvojice stredných počiatkových rýchlostí častíc. Zvyšná dvojica parametrov charakterizujúca neistotu počiatkových rýchlostí častíc je určená implicitne bez možnosti voľby. Ako bolo ukázané pri kvantovom opise je dynamika sústavy navyše ovplyvňovaná trojicou parametrov (15), časový vývoj sústavy je tak opäť jednoznačne určený deviatimi parametrami.

Z predchádzajúceho textu vyplýva, že úloha zosúladiť klasický

a kvantový opis dynamiky sústavy sa redukuje na nájdenie deviatich klasickej parametrov zodpovedajúcich deviatim kvantovým parametrom. Štvorica z klasickej parametrov charakterizujúca počiatkovú polohu častíc ($\bar{x}_{p0}, \sigma_{x,p}, \bar{x}_{b0}, \sigma_{x,b}$) priamo zodpovedá identickým kvantovým parametrom. Pomer hmotností častíc m_p/m_b určujúci pomocné parametre α a β tiež jednoznačne súvisí s kvantovým parametrom Λ .

$$\alpha = \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1 - 1/\Lambda}), \quad \beta = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 - 1/\Lambda}). \quad (19)$$

Klasické počiatkové stredné rýchlosti častíc \bar{v}_{p0} a \bar{v}_{b0} súvisia s počiatkovými strednými hodnotami vlnových čísel k_{p0} a k_{b0} na základe vzťahu:

$$k_{p0} = \frac{\bar{v}_{p0}}{2\nu}(\Lambda - \sqrt{\Lambda^2 - 4\Lambda}), \quad k_{b0} = \frac{\bar{v}_{b0}}{2\nu}(\Lambda + \sqrt{\Lambda^2 - 4\Lambda}), \quad (20)$$

kde tiež vystupujú parametre Λ a ν . Smerodajné odchýlky počiatkových rýchlostí častíc je potrebné nájsť pre klasický prípad v korešpondencii s implicitne určenými odchýlkami hybností v kvantovom prípade na základe vzťahu:

$$\sigma_{v,p} = \frac{1}{\sigma_{x,p}} \frac{\nu}{\Lambda - \sqrt{\Lambda^2 - 4\Lambda}}, \quad \sigma_{v,b} = \frac{1}{\sigma_{x,b}} \frac{\nu}{\Lambda + \sqrt{\Lambda^2 - 4\Lambda}}. \quad (21)$$

Bezrozmerné číslo ν , definované v predchádzajúcej časti (15), reprezentuje *Planckovu konštantu*. V súlade s princípom korešpondencie je možné pre $\nu \rightarrow 0$ očakávať pre kvantovú sústavu správanie v klasickej limite [3]. V klasickom prípade, narozdiel od kvantového, nie je prípustný jav tunelovania jednej častice cez druhú. Ak číslo R reprezentuje odhad pravdepodobnosti odrazenia častice od bariéry, je potrebné voliť parameter η zodpovedajúci sile bariéry tak aby platilo $R \rightarrow 1$. Hodnotu η je možné pre zvolenú pravdepodobnosť odrazu R určiť podľa vzťahu:

$$\eta = 2\nu \sqrt{\frac{R}{1-R}} \cdot |\bar{v}_{p0} - \bar{v}_{b0}|. \quad (22)$$

Hodnoty parametrov ν a η zvolené pre demonštráciu korešpondencie medzi klasickejmi a kvantovými výsledkami pre sústavu dvoch častíc s pomerom hmotností $m_p : m_b = 1 : 100$ a pravdepodobnosť odrazu $R = 0,99$ sú uvedené v tabuľke (1).

Tab. 1: Hodnoty kvantových parametrov pre kvantový výpočet

Λ	ν	η
102,5	0,01	1990

5 Príklad sústavy dvoch častíc

Ako príklad slúžiaci pre demonštráciu možnosti získania zhodných výsledkov pomocou klasickej a kvantového prístupu sú v práci uvedené výsledky výpočtu pre sústavu s počiatkovými parametrami uvedenými v tabuľke (2).

Počiatkové distribučné funkcie sústavy s uvedenými parametrami pri klasickom a kvantovom výpočte sa nachádzajú na obrázkoch (1) a (2). Na obrázkoch (3), (4), (5) a (6)

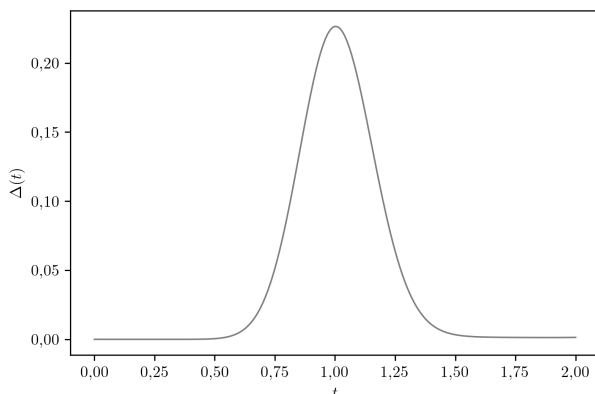
Tab. 2: Počiatočné parametre klasickej a kvantovej sústavy

Parametre súradníc:		Parametre rýchlostí:	
\bar{x}_{0p}	-1	\bar{v}_{0p}	1
$\sigma_{x,p}$	1/10	$\sigma_{v,p}$	5/101
\bar{x}_{0b}	0	\bar{v}_{0b}	0
$\sigma_{x,b}$	1/10	$\sigma_{v,b}$	1/2020

sa nachádzajú grafy hustoty pravdepodobnosti $p^{cm}(x_p, x_b, t)$ a $p^{qm}(x_p, x_b, t)$ v čase $t = 1$, kedy je pravdepodobnosť zrážky v sústave najvyššia a v čase $t = 1,5$, kedy už s najväčšou pravdepodobnosťou v sústave k zrážke došlo. Pozdĺž osí x_p a x_b sa tiež nachádzajú grafy, ktoré zobrazujú hustotu pravdepodobnosti pre polohu projektylu a bariéry. Pre porovnanie výsledkov vypočítaných na štvorcovej oblasti dĺžky $L \times L$ pozostávajúcej z $N \times N$ bodov (x_p, x_b) je možné použiť kvantifikátor:

$$\Delta(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{N} \right)^2 \sum_{i,j=1}^N \left| p^{cm}(x_p^{(i)}, x_b^{(j)}, t) - p^{qm}(x_p^{(i)}, x_b^{(j)}, t) \right|. \quad (23)$$

Hodnota takto definovaného kvantifikátora $\Delta(t)$ môže v ľubovoľnom čase nadobúdať hodnoty od 0 do 1 pričom v prípade $\Delta(t) = 0$ je medzi klasickým a kvantovým výsledkom úplná zhoda $p^{cm}(x_p, x_b, t) = p^{qm}(x_p, x_b, t)$. V druhom extrémnom prípade, kedy $\Delta(t) = 1$ nedochádza k prekrytiu funkcií $p^{cm}(x_p, x_b, t)$ a $p^{qm}(x_p, x_b, t)$ na žiadnom mieste, platí: $p^{cm}(x_p, x_b, t) > 0 \Rightarrow p^{qm}(x_p, x_b, t) = 0$ a $p^{qm}(x_p, x_b, t) > 0 \Rightarrow p^{cm}(x_p, x_b, t) = 0$. Hodnota kvantifikátora $\Delta(t) \in \langle 0; 1 \rangle$, poskytuje v každom čase informáciu o priestorovej podobnosti funkcií $p^{cm}(x_p, x_b, t)$ a $p^{qm}(x_p, x_b, t)$. Časový vývoj kvantifikátora $\Delta(t)$, zobrazený na grafe (7), umožňuje získať predstavu o odlišnostiach medzi klasickými a kvantovými výsledkami.



Obr. 7: Časový vývoj kvantifikátora $\Delta(t)$

6 Záver

Práca sa venovala problematike štatistickému opisu jednorozmernej sústavy dvoch častíc interagujúcich krátkodosahovou

silou. Úloha bola formulovaná a riešená v rámci klasickej a kvantovej teórie. Riešenia oboch prípadov bolo za istých podmienok možné zosúladiť a následne kvantitatívne a kvalitatívne porovnať. Praktickou voľbou počas hľadania riešenia úlohy bolo zavedenie bezrozmerných prirodzených jednotiek. V prípade klasickej sústavy s štatisticky zadanou počiatočnou podmienkou sa pre opis sústavy využívali východiská klasickej štatistickej metódy. Počiatočný stav sústavy bol zadaný distribučnou funkciou súboru sústav. Na základe *Liouvillovej rovnice* a klasických pohybových rovníc bolo možné vyjadriť distribučnú funkciu nad súborom sústav v ľubovoľnom čase a následne dospieť až k analytickému vyjadreniu funkcie hustoty pravdepodobnosti $p^{cm}(x_p, x_b, t)$. Podobná úloha bola riešená vo formalizme kvantovej teórie. Zavedením prirodzených jednotiek bola identifikovaná trojica parametrov ovplyvňujúca dynamiku riešenia v podobe vlnového balíka. Riešenie vo forme vlnovej funkcie bolo nájdené na základe počiatočného stavu lineárnou superpozíciou vlastných stavov. Štvorec veľkosti vlnovej funkcie zodpovedal funkcii hustoty pravdepodobnosti $p^{qm}(x_p, x_b, t)$. Pre porovnanie výsledkov klasického a kvantového prístupu bol uvedený príklad sústavy s počiatočnými parametrami uvedenými v tabuľke (2). Parametre kvantového výpočtu uvedené v tabuľke (1) boli nastavené tak, aby riešenie zodpovedalo klasickému riešeniu. Pre kvantitatívne porovnanie klasického a kvantového riešenia bol navrhnutý kvantifikátor $\Delta(t) \in \langle 0; 1 \rangle$ (23), ktorého hodnota odráža rozdiel medzi klasickým a kvantovým riešením. Časový vývoj kvantifikátora pre uvedený prípad zobrazený na obrázku (7) naznačuje dobrú zhodu $\Delta(t) \approx 0$ medzi oboma riešeniami v časoch, kedy je pravdepodobnosť zrážky v sústave nízka $t \in \langle 0; 0,5 \rangle \cup \langle 1,5; 2 \rangle$. Kvantifikátor nadobúda vyššie hodnoty $\max\{\Delta(t)\} \approx 10^{-1}$, a teda naznačuje horšiu zhodu v časovom intervale, kedy je pravdepodobnosť zarážky častíc veľká $t \in \langle 0,5; 1,5 \rangle$. Zhoršenie zhody medzi klasickými a kvantovými výsledkami je možné vysvetliť výskytom interferenčných javov pozorovateľných aj na obrázku (4) pri kvantovom riešení v čase blízkom jednej. Na základe nadobudnutých výsledkov existuje perspektíva budúceho detailnejšieho preskúmania kategórie úloh, pri ktorých sú výsledky klasického a kvantového prístupu v dobrom súlade.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená grantom KEGA 006STU-4/2022 „Digitálna podpora predmetov fyzikálneho inžinierstva“.

Literatúra

- [1] TUCKERMAN, Mark E. *Statistical Mechanics: Theory and Molecular Simulation*. Oxford University Press, Oxford, 2010, 720 s. ISBN 9780198525264.
- [2] GRIFFITHS, David J. *Introduction to quantum mechanics*. 1. vyd. Prentice Hall, 1995, 394 s. ISBN 0131244051.
- [3] BOHM, David *Quantum theory*. 1. vyd. Dover Publications, 1989, 646 s. ISBN 9780486659695.

Dva spôsoby generovania náhodného fluktuujúceho potenciálu s nenulovou korelačnou dĺžkou a korelačným časom

Marek Klčovanský¹, Peter Bokes

Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

¹xklcovansky@stuba.sk

V práci porovnávame dva rôzne postupy generácie náhodného potenciálu pre simulácie kinematiky častíc v jednom rozmere. V prvom prístupe je potenciál generovaný na základe predpísanej autokorelačnej funkcie, voľby náhodných fáz a Fourierovej transformácie pre celý čas simulácie [1], čo prináša veľké pamäťové nároky na simuláciu. V druhom, tu navrhnutom prístupe, dokážeme postupne generovať potenciál skladajúci sa z náhodne generovaných gausiánov za behu samotnej simulácie. Na základe porovnania vypočítaných a teoretických hodnôt pre strednú hodnotu kinetickej energie a strednú hodnotu veľkosti posunutia častíc ukážeme, že oba prístupy vedú na štatisticky ekvivalentné potenciály pre veľký počet gausiánov. Implementovaná metodika generovania náhodného potenciálu umožní štúdium kinematiky častíc vo fluktuujúcom potenciály aj vo vyšších dimenziách.

1 Úvod

Generovanie náhodných potenciálov zohráva kľúčovú úlohu v rôznych oblastiach vedy a techniky, najmä v kontexte numerických simulácií. Tieto potenciály slúžia napríklad ako základ pre simuláciu interakcií medzi časticami v systéme [2]. Vďaka tomuto môžeme predpovedať správanie sa aj komplexných systémov [3].

V práci [1] bol potenciál generovaný pomocou predpísanej autokorelačnej funkcie (ACF), ktorý vykazoval veľké nároky na operačnú pamäť pri dlhších simuláciách. Naším cieľom bolo porovnať takto generovaný potenciál s potenciálom, ktorý je generovaný spôsobom, ktorý tento problém nemá. V rámci tohto prístupu najprv vygenerujeme elementárne prvky, z ktorých sa potenciál skladá a až následne vyčíslime jeho ACF. Predpokladá sa, že ak sú autokorelačné funkcie náhodných potenciálov zhodné, budú mať častice v takýchto potenciáloch aj rovnaké štatistické kinematické charakteristiky [4].

2 Generovanie potenciálu a simulácie

Autokorelačná funkcia náhodného fluktuujúceho potenciálu $V(\vec{r}, t)$ je definovaná predpisom

$$S(\vec{r}, t) = \langle V(\vec{r} + \vec{r}', t + t') V(\vec{r}', t') \rangle \quad (1)$$

kde lomené zátvorky predstavujú ustredenie cez mnoho realizácií náhodného potenciálu. ACF pre náhodný potenciál s nenulovou korelačnou dĺžkou λ korelačným časom τ má tvar

$$S(\vec{r}, t) = v_0^2 s_r(|\vec{r}|/\lambda) s_t(t/\tau) \quad (2)$$

kde $s_r()$ a $s_t()$ môžu byť prakticky akékoľvek funkcie, ktoré klesajú pre veľký argument k nule a v nulovom argumente nadodúajú hodnotu 1. V práci [1] bol zvolený funkčný tvar $s_r(z) = s_t(z) = \exp(-z^2/2)$, t.j. v tvare gausiánu. Vzdialenosť budeme merať v násobkoch λ a čas v násobkoch τ , čo prakticky znamená nahradenie týchto parametrov vo vyššie uvedených vzťahoch hodnotou 1. Jediný parameter, ktorý potom určuje náhodný potenciál je jeho disperzia $S(0,0) = \langle V(\vec{r}, t) V(\vec{r}, t) \rangle = v_0^2$.

2.1 Tvorba potenciálu

V nasledovnom budeme opisovať potenciál len pre pohyb častíc v jednej dimenzii opísanej súradnicou x . Pretože chceme aby mala autokorelačná funkcia potenciálu tvar gaussovej krivky (2), tak sme si ako tvar elementárnych prvkov potenciálu zvolili tiež gausiány,

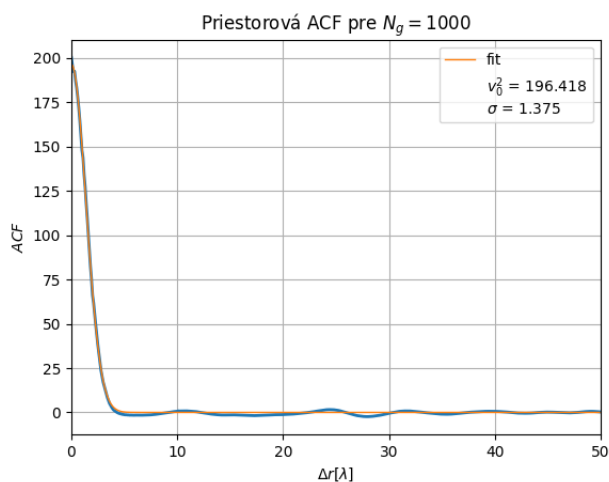
$$V_{1g}(x, t) = V_{0,1g} \exp\left\{-\frac{(x - x_{0,1g})^2}{2\lambda_{1g}^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(t - t_{0,1g})^2}{2\tau_{1g}^2}\right\}, \quad (3)$$

kde $V_{0,1g}$ je náhodná amplitúda gausiánu s rovnomerným rozdelením hodnôt z intervalu $\langle -V_{0,1g,\max}, V_{0,1g,\max} \rangle$, $x_{0,1g}$ a $t_{0,1g}$ sú stredy gausiánu v smere x a v čase t . $x_{0,1g}$ sme vybrali z intervalu $\langle 0, L \rangle$, kde L je priestorová dĺžka nášho potenciálu. Hodnotu $t_{0,1g}$ sme vybrali z rozmedzia $\langle -5\tau_{1g}, t_{\max} + 5\tau_{1g} \rangle$, kde t_{\max} je celkový simulovaný čas. Všetky náhodné parametre boli generované pomocou náhodného generátora čísel Mersene Twister z knižnice C++ [5].

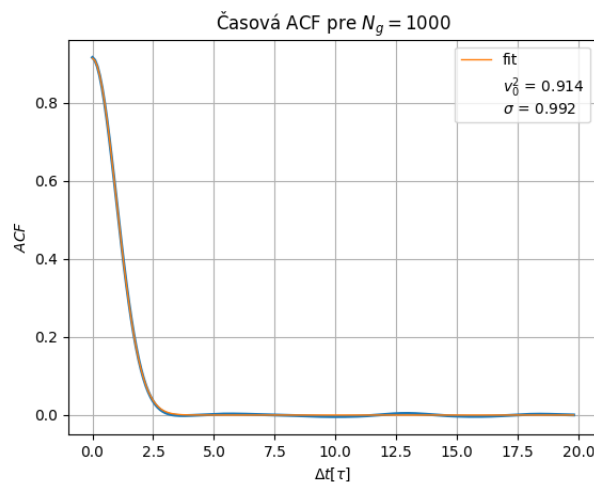
Celkový potenciál môžeme potom zapísať ako

$$V(x, t) = \sum_{i=1}^{N_g} V_{1g,i}(x, t), \quad (4)$$

kde N_g je počet gausiánov v bode t v rozmedzí od $\langle t - 5\sigma_{1g}, t + 5\tau_{1g} \rangle$



Obr. 1: Príklad priestorovej ACF



Obr. 2: Príklad časovej ACF

2.2 Autokorelačná funkcia potenciálu

Pre výpočet ACF každú realizáciu vygenerovaného potenciálu navzorkujeme v priestore s krokom Δx , ktorý sme si vybrali $\Delta x = 0,1\lambda$, a v čase s krokom $\Delta t = 0,1\tau$. Takto navzorkovaný potenciál môžeme zapísať v matici ako

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{11} & \dots & V_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{K1} & \dots & V_{KM} \end{bmatrix}$$

kde V_{ij} je hodnota potenciálu v $t = i\Delta t$ a v $x = j\Delta x$. K je celkový počet časových vzoriek a M počet priestorových vzoriek. Z takto navzorkovaných realizácií náhodného potenciálu môžeme pomocou Fourierových transformácií vypočítať jeho autokorelačnú funkciu.

Pri priestorovej závislosti ACF sme použili vzťah pre výpočet ACF z diskretnej fourierovej transformácie, ktorý má tvar

$$s(\Delta x) = \frac{1}{L^2} \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(V[x])\mathcal{F}^*(V[x])) \quad (5)$$

Takto sme postupovali pri všetkých navzorkovaných časoch a vypočítané ACF sme vystredili cez čas.

Takto získanú funkciu sme fitovali gaussovou funkciou a získali hodnoty v_0^2 a λ . Nakoľko potrebujeme dosiahnuť aby $\lambda = 1$ a \tilde{v}_0 nadobúdala predpísané hodnoty $\tilde{v}_0 = 10^{n-3}$, $n = 0, \dots, 5$ pre porovnanie s výsledkami z práce [1], tak parameter λ_1 jednotlivých gausiánov sme aktualizovali na novú hodnotu $\lambda_1 \rightarrow \lambda_1/\lambda$ a amplitúdy $V_{0,1g}$ sme aktualizovali podľa predpisu $V_{0,1g} \rightarrow V_{0,1g}/\tilde{v}_0$. Príklad priestorovej ACF pred aktualizovaním parametrov je na obrázku 1.

Časovú závislosť ACF sme vypočítali podobným spôsobom ako priestorovú, len sme pre každý navzorkovaný bod v priestore urobili ACF v čase a získané ACF sme spriemerovali pre všetky priestorové body. Z časovej autokorelácie môžeme určiť τ a taktiež v_0^2 . Parameter τ_{1g} sme vydělili hodnotou τ . Porovnaním získaného v_0^2 z časovej a priestorovej závislosti ACF sme mohli skontrolovať, či sú výpočty konzistentné,

pretože táto hodnota by mala byť pre obe závislosti rovnaká. Prípad časovej závislosti ACF po aktualizovaní parametrov je zobrazený na obrázku 2.

Po vykonaní týchto úprav na našom potenciáli sme vykonali autokorelácie ešte raz, aby sme si boli istý, že výsledná autokorelácia bude mať nami požadované parametre $\lambda = 1$, $\tau = 1$ a $v_0 = 10^{n-3}$. Numerické výpočty takto upraveného potenciálu je možné porovnávať s prácou [1].

2.3 Simulácia častíc

Na začiatku simulácie sme navzorkovali súradnice pre N_c častíc z intervalu $x \in \langle 0, L \rangle$, kde L je priestorová dĺžka potenciálu. Rýchlosť častíc na začiatku $v_{0,c}$ sme zadali rovnú 0. Ako numerickú integračnú metódu sme si zvolili Störmer-Verlet metódu, pretože má numerickú chybu na úrovni časového kroku $(\Delta t)^4$ a je pomerne výpočtovo nenáročná.

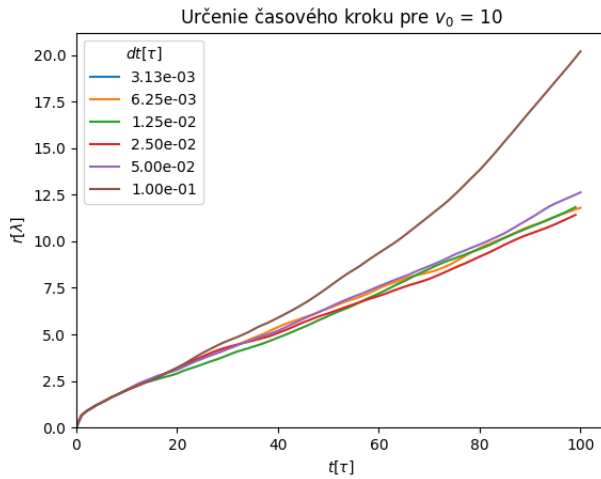
Keďže je potenciál v priestore periodický, ak sa častica dostane za limit študovaného priestoru, presunieme ju vzhľadom na periodickú okrajovú podmienku. Teda ak je $x > L$ tak nová poloha častice bude $x \rightarrow x - L$. Naopak, ak bude $x < 0$, tak nová poloha častice bude upravená ako $x \rightarrow L - x$. Takto zabezpečíme periodickú okrajovú podmienku potenciálu, aby sme nemuseli robiť výpočty pre $x < 0$ alebo $x > L$.

Na výpočet pohybu častice v potenciáli používame Newtonov pohybový zákon

$$m\vec{a} = \vec{F} = -\nabla V, \quad (6)$$

kde \vec{F} je sila pôsobiaca na časticu, V je potenciál a m je hmotnosť častice. Pri vhodnej voľbe jednotiek môžeme položiť $m = 1$. Z tohto vzťahu následne dostaneme zrýchlenie, ktoré na časticu pôsobí. Vďaka tomu, že sa náš potenciál skladá z gausiánov, môžeme nájsť aj analytické vyjadrenie pre gradient, ktoré má pre každý individuálny gausián tvar

$$a_{1g} = V_{1g}(x,t) \frac{x - x_0}{\lambda_{1g}^2}. \quad (7)$$



Obr. 3: Porovnanie výpočtovej presnosti pre rôzne časové kroky pre $v_0 = 10$

Celkové zrýchlenie častice teda dostaneme zrátaním príspevkov od všetkých gaussiánov, ktoré tvoria potenciál, teda

$$a = \sum_{i=0}^{N_g} a_{1g,i} \quad (8)$$

2.4 Výpočtová presnosť

Na zistenie potrebného časového kroku pre numerické výpočty sme spravili simulácie pre jeden potenciál s určeným \tilde{v}_0 s rôznymi časovými krokmi. Začínali sme s krokom $\Delta t = 0.1\tau$, ktorý sme následne delili na polovicu. Ako môžeme vidieť na obrázku 3, pri $\tilde{v}_0 = 10$ je pri časovom kroku $\Delta t = 0.1\tau$ výrazný rozdiel oproti výpočtu s menším časovým krokom. Preto sme vybrali pre simulácie s $\tilde{v}_0 = 10$ časový krok $\Delta t = 0.05\tau$. Pre nižšie hodnoty \tilde{v}_0 sme zistili, že nám stačí časový krok $\Delta t = 0.1\tau$. Takýmto spôsobom sme urobili výpočty aj pre $\tilde{v}_0 = 100$ a $\tilde{v}_0 = 1000$. Pre menšie hodnoty \tilde{v}_0 je hodnota Δt rovnaká, ako pre $\tilde{v}_0 = 1$. Výpočet sme taktiež urobili pre $\tilde{v}_0 = 100$, pre ktorý vyšiel optimálny časový krok $\Delta t = 0.1\tau/8$.

2.5 Porovnávané parametre

V práci [1] boli parametre pre charakterizáciu potenciálu použité priemerná kinetická energia častice $E_k(t)$ a priemerné posunutie častice $\sigma_x(t)$.

Pretože zo Stormer-Verletovej integrácie dostaneme iba polohu $x(t)$ jednotlivých častíc, musíme najprv vypočítať ich rýchlosť a následne z nej kinetickú energiu,

$$E_{k,i}(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{x_i(t) - x_i(t - \Delta t)}{\Delta t} \right]^2 \quad (9)$$

Strednú hodnotu kinetickej energie potom môžeme vypočítať zo vzťahu

$$\langle E_k(t) \rangle = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} E_{k,i}(t) \quad (10)$$

Priemerné posunutie častice počítame nasledovným vzťahom

$$\sigma_x(t) = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [x_i(t) - x_i(0)]^2} \quad (11)$$

2.6 Porovnanie výsledkov

Výsledky z našich simulácií sme porovnávali s výsledkami z práce [1]. Parametre B_n v tejto práci zodpovedajú parametru potenciálov $\tau = 1$ a $\tilde{v}_0 = 10^{n-3}$, $n = 0, \dots, 5$, ale grafy kinetickej energie a posunutia sú uvádzané v takzvaných kvantových jednotkách (q.u.) pri ktorých $v_0 = 50$ a $\tau_n = \sqrt{10^{n-3}/v_0}$. Ak chceme tieto výsledky porovnávať, je treba naše výsledky preškálovať do týchto jednotiek.

Simulácie sme robili pre $N_g = 10$, $N_g = 100$ a $N_g = 1000$, aby sme zistili, či počet gaussiánov bude mať vplyv na výsledky výpočtov, aj keď bude ich autokorelačná funkcia rovnaká. Pre každé N_g sme robili 20 rôznych simulácií s iným seedom pre náhodný generátor čísel a každá simulácia bola robená pre $N_c = 1000$ častíc. Tieto výsledky sme potom spriemerovali a zobrazili ich v grafoch.

Taktiež sme v grafoch zobrazili teoretické predpovede pre jednotlivé veličiny [1] platné za predpokladu $\tilde{v}_0 < 1$: $E_k(t) = v_0^2 t \sqrt{\pi/2}$ a $\sigma_x(t) = \sqrt{2/3} v_0^2 t^3 \sqrt{\pi/2}$.

Grafy pre vypočítané a teoretické hodnoty pre jednotlivé n a pre $N_g = 10$ sú zobrazené na obrázkoch 4, 5, 6 a 7, a pre $N_g = 1000$ na obrázkoch 8, 9, 10 a 11.

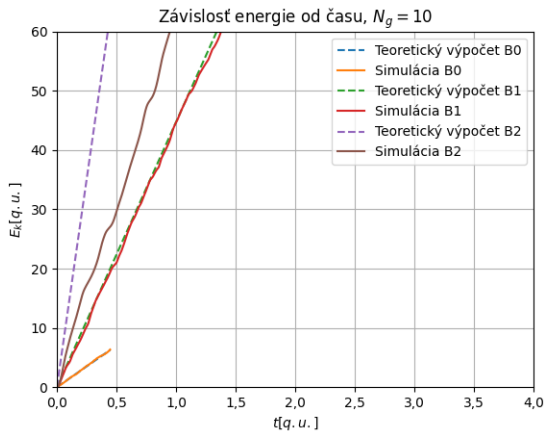
Ako môžeme z týchto grafov vidieť, pre $n = 0, 1$ analytické vzťahy zodpovedajú hodnotám vypočítaným zo simulácií. Pre $n = 2$ sa tieto hodnoty už začínajú výraznejšie odlišovať a pre ešte vyššie n už vôbec nezodpovedajú vypočítaným hodnotám, tak ako indikuje kritérium ich platnosti.

Taktiež si môžeme všimnúť, že ako v práci [1] tak aj z našich simulácií vychádza, že pri hodnotách $n > 2$ majú grafy pre strednú hodnotu v kvantových jednotkách energie na začiatku vysoký nárast a potom narastajú už menej. Pri hodnotách $N_g = 10$ a vidíme, že kinetická energia je nižšia ako v článku [1]. So zvyšujúcim sa N_g sa vypočítané hodnoty kinetickej energie a strednej hodnoty odmocniny posunutia častice. Pri hodnote $N_g = 1000$ hodnota kinetickej energie je už rovnaká v rámci štatistickej chyby, demonštrovanej intervalmi spoľahlivosti pre $t = 1$ alebo $t = 0,5$ na obrázkoch 10, 11, 8 a 9. Odchýlky hodnôt pre $N_g = 10, 100$ si môžeme všimnúť aj pri odmocnине strednej hodnoty kvadrátu posunutia častíc.

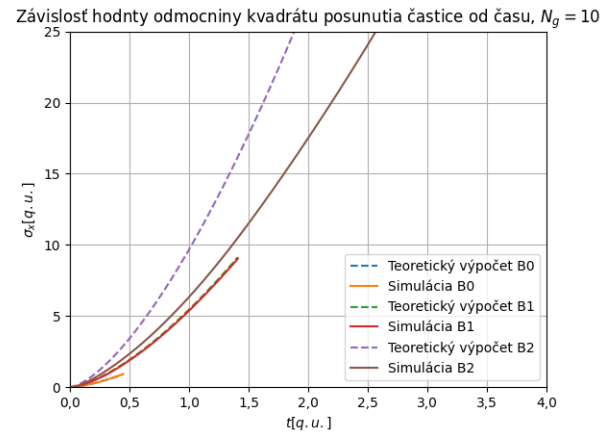
3 Záver

V tejto práci sme porovnávali dva rôzne postupy generácie náhodného fluktuujúceho potenciálu s nenulovou korelačnou dĺžkou a časom. V práci [1] bol generovaný potenciál z predpísanej ACF. V našej práci sme najprv generovali potenciál z jednotlivých gaussiánov a následne sme z neho spravili jeho autokorelačnú funkciu.

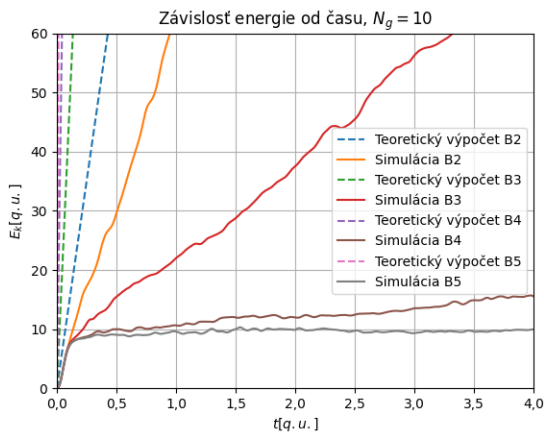
Na základe porovnania vypočítaných hodnôt strednej hodnoty kinetickej energie a strednej hodnoty veľkosti posunutia



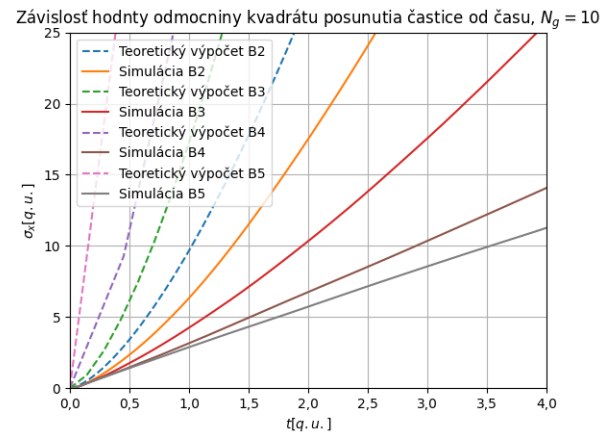
Obr. 4: Výsledky pre strednú hodnotu kinetickej energie pre $N_g = 10$ pre $n = 0,1,2$.



Obr. 6: Výsledky pre strednú hodnotu odmocniny z kvadrátu posunutia častice pre $N_g = 10$ pre $n = 0,1,2$.



Obr. 5: Výsledky pre strednú hodnotu kinetickej energie pre $N_g = 10$ pre $n = 2,3,4,5$.



Obr. 7: Výsledky pre strednú hodnotu odmocniny z kvadrátu posunutia častice pre $N_g = 10$ pre $n = 2,3,4,5$.

častic medzi týmito dvoma spôsobmi generácie náhodného fluktuujúceho potenciálu sme dospeli k záveru, že oba prístupy vedú k štatisticky ekvivalentným potenciálom pre veľký počet použitých gaussiánov. Toto potvrdzujú porovnania výsledkov s výsledkami z práce [1] a s teoretickými výpočtami.

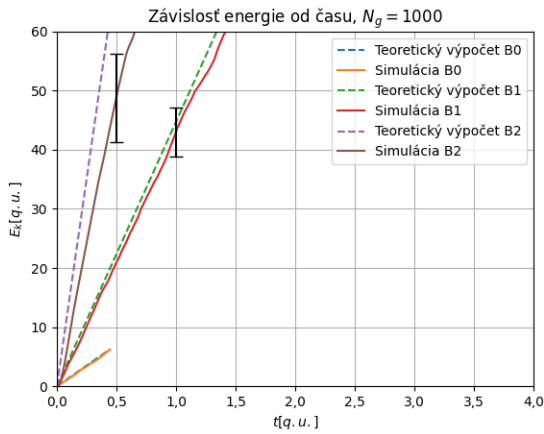
Výsledky tejto práce ukazujú, že takýto prístup generácie náhodného potenciálu je efektívny a umožňuje štúdium kinematiky častíc, a to aj vo vyšších priestorových rozmeroch. Tento prístup môže nájsť uplatnenie pre rôzne oblasti vedy a techniky, kde je potrebné simulovať interakcie medzi časticami a fluktuujúcim potenciálom.

Pod'akovanie

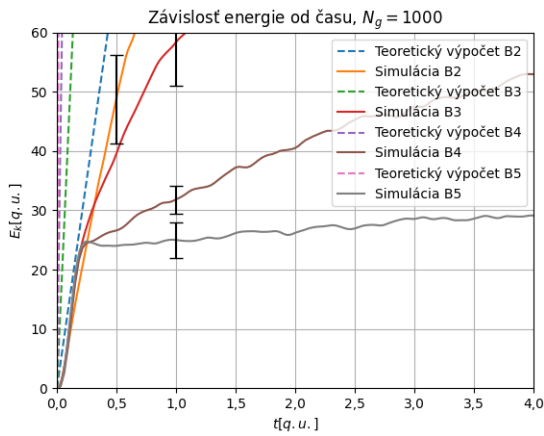
Táto práca bola podporená grantom KEGA 006STU-4/2022 „Digitálna podpora predmetov fyzikálneho inžinierstva“.

Literatúra

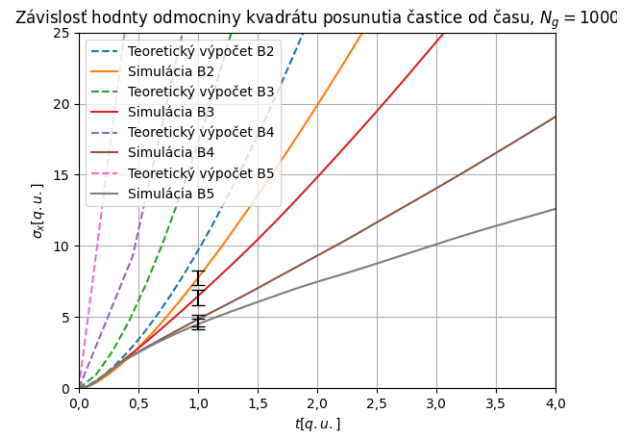
- [1] J. Šťavina, P. Bokes: *Quantum and classical branching flow in space and time*, Phys. Rev. A **106**, 052215 (2022).
- [2] Skinner, Brian and Shklovskii: *Theory of the random potential and conductivity at the surface of a topological insulator*, Phys. Rev. **87**, 075454 (2013).
- [3] Simon, M. and Sancho, J. and Lacasta, Ana María: *On generating random potentials*, Fluctuation and Noise Letters **11**, No.04 1250026 (2012).
- [4] A. Patsyk, U. Sivan, M. Segev, and M. A. Bandres: *Observation of branched flow of light*, Nature **583**, 60 (2020).
- [5] M. Matumoto, T. Nishimura. *Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator*, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation **8** pp. 3-30 (1998).



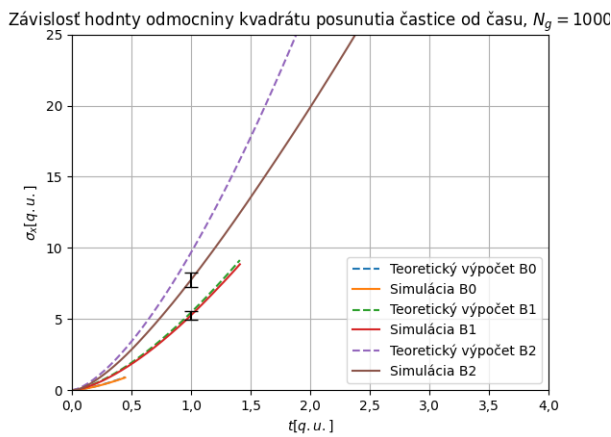
Obr. 8: Výsledky pre strednú hodnotu kinetickej energie pre $N_g = 1000$ pre $n = 0,1,2$.



Obr. 9: Výsledky pre strednú hodnotu kinetickej energie pre $N_g = 1000$ pre $n = 2,3,4,5$.



Obr. 11: Výsledky pre strednú hodnotu odmocniny z kvadrátu posunutia častice pre $N_g = 1000$ pre $n = 2,3,4,5$.



Obr. 10: Výsledky pre strednú hodnotu odmocniny z kvadrátu posunutia častice pre $N_g = 1000$ pre $n = 0,1,2$.

Fázové prechody v organických monovrstvách

Marko Timotej Mesík¹, Juraj Chlpík¹, Július Cirák¹

¹ Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

xmesik@stuba.sk

Abstrakt – Analýza izoteriem monovrstiev kyseliny stearovej a kyseliny olejovej umožňuje identifikovať jednotlivé fázy a fázové prechody dvojrozmernej termodynamickej sústavy. Na presvedčivejšiu identifikáciu prechodov sa používa modul pružnosti v tlaku, ktorý sa v mieste fázových zmien prudko mení. Súčasťou práce je porovnanie charakteristík kyseliny olejovej pri teplotách 10 °C a 20 °C, teda nad a pod teplotou zmeny konformácie molekuly.

1 Úvod

Vlastnosti plynného, kvapalného a pevného skupenstva určuje priestorová štruktúra molekúl a ich vzájomné usporiadanie. Jednou zo stavových veličín v trojrozmernej látke je tlak opisujúci silové pôsobenie na sústavu alebo v sústave molekúl zodpovedné za mnoho javov, ktoré poznáme z každodenného života. Jeho obdoba v dvojrozmerných usporiadaniach častíc nachádzame v podobe tzv. povrchového tlaku. Štúdiom jeho vplyvov na materiály rozptýlené na hladine kvapaliny sa vedci zaoberajú už od doby Benjamina Franklina, no výraznejšie približne od sedemdesiatych rokov minulého storočia [1]. Práca Hansa Kuhna a jeho kolegov [2] prvýkrát predstavila pojem molekulové inžinierstvo. Správanie molekúl na vodnej hladine dnes dokážeme pomerne presne modelovať vďaka technike Langmuirových vrstiev. Tieto experimenty pomáhajú lepšie pochopiť medzimolekulové interakcie prebiehajúce na rozhraní kvapalina-plyn a majú veľký potenciál v mikroelektronike, biofyzike a iných oblastiach vedy [3].

Identifikácia fázových prechodov Langmuirových monovrstiev je dôležitá pri všetkých aplikáciách, či už ide o depoziáciu vrstiev na pevný substrát, základný výskum interakcií molekúl s prímiesami v subfáze, alebo priamo o výskum nových molekúl. Porozumenie priebehu Π - A izotermy patrí k základnej metóde charakterizácie vrstiev, ale aj prístrojového vybavenia v laboratóriu. Cieľom tejto práce je pripraviť monovrstvy dvoch základných molekúl, kyseliny olejovej a kyseliny stearovej na depozičnej vani KSV 5000 ako aj zaznamenať izotermy a opísať niektoré vlastnosti a skupenské javy monovrstiev organických kyselín.

2 Usporiadané dvojdimenzionálne monovrstvy na hladine vody

Na molekuly kvapaliny na jej povrchu pôsobí sila F smerom do vnútra kvapaliny ako dôsledok medzimolekulových interakcií. Povrchové napätie γ definujeme ako túto silu pôsobiacu na jednotku dĺžky [1]:

$$\gamma = \frac{F}{\ell} \quad (1)$$

Niektoré organické molekuly sú schopné usporiadať sa na rozhraní medzi kvapalinou a plynom a tým minimalizovať svoju voľnú energiu. Takto vzniknutú vrstvu nazývame monovrstva, pretože má hrúbku jednej molekuly. Prítomnosť molekulej monovrstvy na hladine kvapaliny ovplyvňuje jej povrchové napätie. Túto zmenu vyjadruje povrchový tlak Π definovaný ako rozdiel povrchových napätí čistej hladiny a kvapaliny s monovrstvou [1]:

$$\Pi = \gamma_0 - \gamma \quad (2)$$

V experimentoch s monovrstvami sa vo všeobecnosti najčastejšie ako subfáza používa voda vďaka pomerne veľkému povrchovému napätiu, ktoré má pri teplote 20 °C hodnotu 72,8 mN/m. Monovrstvy vytvorené na hladine vody nazývame Langmuirove vrstvy.

Základným experimentálnym zariadením na skúmanie monovrstiev je tzv. Langmuirova vaňa. Princíp experimentu spočíva vo vytvorení monovrstvy na vodnej hladine a následnom stláčaní pomocou povrchových bariér. Na začiatku experimentu sa aplikuje silne zriedený roztok organickej molekuly v prchavom rozpúšťadle na hladinu subfázy. Molekuly sú ďaleko od seba, neprebíha medzi nimi takmer žiadna interakcia a môžeme hovoriť o plynnej fáze dvojrozmernej monovrstvy. Plynulým pohybom povrchovej bariéry sa postupne plocha vzťahnutá na jednu molekulu znižuje a molekuly začínajú navzájom interagovať, až v istom bode dôjde k fázovému prechodu z plynnej fázy do kvapalnej. Pri ďalšom stláčaní môžu molekuly niektorých materiálov vytvoriť dokonca pevnú fázu, ktorá sa bude na hladine správať ako dvojrozmerná pružná membrána. Počas celého procesu stláčania meriame závislosť povrchového tlaku Π voči ploche povrchu s aktívnou vrstvou vzťahnutou na jednu molekulu organického materiálu A , z ktorej môžeme určiť jednotlivé fázy monovrstvy. Takto získaný graf pri stálej teplote nazývame Π - A izoterma.

Fázové prechody identifikujeme v miestach izotermy, kde sa krivka prudko láme. Náhle zmeny priebehu izotermy možno identifikovať pomocou modulu pružnosti v tlaku daný ako derivácia povrchového tlaku podľa plochy [1]:

$$E = -A \frac{\partial \Pi}{\partial A} \quad (3)$$

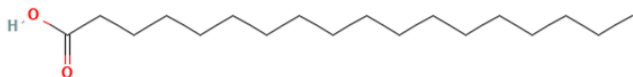
Súvisí tiež so stlačiteľnosťou vrstvy. Vyjadruje zmenu tlaku, ktorá je potrebná na zmenšenie plochy na polovicu. V plynnej fáze monovrstvy očakávame nízke alebo nulové hodnoty mo-

dulu pružnosti a každý fázový prechod bude sprevádzaný jeho náhlym nárastom.

3 Príprava vzoriek

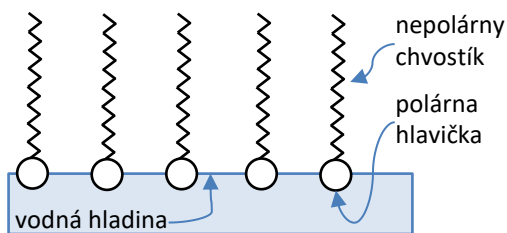
Merali sme monovrstvy dvoch materiálov: kyseliny oktadekárovej známej tiež ako kyselina stearová a kyseliny 9-oktadecérovej, ktorá má bežný názov kyselina olejová. Molekuly týchto kyselín majú charakteristické vlastnosti dané priestorovým usporiadaním a sú vhodné pre Langmuirove experimenty.

Kyselina stearová, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ (obr. 1) je nasýtená masťná kyselina, ktorú tvorí uhlíkovodíkový reťazec s dĺžkou 17 uhlíkov a karboxylová skupina COOH . Alkylový reťazec predstavuje nepolárnu – hydrofóbnu časť a hlavička polárnu – hydrofilnú časť, vďaka nej je kyselina rozpustná vo vode. Takáto protichodná štruktúra umožňuje tvorbu monovrstvy. Na hladine vody sa molekuly usporiadajú tak, že hydrofilná hlavička smeruje dolu smerom k vode a hydrofóbný reťazec je vytláčaný opačným smerom nahor (obr. 2).



Obr. 1. Štruktúrny vzorec kyseliny stearovej. Alkylový reťazec pozostáva zo 17 uhlíkov. Je hydrofóbný a v kondenzovanej fáze smeruje kolmo nahor od hladiny vody [4].

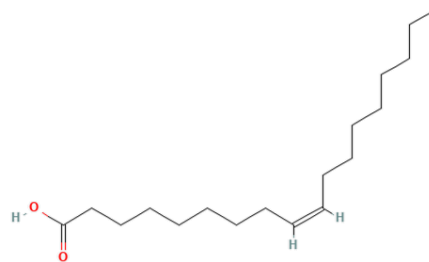
Na začiatku experimentu nie sú molekuly usporiadané tak ako na obrázku 2. Keďže sú ďaleko od seba a navzájom na seba nepôsobia, alkylové reťazce vytrčajú nad hladinou pod rôznymi uhlami. Pri postupnom stláčaní vrstvy sa začnú hydrofóbné reťazce postupne vyrovnávať do vertikálnej polohy a nakoniec budú v pevnej fáze usporiadané paralelne vedľa seba. Ďalšie zvyšovanie tlaku spôsobí zlomenie vrstvy, čím monovrstva zanikne.



Obr. 2. Usporiadanie polárnych molekúl na hladine vody

Kyselina olejová (obr. 3) je nenасыtená masťná kyselina s chemickým vzorcom $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$. Prítomnosť dvojitej väzby presne v strede uhlíkovodíkového reťazca má zásadný vplyv na usporiadanie molekúl na hladine vody. Dvojité väzby spôsobuje zahnutie reťazca a tým zväčšuje plochu molekuly. Molekuly začnú medzi sebou interagovať už pri väčších vzájomných vzdialenostiach, než v prípade kyseliny stearovej, čo sa prejaví v posune izotermy. Dôležitý dôsledok je aj to, že tieto molekuly nevytvoria pri bežných teplotách pevnú fázu. Pri určitom tlaku stále v kvapalnej fáze sa priblížia natoľko, že sa začnú ukladať jedna na druhú

a dôjde k zániku monovrstvy. Od tohto bodu sa už povrchový tlak nebude ďalej zvyšovať a pevná fáza nikdy nenastane.



Obr. 3. Štruktúrny vzorec kyseliny olejovej. Dvojité väzby spôsobuje zahnutie alkylového reťazca [5].

Merania prebiehali na Langmuirovej vani KSV 500 s maximálnou plochou $81\,720\text{ mm}^2$. Pri kyseline stearovej sme počiatočnú plochu pripadajúcu na jednu molekulu zvolili 50 Å^2 . Pripravili sme roztok v spektroskopicky čistom chloroforme s koncentráciou $2,6\text{ μmol/mL}$, čo približne zodpovedá objemu jednej dávky 100 μL . Roztok kyseliny olejovej v chloroforme mal koncentráciu $3,4\text{ μmol/mL}$ pre objem dávky 50 μL a plochu 80 Å^2 pripadajúcu na jednu molekulu pri otvorenej bariére.

4 Experiment

Povrchové napätie hladiny vody s monovrstvou dokážeme zistiť pomocou mikrováh, ktoré merajú celkovú silu pôsobiacu na tzv. Wilhelmyho platničku. Je to tenká platinová doštička so šírkou $19,62\text{ mm}$ umiestnená zvislo tesne nad úrovňou vodnej hladiny v kontakte s povrchom vody prostredníctvom adhézných síl. Tým eliminujeme vztlakovú silu vody, ktorá by pôsobila na platničku ponorenú pod hladinu. Výsledná sila, ktorú merajú mikrováhy, je súčtom sily F , ktorá ťahá molekuly v povrchovej vrstve dovnútra kvapaliny a známej tiažovej sily platničky F_g . Dĺžka hrany ℓ vo vzťahu (1) pre povrchové napätie je dvojnásobok šírky platničky, pretože povrchová sila pôsobí po celom jej obvode, nie len na jednej strane. Povrchový tlak určujeme zo vzťahu (2) prakticky tak, že váhy vynulujeme pri kontakte s čistou hladinou vody ešte pred nanosením organickej látky.

Čistota zariadenia je pri experimentoch s monovrstvami kľúčová, keďže aj drobné nečistoty môžu mať výrazný vplyv na výsledok. Ako subfázu sme používali ultračistú, deionizovanú vodu s rezistivitou $18,2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ filtračného zariadenia Smart2Pure UV. Teplota vody bola počas merania kontrolovateľná termostatom. Po ustálení teploty sme na váhu zavesili Wilhelmyho platničku, vynulovali sme váhy a skontrolovali sme prípadné nečistoty na hladine rýchlym stlačením bariér. Prípadné artefakty sme odsali z povrchu subfázy. Po otvorení bariér by sa nemali hodnoty povrchového tlaku čistej vody meniť.

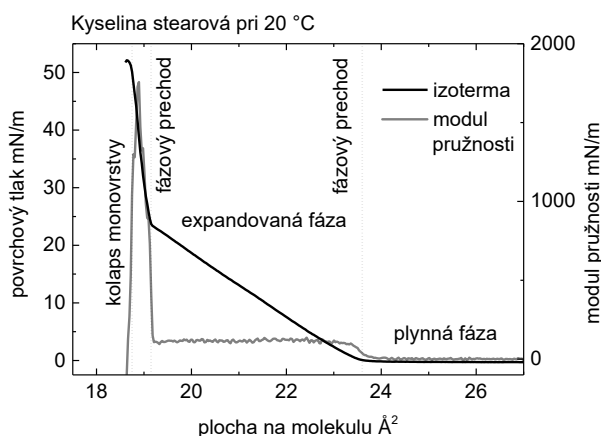
Roztok sme aplikovali pomaly a po malých kvapkách tak, aby čo najviac molekúl ostalo rozptýlených na hladine. Používali sme mikrostriekačku Hamilton s objemom 100 μL . Po aplikácii sme čakali cca 20 min na sformovanie monovrstvy a odparenie rozpúšťadla. Potom sme vynulovali váhy a začali stláčať bariéry rýchlosťou 10 mm/min .

5 Výsledky a diskusia

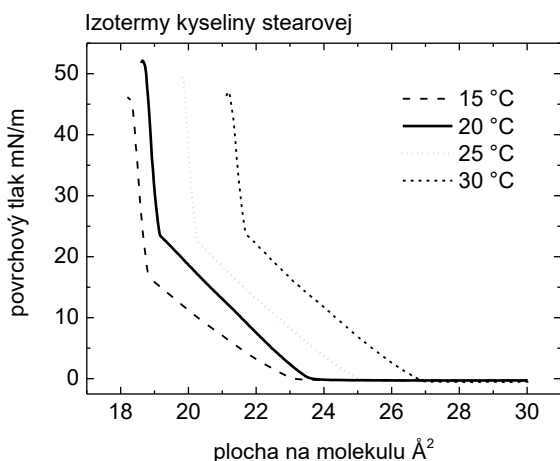
Veličinu plocha na molekulu budeme uvádzať v jednotkách angström štvorcový ($1 \text{ \AA}^2 = 0,01 \text{ nm}^2$).

Na obrázku 4 sú zvýraznené jednotlivé fázy a fázové prechody monovrstvy kyseliny stearovej na hladine vody pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Prudký nárast modulu pružnosti jasne zodpovedá bodom, v ktorých sa izoterma láme.

Graf na obrázku 5 znázorňuje posunutie izoteriem kyseliny stearovej v závislosti od teploty. S rastúcou teplotou rastie limitná plocha pripadajúca na jednu molekulu, ktorú určuje priesečník lineárneho predĺženia časti izotermy v tesnej kondenzovanej fáze s vodorovnou osou izotermy. Je to plocha, ktorú by zaberala vzpriamená molekula pri nulovom tlaku. Zväčšovanie limitnej plochy s teplotou je v súlade s očakávaním, keďže s vyššou teplotou majú molekuly väčšiu kinetickú energiu. Dôležité body izoteriem sú sumarizované v tabuľke 1.



Obr. 4. Izoterma monovrstvy kyseliny stearovej pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (čierna čiara) a modul pružnosti (šedá čiara)



Obr. 5. Porovnanie izoteriem monovrstvy kyseliny stearovej pri rôznych teplotách

Vplyv rozdielnej molekulovej štruktúry kyseliny stearovej a kyseliny olejovej na priebeh izoteriem je zrejmý z porovnania na obrázku 6. Dvojité väzba molekuly kyseliny olejovej spôsobuje zahnutie alkylového reťazca, čo sa prejaví ako zväčšenie efektívnej plochy molekuly. Častice v monovrst-

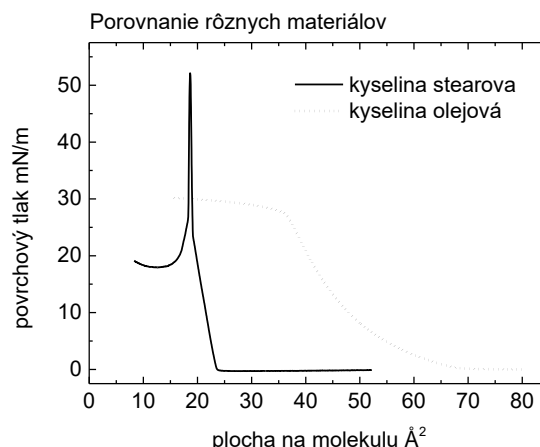
ve začnú medzi sebou interagovať pri väčších vzájomných vzdialenostiach, ako v prípade kyseliny stearovej, izoterma monovrstvy kyseliny olejovej je posunutá smerom doprava. Taktiež pozorujeme, že monovrstva kyseliny olejovej na rozdiel od stearovej nedosiahla kondenzovanú fázu.

Tab. 1. Fázové prechody a dôležité body izoteriem kyseliny stearovej pri rôznych teplotách

teplota $^\circ\text{C}$	1. fázový prechod \AA^2	2. fázový prechod \AA^2	kolaps monovrstvy \AA^2	limitná plocha \AA^2
15	18,8	23,1	18,4	19,0
20	19,2	23,6	18,7	19,3
25	20,2	25,1	19,8	20,4
30	21,7	26,9	21,2	21,9

Izotermy kyseliny olejovej pri teplotách $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ sú zobrazené na obrázku 7. Fázový prechod z plynnej do kvapalnej (expandovanej) fázy identifikujeme v bode $66,5 \text{ \AA}^2$ pri teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $68,6 \text{ \AA}^2$ pri teplote $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Pri vyššej teplote je kritická plocha na molekulu nižšia (opačný trend voči kyseline stearovej). Molekula kyseliny olejovej mení pri teplote medzi 13 a $14 \text{ }^\circ\text{C}$ formu z rigidnej na gélovú. Pri teplote nižšej ako $13 \text{ }^\circ\text{C}$ je alkylový reťazec ohnutý pod presným uhlom. Pri vyšších teplotách však molekula „mäkne“, alkylový reťazec je zahnutý voľnejšie a molekuly už nedržia tak pevne tvar, čo spôsobuje zmenšenie plochy jednej molekuly.

Zaujímavé je tiež porovnanie modulu pružnosti monovrstvy kyseliny olejovej pri spomínaných teplotách na obrázku 8. Rigidná forma molekuly pri $10 \text{ }^\circ\text{C}$ má podľa očakávania v expandovanej fáze vyšší modul pružnosti, vrstva je teda pevnejšia. Počas stláčania modul pružnosti rastie pri oboch teplotách – dochádza k spevňovaniu vrstiev. Tesne pred kolapsom sa moduly pružnosti vyrovnávajú.



Obr. 6. Porovnanie izoteriem monovrstiev kyseliny stearovej (plná krivka) a kyseliny olejovej (prerušovaná krivka) pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Na obrázku 9 porovnáваме izotermu kyseliny olejovej pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a modul pružnosti. Povrchový tlak Π ideálneho dvoj-

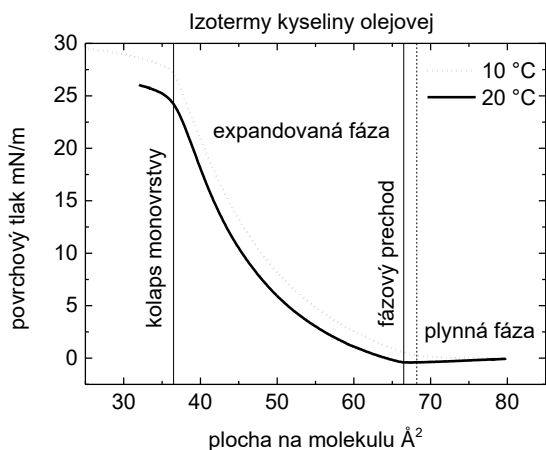
rozmerného plynu je podľa stavovej rovnice nepriamo úmerný ploche na molekulu A [1]:

$$\Pi = \frac{kT}{A} \quad (4)$$

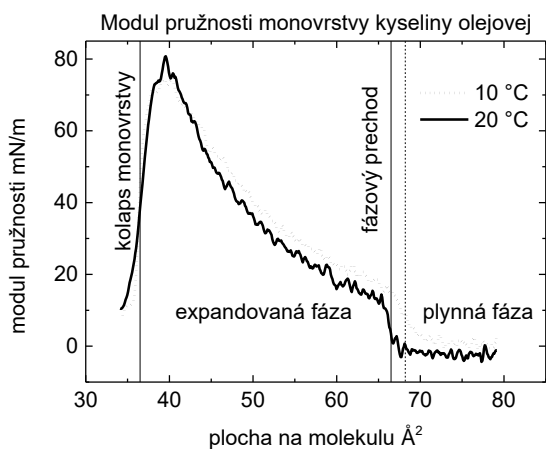
kde k je Boltzmannova konštanta a T je termodynamická teplota vrstvy.

Pozorujeme však, že tlak je počas celej doby v plynnej fáze konštantný (nulový). Monovrstva sa teda v plynnej fáze nespráva ako ideálny voľný plyn. Keďže molekuly vody aj molekuly kyseliny sú silné dipóly, dochádza medzi nimi k interakcii, čo zabraňuje úplne voľnému pohybu molekúl po hladine. Vzájomné interakcie molekúl monovrstvy v plynnej fáze sú zanedbateľné a povrchový tlak nie je možné zaznamenať. Ako sa plocha blíži ku kritickej hodnote, tlak začne stúpať a nastáva fázový prechod do expandovanej fázy (obrázok 8).

Pri ďalšom zvyšovaní tlaku dochádza ku kolapsu monovrstvy. Izoterma prestane rásť alebo rastie len minimálne, na rozdiel od kyseliny stearovej, pri ktorej pozorujeme hneď po zlome prudký pokles (obr. 6).

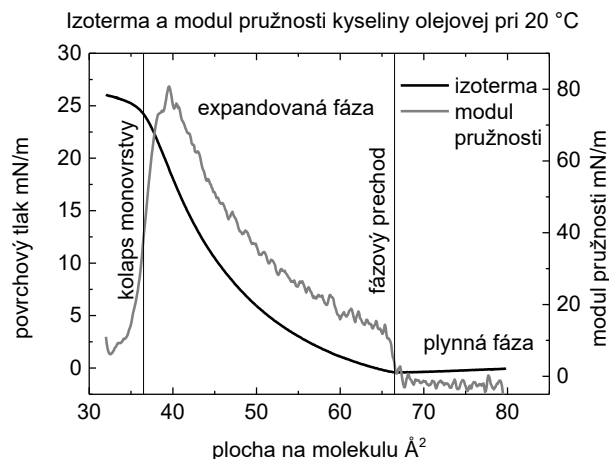


Obr. 7. Porovnanie izotermi monovrstvy kyseliny olejovej pri rôznych teplotách



Obr. 8. Porovnanie mechanických vlastností monovrstvy kyseliny olejovej z hľadiska modulu pružnosti v tlaku pri rôznych teplotách

Kolaps monovrstvy je tiež sprevádzaný prudkým poklesom modulu pružnosti v prípade kyseliny stearovej na orázku 4 pri ploche $18,7 \text{ \AA}^2$, ale aj v prípade kyseliny olejovej na obrázku 8 pri ploche 36 \AA^2 . V monovrstve kyseliny stearovej, sa molekuly v pevnej fáze po zlomení monovrstvy začnú ukladať jedna na druhú a vytvoria viacvrstvu, ktorej roviny sa po sebe šmýkajú s malým odporom a teda povrchový tlak klesá. Pri olejovej kyseline dôjde k podobnému javu s tým rozdielom, že priestorové rozloženie molekúl s charakteristicky zahnutým alkylovým reťazcom nad hladinou vody bude spôsobovať silnejšie medzimolekulové interakcie medzi vzniknutými vrstvami, preto tlak nebude klesať.



Obr. 9. Izoterma a modul pružnosti monovrstvy kyseliny olejovej

6 Záver

Molekuly organických kyselín tvoria na vodnej hladine usporiadané štruktúry, ktoré vykazujú typické vlastnosti vychádzajúce z ich usporiadania a priestorovej konformácie. V tejto práci sme tieto interakcie a opísali na základe analýzy meraní Π - A izoterm dvoch polárnych zlúčenín, kyseliny stearovej a kyseliny olejovej pri rôznych teplotách. Výsledky meraní monovrstiev kyseliny stearovej ako štandardu Langmuirových vrstiev potvrdili funkčnosť experimentálneho zariadenia najmä v súvislosti s použitím nového zdroja deionizovanej vody Smart2Pure UV od firmy Thermo Scientific s rezistivitou $18,2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$. Fázové prechody v monovrstvách sme identifikovali tiež pomocou modulu pružnosti v tlaku. Zvlášť zaujímavé sú merania kyseliny olejovej pod a nad teplotou zmeny konformácie molekuly z rigidnej na gélovú formu, kde sa ukázalo, že mechanické vlastnosti monovrstvy tesne pred kolapsom prakticky nezávisia od teploty.

Pod'akovanie

Práca bola vypracovaná s finančnou podporou projektu Kultúrnej a edukačnej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA č. 006STU-4/2022.

Literatúra

- [1] PETTY, M. C. 1996. *Langmuir-Blodgett films: An introduction*. Cambridge University Press, 1966.
- [2] KUHN, H. – MÖBIUS, D. Monolayer assemblies. In *Investigations of Surfaces and Interfaces*. Physical Methods of Chemistry Series eds. Bryant William Rossiter and Roger C. Baetzold. Časť B, kapitola 6, zväzok. 9B, 2. vydanie. New York: Wiley, 1993.
- [3] TÓTHOVÁ, L. 2012. Interakcia LB Monovrstiev s DNA, diplomová práca, Univerzita Komenského v Bratislave, 2012
- [4] National Center for Biotechnology Information. 2024. PubChem Compound Summary for CID 5281, Stearic Acid. Stiahnuté 2. apríla 2024 zo stránky <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Stearic-Acid>.
- [5] National Center for Biotechnology Information. 2024. PubChem Compound Summary for CID 445639, Oleic Acid. Stiahnuté 2. apríla 2024 zo stránky <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Oleic-Acid>.

ANALÓGOVÉ A FILAMENTÁRNE MEMRISTORY

Natalia Kamila Calvo^{1,2}, Boris Hudec², Peter Ballo¹

¹Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

²Elektrotechnický Ústav SAV, v.v.i., Bratislava

xcalvo@stuba.sk

Abstrakt – Memristory sú novodobé elektronické súčiastky, ktoré majú potenciál zmeniť súčasnú technológiu. V tomto článku skúmame vlastnosti filamentárnych a analógových memristorov. Analógové memristory menia svoj odpor na základe preusporiadania elektrónov (dier). Filamentárne memristory využívajú tvorbu vodivých ciest v dielektrickom materiáli pomocou iónov. Analógové a filamentárne memristory majú rôzne vlastnosti, a preto sú vhodné na iné aplikácie. Štúdium a porovnanie analógových a filamentárnych memristorov je preto potrebné, tak ako aj chápanie, ako na ich vlastnosti vplývajú jednotlivé kroky pri ich výrobe.

1 Úvod

Rozvoj technológii vždy čelil mnohým problémom. V súčasnosti máme vysoké požiadavky na výpočtový výkon a pracujeme s veľkým množstvom informácií. Nesúlad medzi rýchlosťami výpočtovej jednotky a úložného priestoru vo von Neumannovej architektúre neumožňuje dosiahnuť takú vysokú účinnosť spracovania dát, aká je dnes potrebná a vyžaduje si vysokú spotrebu energie. Je preto potrebné vymyslieť spôsob, ktorý bude fungovať na inom princípe.

Mozog ukladá a spracováva informácie prostredníctvom synapsii medzi neurónmi. Práca s dátami a pamäť nie sú v mozgu samostatné jednotky, ale pracujú súčasne, čo je pre nás veľmi efektívne. Pomocou špeciálnych súčiastok, takzvaných memristorov môžeme napodobniť funkciu ľudského mozgu. [1]

1.1 Memristory

Memristory patria medzi štyri elementárne elektrotechnické súčiastky. Už pred viac ako päťdesiatimi rokmi León Chua predpokladal, že popri rezistore, kondenzátore a cievke musí existovať ešte jedna elementárna súčiastka. [2] Motiváciou bolo, že tieto tri súčiastky môžu byť vždy definované pomocou vzťahu medzi dvoma zo štyroch základných veličín pre elektrické obvody: napätie, prúd, náboj a tok:

$$r = \frac{dv}{di} \quad (1)$$

$$c = \frac{dq}{dv} \quad (2)$$

$$l = \frac{d\varphi}{di} \quad (3)$$

Zároveň vedeli, že vzťahy medzi nábojom a prúdom a medzi tokom a napätím sú nasledovné:

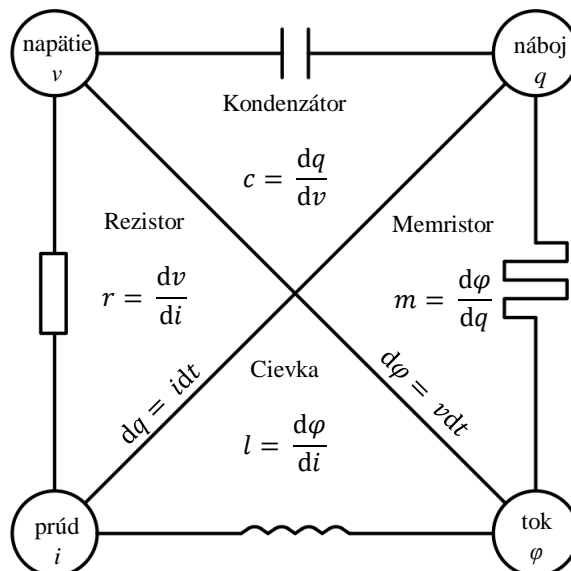
$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (5)$$

Jeden vzťah ešte chýbal, a to súvis medzi tokom a nábojom, čo naznačovalo existenciu ešte jednej elementárnej súčiastky:

$$m = \frac{d\varphi}{dq} \quad (6)$$

Takýmto spôsobom boli memristory v roku 1971 teoreticky predpovedané.



Obr. 1. Elementárne elektrotechnické súčiastky

Stav memristora sa dá opísať ako podiel napätia a prúdu:

$$m = \frac{d\varphi}{dq} = \frac{vdt}{idt} = \frac{v}{i} \quad (7)$$

Podľa Ohmneho zákona je memristancia v čase t_1 daná množstvom náboja, ktoré sa naakumulovalo od počiatočného času t_0 po t_1 . Memristor je teda pasívna dvojterminálová súčiastka podobná rezistoru, s premenlivým elektrickým odporom. Jeho odpor závisí od množstva a smeru pohybu nosičov náboja. Memristory zachovávajú hodnotu nastaveného odporu aj po odpojení od zdroja napájania. [2] [3]

2 Analógové a filamentárne memristory

Základná štruktúra memristora pozostáva z vrchnej elektródy, dielektrika a spodnej elektródy. Hodnota odporu memristorov sa nastavuje aplikovaním napätia. Prechod zo stavu s vysokým odporom na stav s nízkym odporom môže prebiehať rôznymi spôsobmi, ktoré závisia od materiálu medzi elektródami. [4]

Veľkosť odporu memristora analógového typu sa mení postupne. Zmena odporu prebieha na rozhraní medzi kovovou elektródou a oxidom. Je spôsobená napríklad elektrochemickou migráciou kyslíkových vakancií, zachytávaním elektrónov alebo dier. Kvôli tomu sú analógové memristory vhodnejšie pre neuromorfiku.

Vo filamentárnych memristoroch sa odpor znižuje tvorbou filamentov medzi elektródami. Anióny ako O^{2-} , Cl^- alebo katióny ako Ag^+ alebo Cu^{2+} migrujú a vytvárajú filamenty prostredníctvom redoxných reakcií. Medzi elektródami vzniká vodivá cesta. Pri resetovaní, teda prechodu na stav s vyšším odporom, sa vlákna filamentu pretrhnú a vodivá cesta sa zredukuje. Tvorba filamentov umožňuje spoľahlivé zachovanie nastavenej hodnoty odporu, a preto sú takéto memristory vhodné pre pamäť.

Veľký rozdiel medzi mechanizmami analógových a filamentárnych memristorov je závislosť ich odporu od plochy. Pri analógových memristoroch sa znižuje odpor po celej ploche, kým pri filamentárnych sa odpor mení lokálne, iba v oblasti kde vznikajú filamenty. [5]

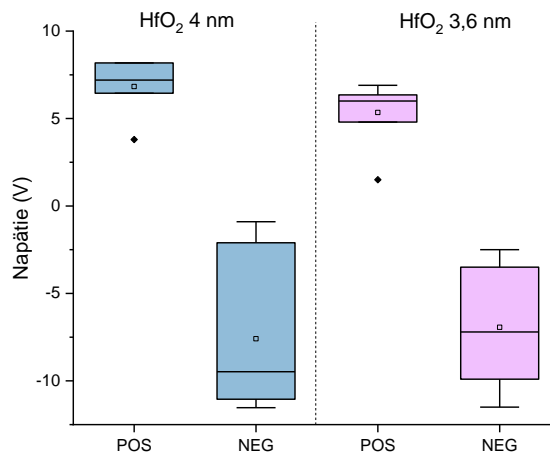
3 Praktická časť

3.1 Analógové memristory

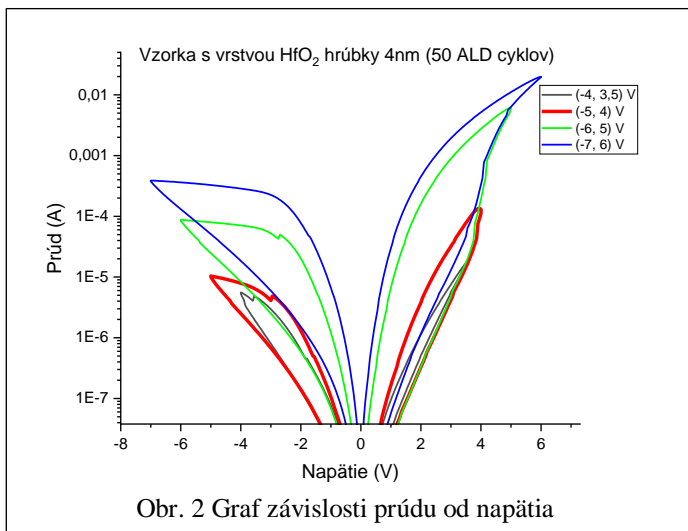
Analógové memristory, ktoré sme merali pozostávali z dvoch elektród: Ni a TiN, naparené fyzikálnou depozíciou z plynnej fázy (PVD). Medzi nimi sa nachádza dielektrikum z oxidov: HfO_2 a TiO_2 , nanosené ALD technológiou.

Merali sme dve vzorky analógových memristorov, s hrubšou vrstvou HfO_2 (Obr. 2) a s tenšou vrstvou HfO_2 (Obr. 3). Aj keď medzi nimi bol rozdiel len 5 ALD cyklov (približne 0,4 nm), výrazne sa mení množstvo prúdu, ktorý tečie memristorom.

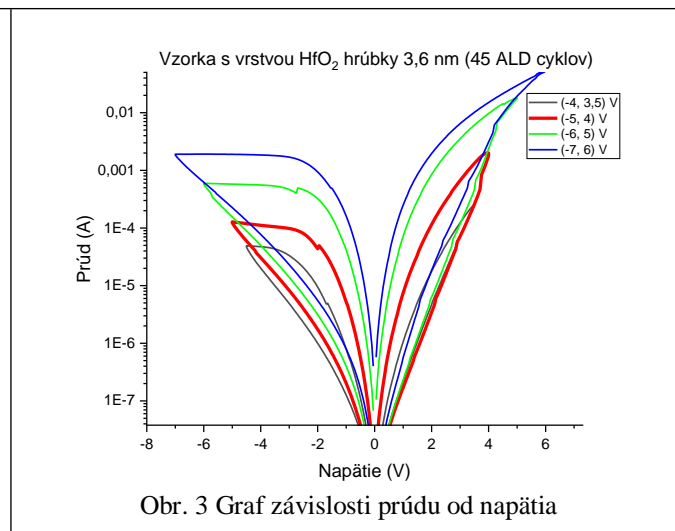
Memristory je potrebné prevádzkovať pri napätiach nižších ako prierazné. S hrúbkou narastá aj prierazné napätie. Na Obr. 4 vidíme kde sa pohybujú hodnoty prierazných napätí memristorov pre kladné aj záporné napätie. Pre hrubšiu vzorku je absolútna hodnota prierazného napätia vyššia aj pre kladné aj pre záporné napätie v porovnaní s tenšou vzorkou.



Obr. 4 Graf hodnôt prierazných napätí pre hrubšiu a tenšiu vzorku



Obr. 2 Graf závislosti prúdu od napätia



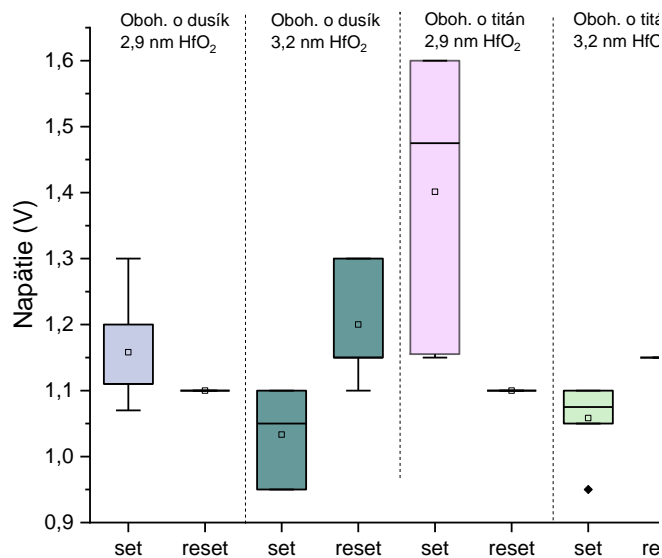
Obr. 3 Graf závislosti prúdu od napätia

3.2 Filamentárne memristory

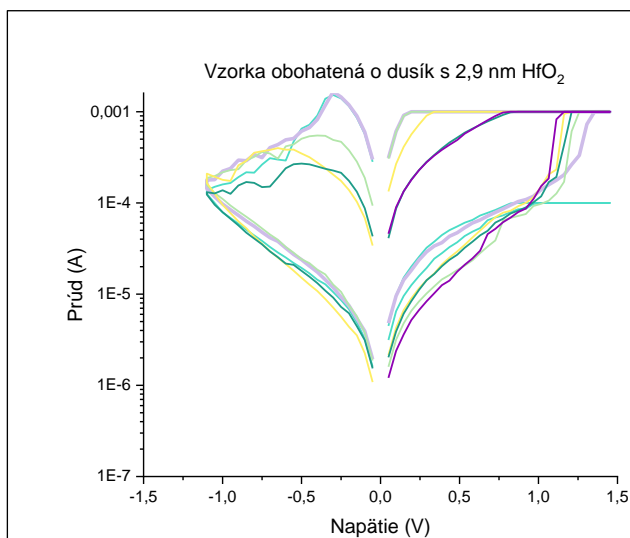
Filamentárne memristory, ktoré sme merali pozostávali z dvoch elektród: Au/Ag a TiN. Medzi nimi je oxid HfO₂ nanesený ALD technológiou. Hrúbka HfO₂ vrstvy bola 2,9 nm a 3,2 nm. Elektróda TiN sa vo vzorkách tiež líšila.

Prvý typ elektródy TiN bol mierne obohatený o dusík (49:51% z Ti:N) a mal drsnejšiu polykryštalickú štruktúru. Drsnejší polykryštalický povrch umožňuje jednoduchšiu tvorbu filamentov. Pre tento typ elektród sme zaznamenali stabilnejšie odporové prepínanie na tenšej vzorke v porovnaní s hrubšou vzorkou (Obr. 5) aj keď očakávame opačné správanie. Príčinou tohto javu je predmetom ďalšieho skúmania.

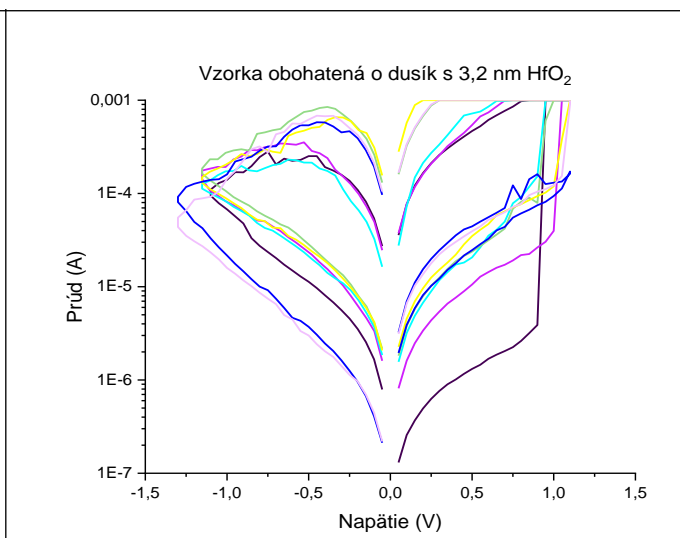
Druhý typ elektród bol mierne obohatený o titán (51:49 % z Ti:N) s hladšou polykryštalickou štruktúrou. Isté percento titánu zoxiduje, čím sa vytvorí ultra-tenká vrstva (1-2 nm) TiO_x medzi HfO₂ a TiN. Pri tenšej vzorke je odporové prepínanie menej stabilné, pravdepodobne kvôli tomu, že hrúbky vrstiev TiO_x a HfO₂ sú porovnateľné. To spôsobuje, že vznikajúca vodivá cesta má náhodné príspevky iónov aj z vrstvy TiO_x. Vzorka s hrubšou vrstvou HfO₂ má stabilné odporové prepínanie (Obr. 5).



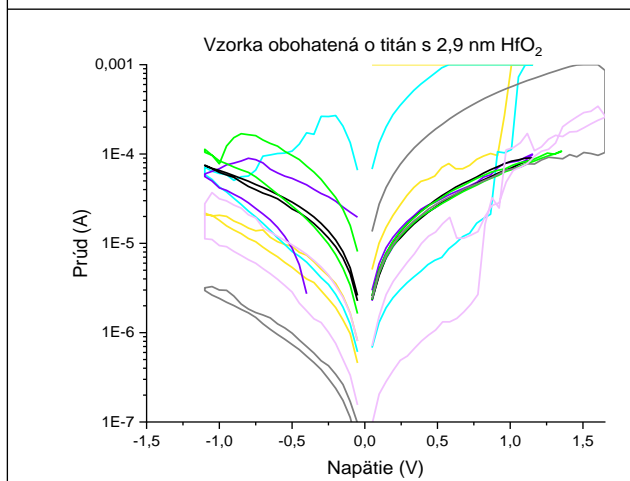
Obr. 5 Graf hodnôt napätia pri odporovom prepínaní



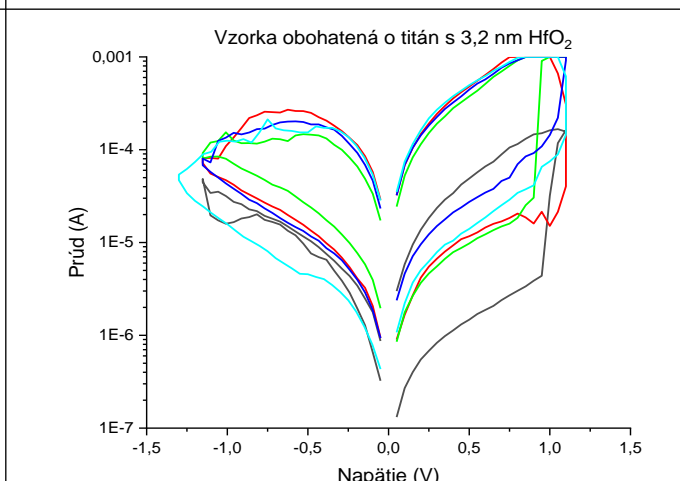
Obr. 6 Graf závislosti prúdu od napätia



Obr. 7 Graf závislosti prúdu od napätia



Obr. 8 Graf závislosti prúdu od napätia



Obr. 9 Graf závislosti prúdu od napätia

4 Záver

Memristory sú novodobé elektronické súčiastky, ktoré sa skúmajú pre ich schopnosť napodobniť synapsie v ľudskom mozgu. Pre ich vývoj je potrebné pochopiť ako vplývajú jednotlivé kroky v procese výroby na vlastnosti memristorov. Skúmali sme ako vplývajú hrúbka dielektrika a obohatenie elektródy na memristory. Pozorovali sme ako zmeny týchto parametrov vplývajú na analógové a filamentárne memristory:

Pri analógových memristoroch sme zistili, že:

- Rozdiel hrúbky 0,4 nm vrstvy HfO_2 (hrúbka jednej atómovej vrstvy) spôsobuje pri tom istom napätí o rád vyššie prúdy v hrubšej vzorke.
- Prierazné napätie narastá s hrúbkou.

Pri filamentárnych memristoroch sme zistili, že:

- Hrubšia vzorka obohatená o titán má veľmi stabilné odporové prepínanie v porovnaní s tenšou vzorkou.
- Nestabilné odporové prepínanie na tenšej vzorke obohatenej o titán je pravdepodobne spôsobené náhodnými iónmi uvoľnenými z TiO_x vrstvy.

Pod'akovanie

Chcela by som poďakovať Matejovi Horskému a Ing. Borisovi Hudecovi, PhD. za ich trpezlivosť, pedagogickú pomoc a rady.

Literatúra

[1] CHEN, W. et al. 2023. Essential Characteristics of Memristors for Neuromorphic Computing. In *Advanced Materials*. 2023, vol 9, 2200833.

[2] CHUA, L. 1971. Memristor-The missing circuit element. In *IEEE Transactions on Circuit Theory*. 1971, vol. 18(5), 507-519.

[3] MOHANTY, S. P. 2013. Memristor: From Basics to Deployment. In *IEEE Potentials*, vol. 32(3), 34-39.

[4] CAO, Z. et al. 2023. Memristor-based neural networks: a bridge from device to artificial intelligence. In *Nanoscale Horizons*. 2023, vol 8, 716-745.

[5] SAWA, A. 2008. Resistive switching in transition metal oxides. In *Materials Today*. 2008, vol 11(6), 1369-7021.

Basic spectroscopy of bright stars

Mykola Melnyk

¹ Institute of Nuclear and Physical Engineering, FEI STU in Bratislava

xmelnyk@stuba.sk

Abstract – In this paper, we describe fundamentals of stellar, visible light spectroscopy. Using amateur class Schmidt-Cassegrain telescope and simple optical grating, we succeeded to gather spectra of several bright stars. We observed, without a doubt, differences in raw stellar spectra. Using LED spectra validation for wavelength and simple intensity calibration technique, we got conclusive spectral shapes, matching catalogued relative magnitudes and temperatures of observed stars.

1 The rationale of stars spectroscopy

Spectroscopy is a key component in various branches of contemporary physics. It is understandably widely used in astronomy as one of a major characterisation tool. Stars spectra contain wealth of information about surface temperature, chemical composition, radial velocity etc. Spectroscopic instruments are common in both terrestrial and space telescopes. Depending on quality of spectroscopes used, even chemical composition of several exoplanet atmospheres, have been revealed using space telescopes.

In our work we aimed at much less ambitious targets, however. Specifically, to observe differences between different evolution stage stars spectra and compare measured intensity vs. tabulated luminosity of stars. Since our equipment allowed us to study only several brightest (high luminosity) stars, we selected relatively nearby main sequence stars (Sirius, Rigel) and red supergiant (Betelgeuse) star.

1.1 Basics of star light emission

Nuclear fusion, a process that takes place in stars cores, is what allows stars to generate energy and consequently to emit light. For the most common, so-called main sequence stars, the p-p cycle is responsible for the main share of energy production. High temperatures and extreme pressures force protons (i.e. hydrogen atoms nuclei) to collide frequently, and although still bellow direct fusion threshold, the tunnelling effect allows relatively stable and prolonged fusion of four protons into ⁴He nuclei (through deuterium and ³He nuclei transitional stages). The energy is transferred via radiation, and in upper stars layers also convectively, to stars outer layer. The surface temperature and chemical makeup of a star determine the range of light it emits. Cooler stars release more red and infrared light, while hotter stars release more energy in blue and ultraviolet band.

2 Fundamentals of spectroscopy

To split multi wavelength light beam into spectrum, two basic principles are applied. In the most common method, known from schools, based on wave dispersion relation when spectral triangle made of transparent glass, is splitting incoming beam into different angles. Less known, but practically more frequent is method based on diffraction-interference effect achievable on various optical grating elements. Both approaches illustrates Fig. 1.

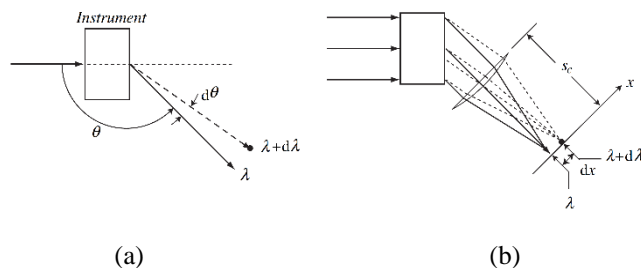


Fig. 1. Spectroscopes with: angular dispersion (a) and linear dispersion (b).

Both methods are technically feasible, while possessing certain pros and cons. Dispersion method require transmission through dispersive glass, causing at least partial loss of beam intensity. The same is true for transmission optical gratings, while majority of scientific grade spectroscopes comprise reflective gratings. Diffraction refers to the bending or spreading of waves as they encounter an obstacle or aperture. The essential parts of diffraction wave patterns include wave source (in our case light), obstacle or aperture (our grating), screen or detector (camera). Intensity of a single-slit pattern is determined through Eq. 1.

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}} \right)^2 \quad (1)$$

where a is a width of the slit, θ angle of diffraction, λ wavelength of incident light and I_0 - intensity of incident light. In double slit case, we have to account for phase difference of the each wave and distance between two stils, leading to Eq. 2.

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda}} \right)^2 \cos \varphi^2 \quad (2)$$

where φ is phase difference between two adjacent slits, separated by d distance (grating constant) [1].

Typical multi slit grating essentially aggregate contributions of individual slits, causing narrowing maximal intensity beam spread angle. This allows assign to each distance x (see Fig. 1) corresponding wavelength as

$$\lambda = \frac{d}{S_c} x \quad (3)$$

where distance x is measured from zero's order of diffraction maximum.

2.1 Equipment used

Our spectrometer uses transmission grating in the form of a simple optical 1D lattice with 100 slits per mm (grating constant $d = 10^{-5}$ mm) and 1.25 inch diameter. It was installed at certain distance (S_c) in front of the camera sensitive element at the focal point of 9.25 inch Celestrone EdgeHD Schmidt-Cassegrain telescope (details see Tab. 1.)

Tab. 1. Technical specifications of the telescope

Design	Schmidt-Cassegrain
Aperture (main mirror diameter)	235 mm
Focal Length	2350 mm
F/ratio	10
Central Obstruction	85 mm
Optical tube length	560 mm
Light gathering Power	1127x
Angular resolution:	
Rayleigh Criterion	0,59 arc seconds
Dawes Limit	0,49 arc seconds

The colour astronomical camera Omegon veLOX 178C, with 7.4 mm x 4.9 mm (3096 x 2080 pixels) sensor, served as light detection instrument. Standard laptop, running TouPSky control software, connected to the camera via USB 3 port functions as data collection system [2].

3 Experimental approach and results

For the purpose of our experiment, we observed bright stars observable at south-west, late winter sky. They traditional names, astronomical designation and basic characteristics are listed in Tab. 2. Sirius, Mizar, Alcor are located in the same spectral group, which corresponds to their whitish colour and similar surface temperatures. Betelgeuse is categorized as red-orange supergiant. Rigel is a type B star, the hottest but not the brightest blue-white star, mainly due to its distance from our Solar system (largest from observed stars).

Tab. 2. Characteristics of observed stars

Name	Abbrev.	Apparent magnitude		Distance (ly)	Spectral type	Surface temp. (K)
		teor.	real			
Sirius A	α CMa	-1.45	-1.13	8.6	A1V	9940
Betelgeuse	α Ori	0.45	0.64	408-548	M1-M2Ia	3,600
Rigel	β Ori	0.15	0.47	860	B8 Ia	12,100
Mizar	ζ Ursae	2.20	4.15	82.9	A2Vp	9,000
Alcor	Majoris	3.95	3.99	81.7	A5V	8221

Listed theoretical and real apparent magnitudes are adopted according to [1].

3.1 Wavelength calibration using LED's

From a simple measurement of distance between grating and active light sensor, known camera sensor pixels size (periodicity), we were able to use Eq. (3) to assign wavelength corresponding to each illuminated sensor pixel. Although colour camera was used, to suppress artefacts of sensor focal plane Bayer pattern, the greyscale, whole array raw images have been recorded and stored in common astronomical (fits) format. In Fig. 2 we demonstrate raw grayscale image of four LED's of different colours observed at the distance of more than 40 m from telescope aperture, with 250 μ s exposure time and 40 mm distance (S_c) from grating to sensor.



Fig. 2. Raw spectra of four LED's. Spots at left image side corresponds to direct (0th order) diffraction maxima of LED's and their 1st order spectra are right (from top: green, white, red and blue LED). Image intensity was numerically increased for better visibility.

Although observed wavelength could be directly calculated via Eq. 3, we performed a check of the wavelength calibration of our spectrometer system. We used four different colour LED's, with manufacturer's data listed in Tab.3.

Tab. 3. Characteristics of calibration LED's

LED colour	wavelength (nm)
bright red	645
pure green	525
bright blue	460 - 470
white	no data available

As seen from Tab. 3 and Fig. 3, observed spectral response of our spectrometer agreed with LED's manufacturer's data.

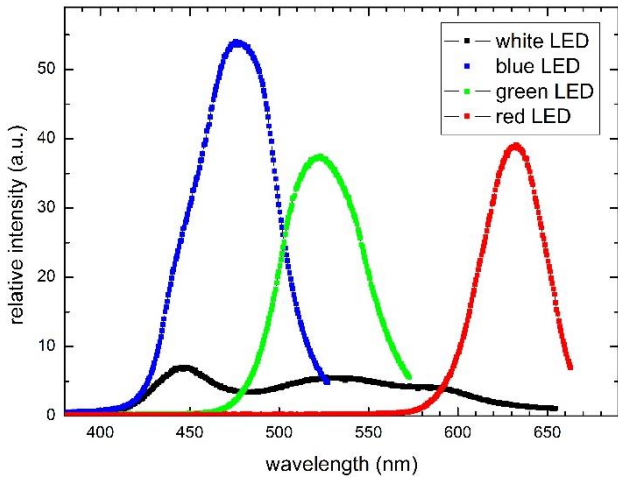


Fig. 3. Spectra of calibration LED's.

The relative resolution (or line spread function) is a key figure that characterizes the still resolved smallest wavelength interval ($\Delta\lambda$). The spectrometers resolution R is defined as

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

where $\Delta\lambda$ are taken at FWHM (Full width at half maximum) of observed spectral line. For our simple spectroscopic system the Gauss fit of red LED spectrum line gives FWHM of 41.7 nm at 631.3 nm, i.e. $R = 15.1$ achieved resolution. For (unfair) comparison, the Space Telescope Imaging Spectrograph operated in similar manner at Hubble Space Telescope focal plane, has spectral resolution in 500 to 17 000 range [4,5]. The limited resolution of our system is caused by finite distance of LED's sources during observation (by their real macroscopic sizes), i.e. they can't be considered to behave as point light sources.

While LED's wavelengths are known, their luminosity is not and they have been useless for intensity calibration. To perform at least basic intensity calibration of our system (sensor), we measured spectrum of Jupiter and compared it with theoretical blackbody spectrum of Sun, assuming conservation of reflected light spectral characteristics.

3.2 Intensity calibration of spectra

The equipment required for a full spectral sensitivity calibration of our system is not readily available at our faculty. Therefore, we decided to attempt alternative method based on Jupiter spectrum observation. Assuming, that major portion of a detected light is a reflected light of Sun, with little modification due to chemical composition of outer atmospheric layers of giant planet, we compared measured spectrum with theoretical black body spectrum of Sun (see Fig. 4).

Comparing black (theoretical) and read (measured) spectrum of Jupiter in sensitive region between 400 to 700 nm, we calculated sensitivity vs. wavelength transfer function of our system.

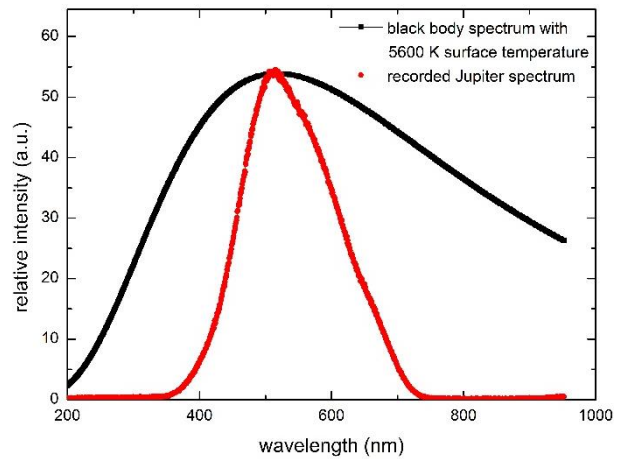


Fig. 4. Jupiter spectrum vs. black body spectrum comparison used for relative intensity calibration.

3.3 Raw spectra of selected stars

From all performed observations, we obtained the whole array, greyscale, raw images, stored in a common astronomical (fits) format. Those files were interpreted, by free ESA's software package "FITS Liberator", converted into lossless TIFF format for further analysis [6]. We used standard software tools like (Photoshop, Mathematica) to calculate numerical spectra arrays, displayed as a raw, non-calibrated spectra of observed stars in Fig. 5.

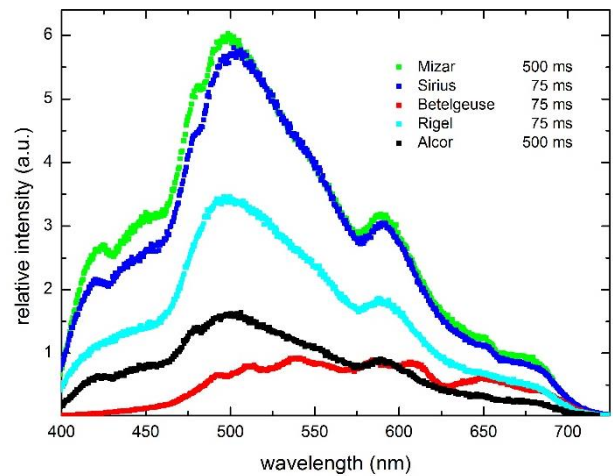


Fig. 5. Raw spectra of observed stars.

Already raw spectra demonstrate evident differences in light emitted by observed stars. From Fig. 5, by a simple glimpse, we can tell that Sirius and Rigel are hottest and Betelgeuse the least warm of them. Due to a different exposure times and variable spectral sensitivity of camera used, no intensity comparison conclusions could be derived from raw spectra, however.

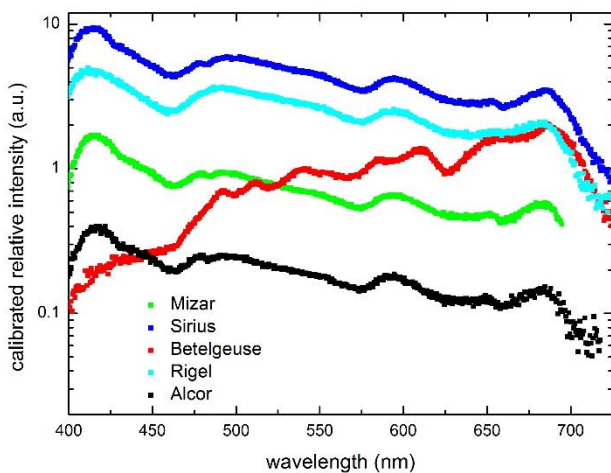


Fig. 6. Intensity calibrated spectra of stars in \log_{10} scale.

Using calculated spectral sensitivity and adjusting spectra intensity to equal exposure time (by simple division), we obtained calibrated spectra in stated wavelength window shown in Fig. 6. From this figure we can conclude that peaks in the stars spectra corresponds to their surface temperature, as listed in Tab. 1. Equally, the relative intensity of hotter (and larger) stars exhibited by vertical position of spectra, qualitatively agree with their surface temperatures. This comprehensibly shows how crucial is a connection between color and temperature of the star.

Fig. 6. clearly demonstrates that calibrated spectra correctly reflect relative relative intensity of observed stars with brightest Sirius and gloomiest Alcor. Comparing areas bellow calibrated spectra we can also compare their experimentally observed luminosities with relative magnitudes, listed in Tab. 1.

Tab. 4. Intensity results comparison

Name of star	Apparent magn.	Spectrum area	Calculated magn.	Delta magn.
Sirius A	-1.13	2306.98	-1.07	-0.06
Betelgeuse	0.64	451.59	0.70	-0.06
Rigel	0.47	1345.69	-0.49	0.96
Mizar	2.4	56.718	2.95	-0.55
Alcor	4.15	14.592	4.43	-0.28

Although detected deviations between expected and calculated magnitudes are obvious, referring to the relatively crude calibration method, we conclude, that we fulfilled the main goal of this project.

4 Conclusions

We verified that amateur class telescope, equipped with standard camera and simplest grating, could be used to perform the basic star spectroscopy. Obviously, the quality and precision of recorded data cannot be paralleled with real scientific class spectrometers. On the other side, our method would be very useful for educational purposes, requiring knowledge of telescope handling, complex data manipulation and interpretation.

Acknowledgments

The authors acknowledge financial support of the Tatra Banka Foundation and of Civic Association "My, sme niekto iní".

We recognize also our supervisor Pavol Valko support with providing all the necessary resources and valuable advice.

References

- [1] <http://www.physicsbootcamp.org/section-diffraction-through-a-double-slit-light.html>
- [2] TOUPSKY camera control software package © ToupTek Company
- [3] CHÉREAU F., STELLARIUM software package (GNU General Public License version 2)
- [4] CHROMEY F. R., To Measure the Sky An Introduction to Observational Astronomy, ISBN-13 978-0-511-72954-6, © F. Chromey 2010
- [5] <https://hst-docs.stsci.edu/stsihb>
- [6] BARRERO J. F. & LIZARAZO D. Z., FITS Liberator software package, BSD-3 license NOIRLab/IPAC/ESA/STScI

Analýza straty napájania vlastnej spotreby jadrového bloku s VVER440 z vonkajšej siete vplyvom extrémneho vetra

Matúš Hupka^{1,2}, Zoltán Kovács², Jana Šimeg Veterníková¹

¹ Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

² RELKO Ltd., Račianska 75, 830 08 Bratislava

matushupka255@gmail.com

Abstrakt – Tento príspevok je zameraný na analýzu straty vonkajšieho napájania vplyvom extrémneho vetra. V jednotlivých častiach je popísaný postup pri hodnotení vplyvu vetra na lokalitu jadrovej elektrárne, výber jednotlivých kritických zariadení ktoré sú citlivé na extrémny vietor a ich zapracovanie do PSA modelu pre stratu vonkajšieho napájania. Samotný model je tvorený stromami porúch a udalostí, ktoré sú analyzované a výsledky výpočtov sú opísané v časti Výsledky. Príspevok k frekvencii tavenia aktívnej zóny je porovnaný s limitmi uvedenými v zákone a následne sú uvedené návrhy na zvýšenie bezpečnosti jadrového bloku.

1. Úvod

Neseizmické prírodné vonkajšie udalosti (extrémne meteorologické podmienky) sú z hľadiska pravdepodobnostnej analýzy bezpečnosti (PSA) jadrových elektrární (JE) definované ako udalosti, ktoré majú potenciálnu možnosť vyvolať iniciačnú udalosť havárie jadrového bloku pri plnom výkone reaktora alebo odstavenom reaktore a bazénu skladovania vyhoreťého paliva. Medzi takéto udalosti sa zaraďuje aj extrémny vietor.

Havária JE Fukushima nás upozornila na to, že bezpečnosť jadrových elektrární je podmienená výskytom určitej, náležite definovanej, katastrofy vo forme extrémnych meteorologických udalostí. Jadrové elektrárne sú projektované na parametre, vyplývajúce z disponibilných meteorologických dát. Je potrebné však poznať aj extrémne meteorologické udalosti, ktoré sa ešte v minulosti nevyskytli a ich vplyv na bezpečnosť prevádzky. To sa odhaduje na základe teórie extrémnych hodnôt, ktorá už dlhé roky patrí ku štandardnej vyšetrovacej metóde finančných a poisťovacích expertov, hydroológov a spoľahlivostných inžinierov [1].

Vďaka teórii extrémnych hodnôt je možné vytvárať krivky ohrozenia. Tie sú základom pre výpočet pravdepodobnosti iniciačných udalostí, ktoré tvoria súčasť modelu PSA. Kombináciou použitia stromov udalostí a stromov porúch dokážeme kvantifikovať frekvenciu tavenia aktívnej zóny spôsobenú extrémnym vetrom. V tejto štúdii sa ako iniciačná udalosť uvažuje strata napájania vlastnej spotreby.

2. Analýza ohrozenia lokality

Samotná analýza ohrozenia lokality je proces skladajúci sa z niekoľkých častí. Táto analýza vyjadruje vplyv vonkajších faktorov na bezpečnosť JE. Vonkajšími faktormi sú hlavne výkyvy počasia. Citlivosť elektrárne na vonkajšie faktory závisí od jej polohy ale aj samotného dizajnu JE. Pri kvantifikácii rizika sa vychádza z historicky nameraných údajov v konkrétnej lokalite JE. Na popísanie frekvencie výskytu udalosti za hranicou nameraných údajov sa využíva teória extrémnych hodnôt. Vďaka tejto teórii je možné určiť návratové periódy extrémneho vetra, pokiaľ je k dispozícii dostatočne veľký súbor nameraných údajov. Vďaka teórii extrémnych hodnôt vieme získať údaje potrebné na určenie frekvencie iniciačnej udalosti spôsobenej extrémnym vetrom a vypočítať tak príspevok k taveniu aktívnej zóny [2].

2.1 Teória extrémnych hodnôt

Teória extrémnych hodnôt sa venuje prognóze výskytu zriedkavých udalostí, ktoré sa nachádzajú za rozsahom historických dát. Pomocou matematických modelov sa extrapoluje do oblastí, ktoré sú nepoznané, t.j. kvantifikujú sa budúce extrémne parametra na základe historických dát.

Teória extrémnych hodnôt poskytuje solidný teoretický základ pre extrapoláciu. Vedie k prirodzeným odhadom pre príslušné veličiny, napr. ako v našom príklade pre extrémne kvantily, a umožňuje nám posúdiť presnosť týchto odhadov. Teória extrémnych hodnôt obmedzuje správanie distribučnej funkcie v koncovej časti v podstate tak, aby sa podobala obmedzenej triede funkcií, ktoré môžu byť prispôbené koncovej distribučnej funkcii. Jej dva parametre - rozsah a tvar, sú založené na deriváciách distribučnej funkcie. V praxi sa teória extrémnych hodnôt využíva na identifikáciu a modelovanie nebezpečných a nezvyčajných situácií, čomu môžeme nájsť využitie v oblasti riadenia rizik, predpovedania extrémnych udalostí a optimalizácie bezpečnostných opatrení [3]. Na výber je možné použiť viacero rozdelení ale pre použitie na modelovanie extrémneho vetra sa ukazuje Gumbelovo rozdelenie ako optimálne (viď vzorec (1)).

$$G(z) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

pre $-\infty < z < \infty$

Parameter μ predstavuje parameter polohy (location) a σ je parameter rozsahu (scale).

2.2 Aplikácia rozdelení s extrémnymi hodnotami

Pre tvorbu modelov pomocou teórie extrémnych hodnôt je dôležité mať dostatočne veľký počet nameraných údajov. Do modelu sa uvažujú ročné maximá sledovaného ukazovateľa (maximálna rýchlosť vetra). Namerané údaje nesmú obsahovať chybné hodnoty, pretože by to malo veľký vplyv na presnosť výsledných údajov. Na tvorbu modelu sa uvažuje s aspoň 30 rokmi nameraných ročných maxim. Ako výsledok sa zobrazuje závislosť rýchlosti vetra od návratovej periódy (počet rokov za ktorý sa vyskytne daná rýchlosť vetra). Nakoľko výsledné údaje majú štatistický charakter, výsledná závislosť nie je presná na 100 %. Na vyjadrenie miery istoty výsledného modelu sa používajú konfidenčné intervaly (vyjadrujú pravdepodobnosť, že sa výsledný údaj nachádza v danom intervale). Väčšinou sa pracuje so strednou hodnotou ale pokiaľ chceme zvýšiť mieru konzervatizmu môžeme použiť až 95 % konfidenčný interval. Analýza ohrozenia lokality bola vytvorená z údajov v Tab. 1. Tieto údaje predstavujú výsledky merania ročného maxima priamo na lokalite JE Mochovce. Merania realizoval Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ).

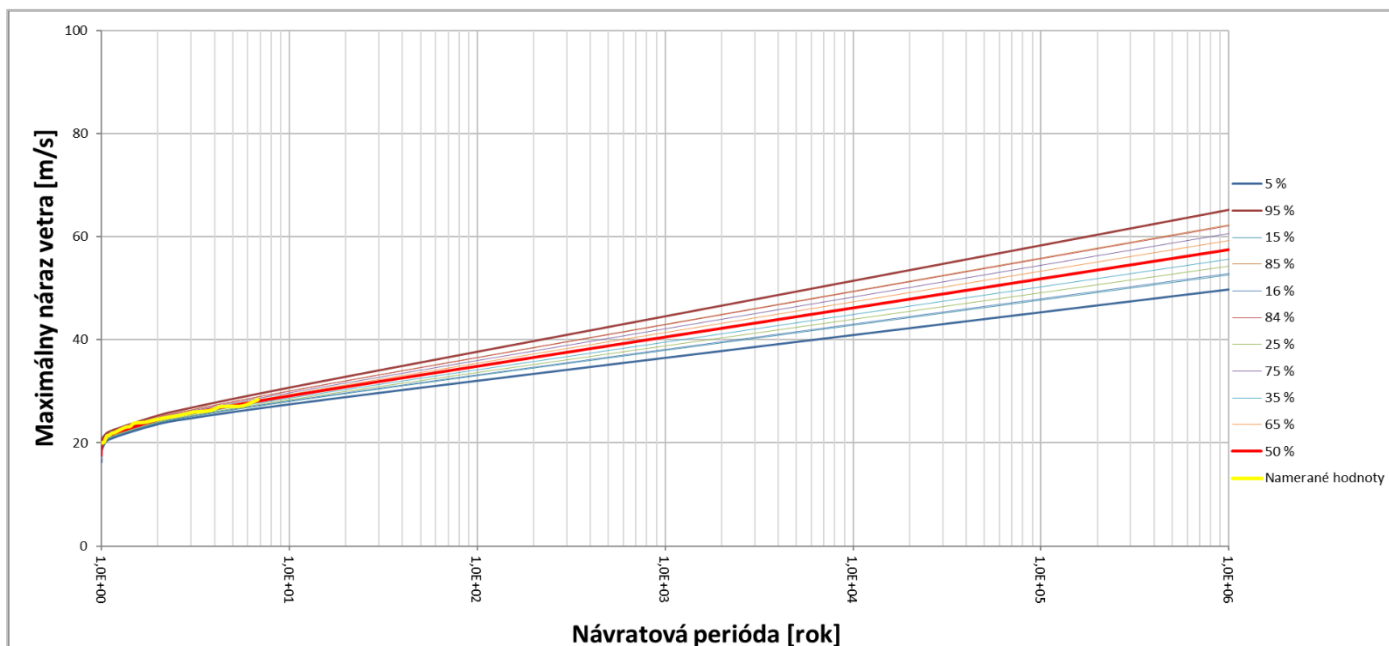
Každá extrémna meteorologická udalosť môže potenciálne vyvolať iniciačnú udalosť havárie zo zoznamu interného PSA modelu jadrového bloku. Krivky ohrozenia lokality teda znázorňujú závislosť rýchlosti vetra, vedúceho k vzniku iniciačnej udalosti havárie, od frekvencie výskytu.

Tab. 1. Tabuľka maximálnej rýchlosti vetra v lokalite JE Mochovce za posledných pozorovaných 10 rokov a maximálna hodnota za 33 rokov.

Rok	Náraz vetra [m/s]
2011	24,8
2012	23,8
2013	24,6
2014	27,0
2015	23,9
2016	21,5
2017	26,0
2018	21,3
2019	23,1
2020	25,4
Maximum (1990)	33,0

Výpočet frekvencie výskytu sa zakladá na špecifickej pravdepodobnostnej analýze ohrozenia v lokalite, ktorá reflektuje súčasne dostupné regionálne a miestne špecifické informácie. Z údajov maximálnej ročnej rýchlosti vetra pre lokalitu Mochovce v Tab. 1. s pomocou Gumbelovho rozloženia boli generované parametre tvaru a polohy z programu R (R Development Core Team). Tento program je navrhnutý s použitím špeciálneho programovacieho jazyka určeného na štatistickú analýzu. Keď už poznáme hodnoty jednotlivých parametrov funkcie dosadíme ich do Gumbelovho rozdelenia a sme schopní zostrojiť závislosť rýchlosti vetra od návratovej periódy. Namerané údaje ako aj namodelované funkcie pre jednotlivé konfidenčné intervaly sú zobrazené na Obr. 1.

Obr. 1. Graf s krivkami ohrozenia pre extrémny vietor v lokalite JE Mochovce.



3. Analýza zraniteľnosti

Analýza zraniteľnosti JE sa vykonáva zvlášť pre každý externý vplyv a ako výsledok tejto analýzy sú krivky zraniteľnosti vybraných zariadení. Na vytvorenie týchto kriviek bola použitá metóda bezpečného faktora, ktorá sa používa už od 70. rokov 20. storočia. Vychádza z deterministického návrhu, na základe ktorého sa vyhodnocujú veterné rezervy, aby bolo možné odhadnúť strednú kapacitu konštrukcie. Predpokladá sa lognormálne rozdelenie u všetkých bezpečnostných faktorov a potom aj výsledná veterná kapacita vybraného zariadenia sleduje lognormálne rozdelenie (θ). Okrem toho sa pri tvorbe rozdelenia uvažujú aj neistoty – modelová (β_u) a náhodná (β_r) neistota. Tie sú charakterizované dvoma rôznymi štandardnými odchýlkami. Výslednú odchýlku získame ako odmocninu súčtu druhých mocnín oboch neistôt. Krivka krehkosti sa potom vyjadruje ako funkcia úrovne spoľahlivosti Q podľa vzorca (2) [4]:

$$P_f(\alpha) = \theta \left(\frac{\ln\left(\frac{\alpha}{A_m}\right) + \beta_u \theta^{-1}(Q)}{\beta_r} \right) \quad (2)$$

Nakoniec vieme zapísať kapacitu HCLPF (High Confidence Low Probability of Failure) pomocou vzorca (3), definovanú ako kapacitu, pre ktorú je pravdepodobnosť zlyhania 5 % so spoľahlivosťou 95 %.

$$A_{HCLP} = A_m e^{-1,645(\beta_r + \beta_u)} \quad (3)$$

3.1. Krivky zraniteľnosti

Pre potreby tejto analýzy bola vykonaná prehliadka elektrárne a komponenty s vplyvom na bezpečnosť pri výskyte extrémneho vetra boli zahrnuté do analýzy. Z analýzy sa ukázalo, že kritické komponenty sú 110 a 400 kV vedenia a vybrané transformátory. Vstupné údaje pre tieto zariadenia boli poskytnuté spoločnosťou Slovenské elektrárne a.s. a sú zobrazené v Tab. 2.

Tab. 2. Parametre krehkosti pre sledované zariadenia

Zariadenie	v_{HCLPF} [m/s]	β_r	β_u	v_m [m/s]
Transformátory a 400 kV vedenie	30,55	0,30	0,35	89,29
110 kV vedenie	43,89	0,30	0,35	128,28

3.2. Konvolúcia kriviek

Zpracovanie výsledkov jednotlivých kriviek do modelu stromu porúch prebieha pomocou konvolúcie kriviek ohrozenia a zraniteľnosti. Táto konvolúcia je vykonaná programom RiskLite (Relcon Scandpower AB) a ako výstup sú hodnoty stredných frekvencií výskytu pre jednotlivé intervaly rýchlosti extrémneho vetra, ktoré sú zaradené do stromov porúch. Tieto primárne udalosti sú potom zaradené v každom strome udalostí ako primárna udalosť, ktorá môže vyvolať tavenie AZ.

Výsledky konvolúcie pre model straty vonkajšieho napájania vykonané pre vypočítané krivky ohrozenia lokality a krivky zraniteľnosti sú uvedené v Tab. 3. Výsledky boli stanovené pre 3 intervaly extrémneho nárazového vetra.

Tab. 3. Rozsahy a stredné frekvencie pre iniciačnú udalosť – extrémny nárazový vietor

Iniciačná udalosť	Rozsah [m/s]	Stredná frekvencia [1/rok]
EXWIND-01	20 - 50	9,82E-01
EXWIND-02	50 - 100	3,65E-05
EXWIND-03	100 - 150	9,95E-13

4. PSA model

Pravdepodobnostné hodnotenie bezpečnosti (PSA) je systematická metodika používaná v jadrovej energetike na hodnotenie rizík a ponúka pohľad na bezpečnosť projektu a prevádzky jadrovej elektrárne. PSA pomáha odhadnúť riziko závodu a identifikovať prispievateľov k riziku tým, že riešia tri otázky: čo sa môže pokaziť, aká je pravdepodobnosť zlyhania systému a aké sú jeho dôsledky. Riziko je číselne vyjadrené súčtom súčinov následkov havarijného scenára a ich frekvencií. Boli stanovené tri úrovne PSA, konkrétne PSA úrovne 1, PSA úrovne 2 a PSA úrovne 3, aby sa určili pravdepodobnosti spojené s poškodením aktívnej zóny reaktora, uvoľnením rádioaktivity z lokality jadrovej elektrárne a z toho vyplývajúce škody na ľudskom zdraví a na životnom prostredí [5].

Scenár začína iniciačnou udalosťou (napr. strata vonkajšieho napájania). V závislosti od úspechu alebo zlyhania bezpečnostných systémov sa táto iniciačná udalosť vyrovná bez významných následkov, alebo povedie k rôznym úrovniam následkov v závislosti od toho, ktoré systémy uspejú alebo zlyhajú. Kvôli redundancii a rôznorodosti bezpečnostných systémov v JE, aby udalosť mala významné následky, musí dôjsť k viacerým poruchám. Celková frekvencia spojená s kombináciou výskytu iniciačnej udalosti s pravdepodobnosťou viacnásobných porúch systémov je malá a nedá sa priamo kvantifikovať na základe skúseností. Z tohto dôvodu sa zaviedla metóda stromov porúch (FT) a metóda stromov udalostí (ET) [6]. Na tvorbu a výpočty pomocou metódy PSA bol využívaný program RiskSpectrum PSA, ktorý je vo svete široko využívaný v jadrovom inžinierstve.

4.1. Stromy porúch a udalostí

Strom porúch je logický diagram, ktorý metódou Booleovej algebry odvádza poruchu systému od porúch jeho prvkov. Slúži na kvalitatívnu a kvantitatívnu analýzu spoľahlivosti systémov. Keďže pri konštrukcii stromu porúch sa využíva Booleova algebra, prvky a systémy sú charakterizované binárnymi stavmi: porucha a prevádzka. Preto sa ťažko modelujú situácie, keď je potrebné zohľadniť viac ako dva stavy, napr. vysoké, nízke alebo normálne výstupné napätie transformátora. Okrem toho sa požaduje, aby bol systém koherentný: spoľahlivosť systému sa nezvyšuje poruchou jedného alebo viacerých jeho prvkov. Spoľahlivosť prvok sa mení počas prevádzky, preto treba pri budovaní modelu zahrnúť

viaceré stavy konkrétneho prvku (prevádzka, vyčkávací režim). Na vytváranie samotných stromov porúch sa využívajú logické hradlá A, ALEBO, vylučné ALEBO a ich vzájomné kombinácie [7].

Strom udalostí znázorňuje reakciu technológie na výskyt iniciačnej udalosti havárie. Iniciačná udalosť je udalosť, ktorá spôsobí odstavenie bloku alebo vyžaduje reakciu elektrárne. Umožňuje systematicky identifikovať havarijné reťazce v závislosti od toho, či zapracujú alebo nezpracujú bezpečnostné systémy vyzvané k činnosti na potlačenie havárie. Na kvantifikáciu frekvencie výskytu každého reťazca je potrebné poznať frekvenciu výskytu iniciačnej udalosti a pravdepodobnosti porúch systémov vyzvaných k činnosti. Na výpočet spoľahlivosti systémov sa využíva metóda stromu porúch. Keď sú známe všetky pravdepodobnosti v havarijnom reťazci, ich súčin spolu s frekvenciou výskytu iniciačnej udalosti dáva frekvenciu výskytu havarijného reťazca [8].

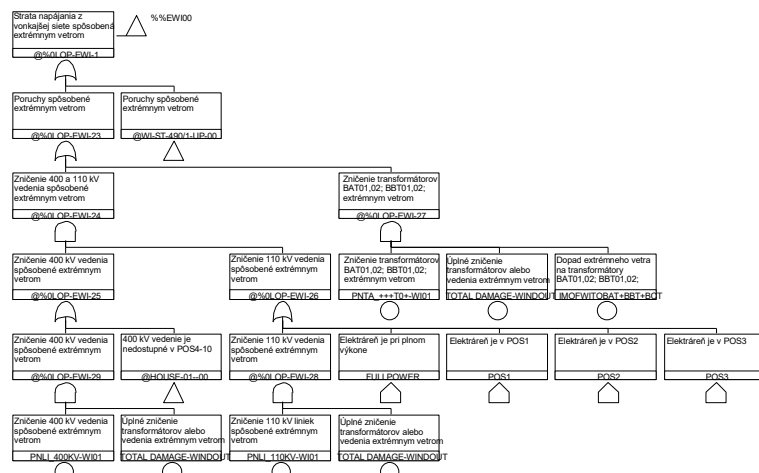
4.2. Tvorba modelu pre stratu napájania vlastnej spotreby jadrového bloku

Analýza straty vonkajšieho napájania bola realizovaná pre 1. bok JE Mochovce. Po analýze jadrového bloku expertmi boli identifikované jednotlivé udalosti, ktoré môžu spôsobiť stratu napájania spôsobenú extrémnym nárazovým vetrom. Vybrané udalosti boli zapracované do stromu porúch, v ktorom je vrcholná udalosť strata napájania. Výsledný strom porúch je zobrazený na Obr. 2

V strome porúch sú zapracované udalosti vybrané pri analýze lokality ako zničenie 400 kV, 110 kV a zničenie transformátorov. Pomocou nastavenia okrajových podmienok modelu môžeme vybrať interval extrémneho vetra s vypočítanou frekvenciou iniciačnej udalosti. Pomocou podmienok je taktiež vybraná aktuálna pozícia elektrárne. Pre

túto analýzu je elektráreň v stave pri plnom výkone. Pripojený strom porúch označený ako „Poruchy spôsobené vetrom“ obsahuje pády budov strojovne, pád komína pre vypúšťanie plyných výpustí, ktoré môžu spôsobiť stratu napájania. Vrcholná udalosť stromu porúch predstavuje primárnu udalosť, ktorá je ďalej analyzovaná v strome udalostí.

Obr. 2 Naznačenie schémy Stromu porúch pre analýzu straty napájania.



Strom udalostí bol tvorený ako reťazec udalostí, ktoré nastanú po výskyte primárnej udalosti, ktorá je uvedená ako prvá na ľavej strane. Ostatné udalosti sú uvedené v poradí v akom reagujú bezpečnostné systémy bloku a reakcie operátorov pomocou stanovených predpisov na základe symptomatického postupu. Pri tvorbe stromu udalostí je uvedená ako primárna udalosť strata vonkajšieho napájania. Ostatné udalosti zaradené do stromu udalostí sú zobrazené na Obr. 3 spolu s vybranými významnými vetvami.

Obr. 3 Strom udalostí pre stratu vonkajšieho napájania.

Strata napájania z vonkajšej siete spôsobené extrémnym vetrom pri plnom výkone	AO1 po strate vonkajšieho napájania a núdzové zabránenie	Odvod tepla z primárnej na sekundárnu stranu (HNČ)	Odvod tepla z primárnej na sekundárnu stranu (SHNČ, mobilný zdroj)	Odpúšťanie a doplňovanie - strata vonkajšieho napájania	Číslo	Dôsledok	Kód
LOP-EWI00	@RP-LOP00	@AF(LOP)00	@EF(LOP)00	@B&F(LOP)00	1	OK	
					2	OK	@AF(LOP)00
					3	OK	@AF(LOP)00-@EF(LOP)00
					4	CD	@AF(LOP)00-@EF(LOP)00-@B&F(LOP)00
					5	ATWS, CD	@RP-LOP00

Na Obr. 3 môžeme vidieť primárnu udalosť a 4 sekundárne udalosti zobrazujúce reakcie bloku na primárnu udalosť. Každá sekundárna udalosť má osobitne stanovenú frekvenciu výskytu, ktorá potom vystupuje do výpočtu frekvencie každej vybranej vetvy. Prvé tri udalosti predstavujú automatickú ochranu bloku. Sú to zapracovanie ochrany reaktora AO1, zabezpečenie odvodu tepla zabezpečeným napájaním zo záložných zdrojov, odvodu tepla zabezpečeným napájaním z mobilného zdroja. Poslednou udalosťou je reakcia operátora, pri ktorej vykoná postup odpúšťania a doplňovania do aktívnej zóny. Analyzovaných bolo päť vetiev pričom pri každej je určený dôsledok. Pre bezpečné odstavenie reaktora je značka OK

a pred tavenie aktívnej zóny značka CD. Pre výpočet frekvencie tavenia AZ boli vybrané vetvy 4 a 5. Pre tieto vetvy bola vykonaná analýza pomocou metódy minimálnych kritických rezov (MKR) a taktiež výpočet frekvencie daných reťazcov.

5. Výsledky

Vytvorený model popísaný v časti 4.2 bol podrobený analýze pomocou výpočtového programu RiskSpectrum PSA. Ako výstup z tohto programu boli vybrané frekvencie tavenia AZ pre analyzované vetvy stromu udalostí. Výpočty boli

vykonané separátne pre každý interval extrémneho vetra. Z týchto výsledkov bolo taktiež možné stanoviť celkovú frekvenciu tavenia AZ spôsobenú stratou vonkajšieho napájania vplyvom extrémneho vetra. Výsledky sú zobrazené v Tab. 4.

S výsledkov môžeme vidieť, že najväčší príspevok k taveniu AZ má vietor v intervale 50-100 m/s. Príspevok od intervalu vetra 100-150 m/s je skoro zanedbateľný. To je očakávaný výsledok, nakoľko vietor s takouto rýchlosťou má veľmi nízku pravdepodobnosť výskytu. Celková frekvencia pri zahrnutí všetkých intervalov bola stanovená výpočtom na hodnotu 2,2E-8 1/rok. Slovenská legislatíva udáva, že celková frekvencia tavenia AZ od všetkých iniciačných udalostí nesmie byť väčšia ako 1E-5 1/rok. Z týchto údajov vyplýva, že príspevok od vplyvu extrémneho vetra predstavuje 0,22 % z požiadaviek pre bezpečnú prevádzku jadrového bloku.

Tab. 4 Výsledky výpočtu frekvencie tavenia AZ pre extrémny vietor

Názov	Rozsahy rýchlostí vetra		Frekvencia poškodenia AZ pri plnom výkone, [1/rok]	Príspevok [%]
	od [m/s]	do [m/s]		
EXWIND-01	20	50	1,06E-08	48,18
EXWIND-02	50	100	1,14E-08	51,82
EXWIND-03	100	150	8,47E-14	0,000385
Celková frekvencia poškodenia AZ pre všetky rozsahy:			2,2E-08	100,00

Taktiež bola vykonaná analýza MKR a MKR s najväčšou frekvenciou sú uvedené v Tab. 5.

Tab. 5 Minimálne kritické rezy pre stratu vonkajšieho napájania vplyvom extrémneho vetra

č.	Frekvencia	%	Minimálny kritický rez			
1.	7,08E-09	32,45	EXWIND-FP-01	P-DAMAGE 8051 BY 803	ST_803/1-01-WI01	TOTAL DAMAGE-WIND
Po poškodení komína (objekt 803/1-01) vyvolanom extrémnym nárazovým vetrom v rozsahu 01 dôjde k úplnému poškodeniu objektu v dôsledku extrémneho nárazového vetra a páde komína (objekt 803/1-01) na pozdĺžnu etažerku 1. bloku.						
2.	4,12E-09	18,89	EXWIND-FP-02 PNLI_400KV-WI02	OA-G-B&F-OP-D-EE02 TOTAL DAMAGE-WINDOUT	OA-G-RESSGFWS-EE02	OM-G-RESSGFWS-EE02
Vplyvom extrémneho vetra úrovne 02 dôjde k úplnému poškodeniu 400 kV linky, operátor neobnoví napájanie PG ani nevykoná primárne doplňovanie a odpúšťanie a personál neobnoví napájanie PG.						
3.	3,11E-09	14,27	EXWIND-FP-02 PNLI_400KV-WI02	EFPM_MOBILE1-WI02 TOTAL DAMAGE-WINDOUT	OA-G-B&F-OP-D-EE02	OA-G-RESSGFWS-EE02
Vplyvom extrémneho vetra úrovne 02 dôjde k úplnému poškodeniu 400 kV linky, poruche mobilného zdroja v dôsledku extrémneho nárazového vetra a operátor neobnoví napájanie PG ani nevykoná primárne doplňovanie a odpúšťanie.						
4.	2,06E-09	9,45	EXWIND-FP-02 OM-G-RESSGFWS-EE02	IMOFWITOBAT+BBT+BCT PNTA_+++T0+-WI02	OA-G-B&F-OP-D-EE02 TOTAL DAMAGE-WINDOUT	OA-G-RESSGFWS-EE02
Po poškodení blokových transformátorov, transformátorov vlastnej spotreby a rezervných transformátorov vyvolanom extrémnym nárazovým vetrom v rozsahu 02 dôjde k úplnému poškodeniu blokových transformátorov, transformátorov vlastnej spotreby a rezervných transformátorov v dôsledku extrémneho nárazového vetra a v smere možného zasiahnutia nárazovým vetrom, operátor neobnoví napájanie PG ani nevykoná primárne doplňovanie a odpúšťanie a personál neobnoví napájanie PG.						
5.	1,56E-09	7,14	EXWIND-FP-02 OA-G-RESSGFWS-EE02	EFPM_MOBILE1-WI02 PNTA_+++T0+-WI02	IMOFWITOBAT+BBT+BCT TOTAL DAMAGE-WINDOUT	OA-G-B&F-OP-D-EE02
Po poškodení blokových transformátorov, transformátorov vlastnej spotreby a rezervných transformátorov vyvolanom extrémnym nárazovým vetrom v rozsahu 02 dôjde k úplnému poškodeniu blokových transformátorov, transformátorov vlastnej spotreby a rezervných transformátorov v dôsledku extrémneho nárazového vetra a v smere možného zasiahnutia nárazovým vetrom, poruche mobilného zdroja v dôsledku extrémneho nárazového vetra a operátor neobnoví napájanie PG ani nevykoná primárne doplňovanie a odpúšťanie.						

Z Tab. 5 môžeme vidieť, že v každom MKR vystupuje výskyt extrémneho vetra prvého alebo druhého rozsahu. V prvom MKR vidíme, že strata vonkajšieho napájania je spôsobená pádom komína na budovu strojovne (805). V druhom a treťom MKR je strata napájania spôsobená zničením 400 kV liniek a v štvrtom a piatom prípade sú zničené blokové

transformátory a transformátory vlastnej spotreby. Ostatné časti MKR predstavujú reakciu personálu na výskyt primárnej udalosti. Presný popis každého MKR je zobrazený v Tab. 5.

Analýzou MKR sme schopný nájsť kritické miesta systému a určiť aj váhu jednotlivých prvkov na bezpečnosť JE. Úpravou parametrov jednotlivých prvkov potom vieme znížiť

frekvenciu výskytu daných udalostí, čo má pozitívny vplyv na frekvenciu tavenia AZ.

6. Záver

V tomto príspevku je ukázaný prístup používaný pri analýze vplyvu extrémneho vetra na bezpečnosť JE. Na demonštráciu bola vybraná strata vonkajšieho napájania pomocou metódy stromov porúch a stromov udalostí. Na kvantifikáciu výskytu extrémneho vetra pri danej rýchlosti sa využila teória extrémnych hodnôt (Gumbelovo rozdelenie). Na vybrané prvky JE bola použitá metóda bezpečného faktora, pomocou ktorej sme boli schopný vytvoriť krivky zraniteľnosti zariadení. Pomocou konvulúcie kriviek sme stanovili strednú frekvenciu rozsahov extrémneho vetra. Tento postup je využívaný pri tvorbe modelov PSA pre externé udalosti na Slovensku ale aj vo svete. Po zahrnutí vplyvu extrémneho vetra do modelu pre stratu vonkajšieho napájania boli vykonané výpočty na stanovenie príspevku k frekvencii tavenia AZ. Stromy porúch aj stromy udalostí boli vytvorené vďaka analýze kritických prvkov na lokalite JE Mochovce a prevádzkovým protokolom pre reakciu na iniciačné udalosti.

Výsledky z výpočtov programu RiskSpectrum PSA ukázali, že príspevok k taveniu AZ od straty napájania spôsobenej extrémnym vetrom predstavuje hodnotu $2,2E-8$ 1/rok. Táto frekvencia predstavuje malý príspevok oproti hodnotám stanovených zákonom. Model straty vonkajšieho napájania nám ukázal aký veľký vplyv môže mať extrémny vietor na bezpečnosť JE. Taktiež vďaka analýze MKR vieme vytvoriť návrh na bezpečnostné vylepšenia. Jedným z možných vylepšení je zvýšiť odolnosť komína proti vplyvu extrémneho vetra. Ďalší možný návrh predstavuje vylepšenia na 400 kV linkách a sústavným preškoloňovaním personálu pri reakcii na výskyt iniciačnej udalosti bloku. Po zapracovaní týchto zmien je možné vykonať opakované výpočty a určiť ich vplyv na bezpečnosť JE.

7. Literatúra

- [1] IAEA, *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants Specific Safety Guide*. International Atomic Energy Agency, 2010.
- [2] IAEA *Meteorological and hydrological hazards in site evaluation for nuclear installations*. International Atomic Energy Agency, 2011.
- [3] Haan, Laurens, and Ana Ferreira. *Extreme value theory: an introduction*. Vol. 3. New York: Springer, 2006.
- [4] ZENTNER, Irmela; GÜNDEL, Max; BONFILS, Nicolas. *Fragility analysis methods: Review of existing approaches and application*. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 323: 245-258.
- [5] ZHOU, Taotao; MODARRES, Mohammad; DROGUETT, Enrique López. *Multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment: A comprehensive survey*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 213: 107782.
- [6] DENNING, R. S.; BUDNITZ, R. J. *Impact of probabilistic risk assessment and severe accident research in reducing*

reactor risk. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 102: 90-102.

- [7] JANÍČEK, F., KOVÁCS, Z.: *Spoľahlivosť JE*. Bratislava: FEI STU, 2024. *Učebný text pre postgraduálne rekvalifikačné štúdium*.
- [8] JANÍČEK, F., KOVÁCS, Z.: *Spoľahlivosť v elektroenergetike*. 1. vyd. Pezinok: Renesans, 2009. ISBN 978-80-89402-12-0.

Optimalizácia snímkovania s Timepix3 detektorom pre analýzu zmiešaných radiačných polí

Matej Balušík, doc. Ing. Andrea Šagátová, PhD.

Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 841 04, Bratislava, Slovensko

xbalusikm@stuba.sk

Abstrakt – Optimalizácia snímkovania s detektorom Timepix3 pre analýzu zmiešaných radiačných polí je kľúčová pre získanie spoľahlivých nameraných dát a ich presnú interpretáciu. V tomto experimente sme skúmali vplyv rôznych časov expozície na kvalitu údajov nameraných detektorom Timepix3. Na základe získaných údajov sme identifikovali najspoľahlivejšie expozičné časy 0.1 s a 0.01 s, ktoré minimalizovali vplyv pozadia, elektronického šumu a poskytli najpresnejšie výsledky. Naša štúdia tiež zdôraznila dôležitosť výberu optimálnej hrúbky senzora a integrácie Timepix3 do existujúcich monitorov radiačnej situácie pre komplexnejší pohľad na radiačné prostredie. Budúce experimenty by mohli ďalej preskúmať možnosti využitia umelej inteligencie a strojového učenia na analýzu veľkých objemov dát získaných pomocou Timepix3 detektora, čo by mohlo viesť k objaveniu nových vzorov a súvislostí v radiačných dátach. Naše zistenia naznačujú potenciál detektora Timepix3 pre rôzne aplikácie v oblasti experimentálnej fyziky, medicínskeho zobrazovania a priemyselnej rádiografie.

1 Úvod

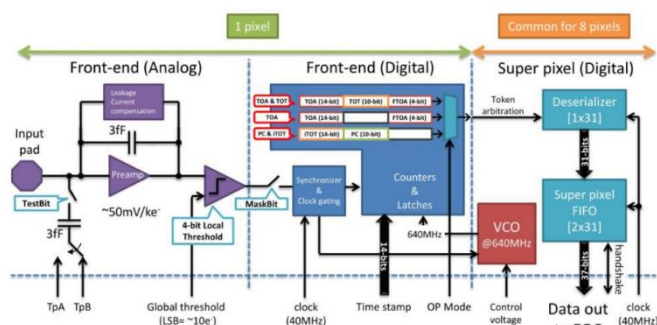
Monitorovanie ionizujúceho žiarenia zohráva kľúčovú úlohu pri zaistovaní radiačnej bezpečnosti, rozvoji zdravotníctva a napredovaní vedeckého výskumu. V tomto kontexte sa detektor Timepix3 ukazuje ako špičkový nástroj na detekciu častíc, ktorý ponúka jedinečné možnosti v oblasti radiačnej analýzy. Cieľ optimalizovať snímkovanie pre analýzu zmiešaných radiačných polí je dôležitý, pretože výrazne zvyšuje presnosť a spoľahlivosť interpretácie údajov.

Hybridné pixelové detektory sú multi-pixelové polovodičové detektory, ktoré predstavujú technologický pokrok v detekcii a kvantifikácii ionizujúceho žiarenia. Ich unikátnosť spočíva v integrácii vyhodnocovacej elektroniky priamo do pixelov detektora pomocou CMOS technológie. V porovnaní s inými typmi detektorov, ako sú scintilačné detektory alebo plynové detektory, polovodičové detektory typu Timepix vynikajú vďaka vyššej citlivosti, vysokému priestorovému rozlíšeniu a rýchlemu získavaniu údajov. Nachádzajú uplatnenie v rôznych oblastiach vrátane experimentálnej časticovej fyziky, lekárskeho zobrazovania a priemyselnej rádiografie. [1]

2 Motivácia a teória:

Na rozdiel od svojich predchodcov Timepix3 detektor využíva prístup čítania riadeného údajmi, pri ktorom sa údaje z jednotlivých zásahov častice okamžite prenášajú z čipu po spracovaní pixelov, ako je znázornené na Obr. 1. Tento transformačný posun minimalizuje mŕtvu dobu vyčítania pri nízkych až stredných počtoch zásahov, pričom na prenos dátového balíku je potrebný len čas spracovania impulzu Time-over-Threshold (ToT) plus 475 ns. Toto vylepšenie predovšetkým umožňuje čipu udržiavať nepretržitú citlivosť počas dlhších meraní, čím sa zmiernujú problémy s digitálnym hromadením [1].

Timepix3 detektor je štruktúrovaný do blokov super-pixelov, z ktorých každý obsahuje 2×4 bežné pixely, čím sa optimalizuje využitie zdrojov a priestorová účinnosť. V každom super-pixeli je integrovaná základná logika na prenos balíkov dát na koniec stĺpca spolu s oscilátorom 640 MHz na presné meranie času. Na rozdiel od svojho predchodcu Timepix3 detektor nemeria čas príchodu (ToA) vzhľadom na uzavretie uzávierky; namiesto toho zachytáva hodnotu z globálneho počítadla ToA [2].



Obr. 1 – Schéma spracovanie signálu z jedného pixelu Timepix3 detektora.

2.1 Režimy merania

Timepix3 čip podporuje štyri základné režimy merania, každý určený na iný druh merania.

Počet udalostí: Tento režim kvantifikuje počet udalostí (zásahov) v pixeli počas expozičnej doby a je vhodný

predovšetkým pre snímanie objektov zobrazovaných pomocou rtg. žiarenia.

Time over threshold (ToT): ToT sa meria ako počet periód 40 MHz hodinového signálu (v krokoch po 25 ns), počas ktorých výstupný signál zosilňovača prekročí stanovený prah energie. Prepočet ToT na energiu v keV umožňujú kalibračné koeficienty pre každý jeden pixel uvedené v konfiguračnom súbore zariadenia vo forme matíc, platné pre špecifikované parametre detektora, najmä prahovú úroveň.

Čas príchodu (Time of Arrival): ToA označuje počet periód 40 MHz hodinového signálu (v krokoch po 25 ns) od začiatku expozície do registrácie udalosti pixelom, ktorá zodpovedá impulzu prekračujúcemu prah. Zatiaľ čo rozsah je 409,6 μ s, ďalších 16 bitov v FPGA rozširuje celkový rozsah na 26,8 sekundy, použiteľný za špecifických podmienok rýchlosti zásahu podľa výkonnostných charakteristík. Hodiny sa resetujú po 26,8 sekundách bez obmedzenia trvania skenovania.

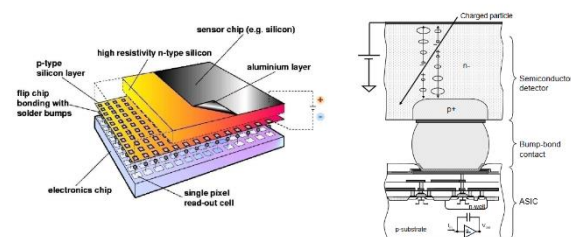
Rýchly čas príchodu (Fast Time of Arrival): FTToA označuje časový rozdiel medzi detekciou udalosti a následným hodinovým signálom, meraný s presnosťou 1,5625 ns v 4-bitovom rozsahu. [3]

2.2 Detekcia signálu

Keď vysokoenergetická častica alebo fotón interaguje so senzovou vrstvou detektora Timepix, odovzdá energiu vo forme vytvorenia párov elektrón-diera v polovodičovom materiáli senzora. Množstvo deponovanej energie závisí od typu častice a jej kinetickej energie.

Páry elektrón-diera vytvorené interakciou sa zhromažďujú v pixeloch detektora Timepix. Každý pixel má citlivý objem, v ktorom sa tieto nosiče náboja zbierajú. Skupinu pixelov zaznamenávajúcich nosiče náboja od jednej častice nazývame klastery a tvorí stopu častice.

Zozbieraný náboj v každom pixeli sa premieňa na napäťový signál pomocou nábojovo-citlivých predzosilňovačov (CSA) integrovaných do vyčítavacej elektroniky každého pixelu. CSA sú navrhnuté tak, aby konvertovali náboj na napätie, ktoré úmerné odovzdanej energii (Obr. 2).



Obr. 2 – Schéma čipu Timepix3.

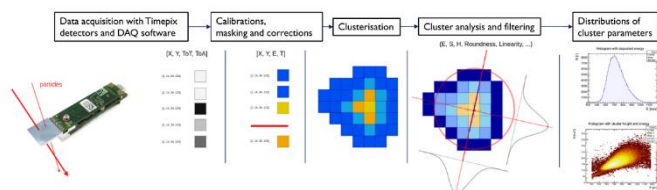
Napäťový signál z CSA sa potom digitalizuje pomocou analógovo-digitálneho prevodníka (ADC) v každom pixeli. ADC prevádza amplitúdu napäťového signálu na digitálnu hodnotu. Táto digitálna hodnota predstavuje energiu dopadajúcej častice alebo fotónu. Aby sa digitálna hodnota mohla porovnať so skutočnou energiou, detektor Timepix musí prejsť procesom energetickej kalibrácie.

Digitalizované hodnoty energie a priestorové polohy dopadajúcich častíc sa zhromažďujú a analyzujú pomocou softvéru na spracovanie a analýzu údajov. Tieto údaje sa môžu

použiť na štúdium rozloženia energie, energetických spektier a ďalších charakteristík registrovaných častíc alebo žiarenia. [4]

2.3 Spracovanie dát

Data Processing Engine (DPE) je softvér vyvinutý pre spracovanie a analýzu údajov z detektorov Timepix niekoľkými spôsobmi. DPE vykonáva kalibráciu údajov a korekcie na transformáciu údajov z pixelov do súborov korelovaných pixelov (klastrov) (Obr. 3). Táto fáza zahŕňa aplikáciu potrebných kalibrácií a korekcií, klastrovú analýzu a vytvorenie distribúcií parametrov klastrov. DPE tiež môže vykonať klasifikáciu častíc, identifikovať typy častíc a ich energiu, ako aj rozpoznať zmiešané radiačné polia.



Obr. 3 – Diagram zobrazujúci jednotlivé stupne spracovania dát pomocou DPE.

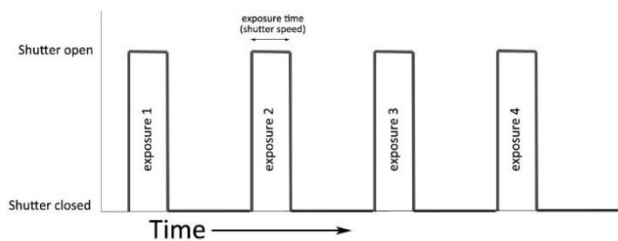
Používa algoritmy strojového učenia na klasifikáciu častíc a poskytujú cenné informácie pre rôzne aplikácie, ako sú toky vysokej intenzity vo vesmíre alebo v časticovej terapii. DPE štatisticky vyhodnocuje spracované údaje z pohľadu počtu častíc, dávkového príkonu a toku častíc. DPE obsahuje rozsiahlu experimentálnu databázu obsahujúcu kalibrácie a referenčné radiačné polia typických prostredí, vrátane protónov, iónov, elektrónov, gama lúčov, röntgenových lúčov, ako aj tepelných a rýchlych neutrónov. [5]

2.4 Expozičný čas

Vo fotografii rýchlosť uzávierky, známa aj ako expozičný čas, označuje dobu, počas ktorej zostáva uzávierka fotoaparátu otvorená pre expozíciu. Určuje, ako dlho je snímač fotoaparátu alebo film vystavený svetlu.

Rýchlosť uzávierky určuje mieru rozmazania pohybu a svetla zachyteného na fotografii. Rýchlejšia uzávierka (napr. 1/1000 sekundy) zaznamená rýchlo sa pohybujúce objekty, zatiaľ čo pomalšia uzávierka (napr. 1/30 sekundy) umožňuje tvorivé efekty, ako je rozmazanie pohybu. Rýchlosť uzávierky sa zvyčajne meria (napr.) v zlomkoch sekundy (napr. 1/30, 1/60, 1/500, 1/1000).

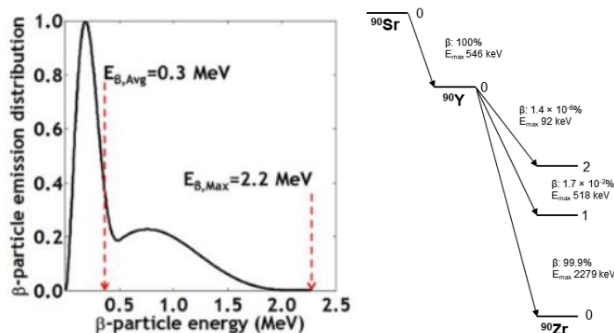
V kontexte detektora Timepix3 je pojem "expozičný čas" analogický časovému rozlíšeniu detektora. Podobne ako v prípade fotografií senzor počas tejto doby aktívne získava dáta a zaznamenáva ich do jednej snímky. Dĺžka expozície je určená v sekundách (napr. 1s) zaznamená všetky udalosti v tomto časovom intervale. Na správnu voľbu expozičného času vplyva hlavne fluencia častíc, pre ktorú musí byť expozičný čas správne zvolený (Obr. 4).



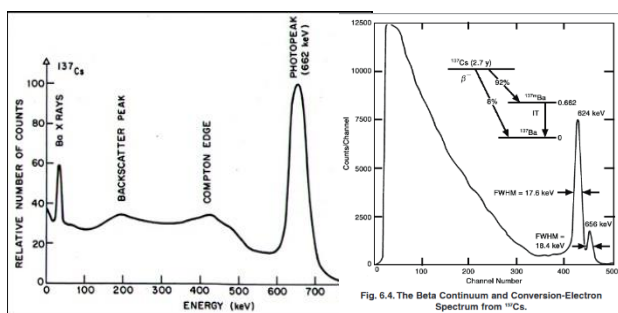
Obr. 4 – Diagram zobrazujúci vplyv expozičného času na zber dát.

2.5 Žiariče

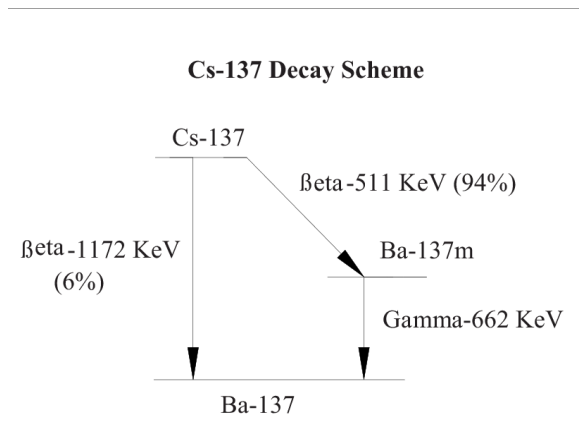
Žiariče Sr-90 a Cs-137 sú rádioaktívne izotopy, ktoré sa využívajú v medicíne a priemysle. Stroncium-90, vytvorený pri jadrových reakciách, je beta emitom (Obr. 5) používaným na liečbu rakoviny a ako zdroj energie v termoelektrických generátoroch. Céziu-137, tiež umelý izotop, je beta a gama emitom (Obr. 6, 7), využívaným na ožarovanie nádorov a v priemyselnom meraní úrovne tekutín. Aj keď majú tieto látky užitočné aplikácie, ich manipulácia vyžaduje špeciálne bezpečnostné opatrenia kvôli ich vysokému stupňu rádioaktivity a možnosti nebezpečia pre životné prostredie.



Obr. 5 – Beta spektrum a rozpadová schéma Sr-90[9].



Obr. 6 – Beta a gama spektrum Cs-137.



Obr. 7 – Rozpadová schéma Cs-137.

3 Metodika:

Proces sa začína získavaním údajov z hybridného pixelového detektora Timepix3, ktorý zachytáva stopy meraného žiarenia z rôznych zdrojov vrátane Sr-90 a Cs-137. Tieto nespracované údaje, sa potom spracujú pomocou Data Processing Engine (DPE).

V tejto počiatočnej fáze DPE vykonáva predbežnú analýzu surových dát, pričom identifikuje a kategorizuje radiačné udalosti, stopy zaznamenaných častíc, na základe ich energetických úrovni a priestorového rozloženia. Na zabezpečenie presnosti zaznamenaných úrovni energie a priestorových súradníc radiačných udalostí sa používajú kalibračné algoritmy.

Po spracovaní surových údajov DPE použije filter a masku na spresnenie výsledkov. Filter je určený na selektívne odstránenie nežiaducich stôp častíc zo súboru údajov, ako je šum, žiarenie pozadia alebo signály z iných zdrojov, ako sú cieľové typy žiarenia. Použitím filtra DPE môžeme izolovať požadované energetické spektrá spojené so zadanými zdrojmi žiarenia. [5]

Okrem toho sa môže vytvoriť maska na identifikáciu a zamaskovanie oblastí detektora, ktoré sú nefunkčné alebo poškodené. Tým sa zabezpečí, že sa z ďalšej analýzy vylúčia nespoľahlivé údaje z poškodených častí detektora. Pomocou vopred definovanej masky DPE odstráni údaje zodpovedajúce identifikovaným poškodeným častiam detektora.

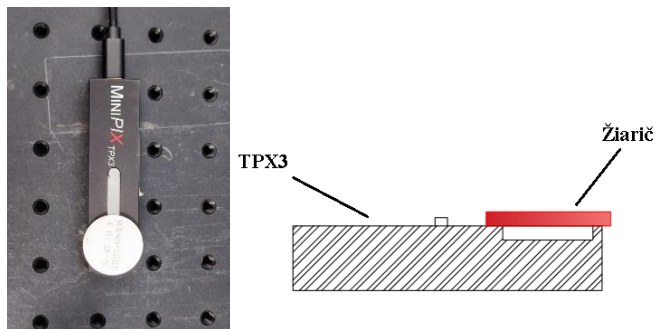
Konečným výstupom je spresnený súbor údajov pripravený na hĺbkovú analýzu a interpretáciu. Tento súbor údajov prešiel fázami spracovania dát, filtrovania a maskovania, výsledkom čoho sú spoľahlivé a presné merania žiarenia Sr-90 a Cs-137 bez nežiaduceho šumu a artefaktov spôsobených poruchami detektora.

3.1 Hlavné parametre používané na klasifikáciu častíc

Prezentované výsledky boli merané Timepix3 detektorom s kremikovým senzorom hrúbky 300 μm v prevádzkovom režime: ToT (Time-over-Threshold). Detektor bol pri meraní

uložený v odtienenej nádobe. Žiarič bol uložený na okne detektora tak, aby pokryl celú aktívnu časť.(Obr. 8).

$$S = N_{pix} \quad (2)$$

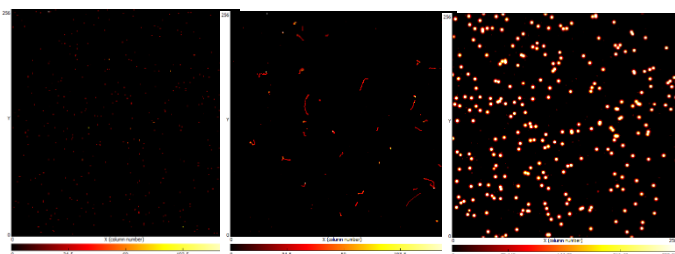


Obr. 8 – Experimentálne uloženie žiariča a detektora.

3.1.1 Tvar klastra:

Konfigurácia stôp častíc v senzore závisí od náboja, hmotnosti a energie častíc. Vizuálne tieto stopy vykazujú odlišné tvary zodpovedajúce rôznym charakteristikám častíc.

V prípade nenabitých častíc, ako sú fotóny, sa stopa zvyčajne prejavuje ako jedna alebo dve koncentrované bodky. Naopak, ľahšie nabité častice, ako sú elektróny, často vytvárajú podlhovasté cik-cak vzory. Na druhej strane ťažké častice majú tendenciu vytvárať rovné, široké stopy alebo expanzívne kruhové tvary. (Obr. 9). [8]



Obr. 9 – Príklad klastrův rôznych typů žiarenia zaznamenané detektorom FitPIX gama (vľavo); beta (stred); alfa (vpravo)

3.1.2 Energia klastra:

Inak nazývaná aj suma odovzdanej energie je celková energia klastra, suma energií v pixeloch prislúchajúcich stope jednej častice. V DPE sa nazýva aj objem klastra V.

$$V = \sum_{i=1}^{N_{pix}} E_i \quad (1)$$

3.1.3 Veľkosť klastra:

Veľkosť klastra predstavuje celkový počet všetkých pixelov, z ktorých je stopa častice tvorená. V DPE má veľkosť klastra označenie S. [6]

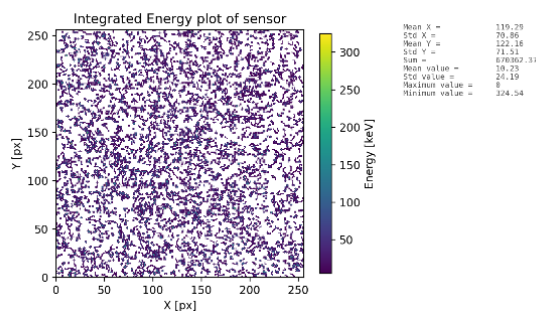
4 Výsledky

V našej štúdií sme testovali štyri rôzne expozičné časy s cieľom preskúmať rozsah možných hodnôt. Merania prebehli identicky s dĺžkou 30 minút alebo po dosiahnutí ekvivalentného objemu dát.

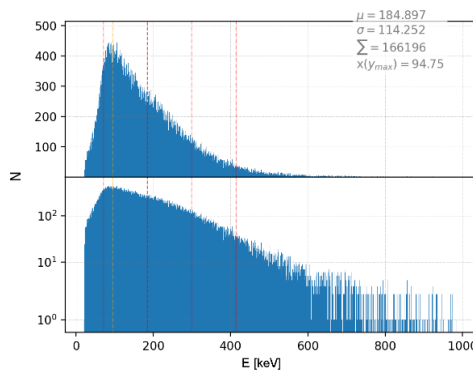
Tab. 1. Zoznam premeraných expozičných časov

č.	Dĺžka expozície	Režim merania
1	1 s	ToT
2	0.1 s	ToT
3	0.01s	ToT
4	0.001	ToT

Ako kontrolnú vzorku sme použili Sr-90, ktorého beta spektrum je známe a umožní nám kontrolu správnej kalibrácie detektora.

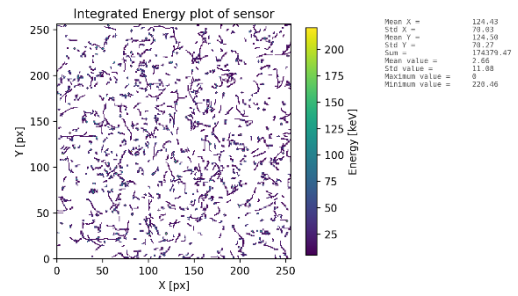
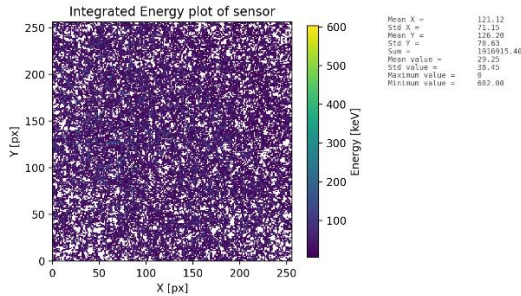


Obr. 10 – Záznam merania žiarenia zo zdroja Sr-90 detektorom Timepix3.



Obr. 11 – Energetické spektrum beta žiarenia zo zdroja Sr-90 namerané detektorom Timepix3.

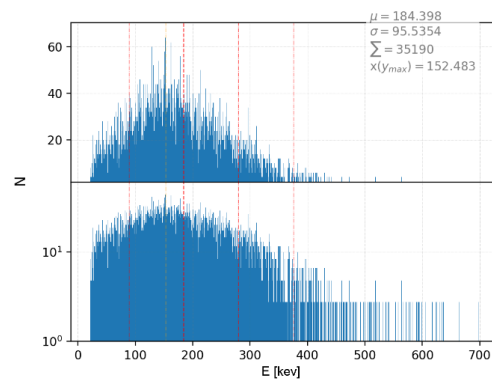
Následne sme detektor vystavili zmiešanému radiačnému poľu produkovanému zo zdroja Cs-137. Tento zdroj produkuje beta a gama žiarenie zároveň, a tak predstavuje vhodný zdroj pre tento experiment.



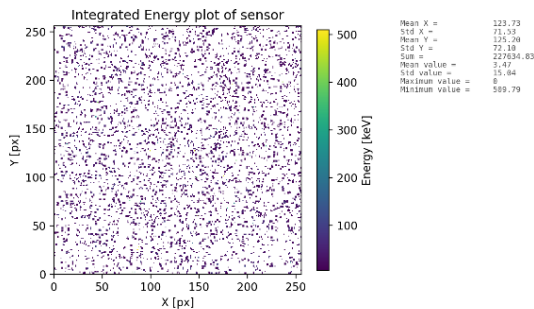
Obr. 15 – Beta zložka žiarenia zo zdroja Cs-137 po použití filtra

Obr. 12 - Záznam merania žiarenia zo zdroja Cs-137 detektorom Timepix3

Po aplikácii filtrov sme vizuálne pozorovali odlišenie jednotlivých druhov žiarenia. Snímky s malými klastrami maximálnej veľkosti 4x reprezentovali fotónové zložky, zatiaľ čo klastre s dlhším, tenkým tvarom a kľukatou trajektóriou naznačovali beta žiarenie.



Obr. 16 – Energetické spektrum beta zložky zo zdroja Cs-137.



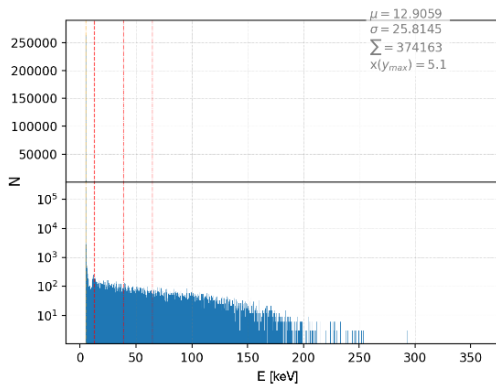
Obr. 13 – Gama zložka žiarenia zo zdroja Cs-137 nameraná Timepix3 d po použití filtra.

Pomocou DPE ďalej vieme získať podrobné štatistické dáta o jednotlivých zložkách. Tieto dáta poskytujú informácie o celkovom množstve zaznamenaných udalostí, fluencii, absorbovanej dávke, dávkovom príkone a ďalších štatistických údajoch.

Získané údaje majú dôležitú úlohu v monitorovaní radiačnej situácie, ako aj v ochrane pred žiarením. Charakterizácia jednotlivých zložiek žiarenia je nevyhnutná, pretože rôzne typy žiarenia majú rôzny vplyv na človeka. Tento parameter sa nazýva ekvivalentná dávka H_T v tkanive je definovaná vzťahom:

$$H_T = \sum \omega_R D_{T,R} \quad (3)$$

kde $D_{T,R}$ je absorbovaná dávka v biologickom väzive T , ω_R je radiačný váhový faktor (Obr. 19), vyjadrujúci biologický účinok žiarenia druhu R .



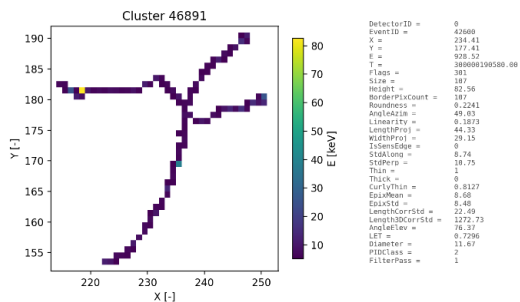
Obr. 14 – Energetické spektrum gama zložky zo zdroja Cs-137.

Druh žiarenia a jeho energia	w_R , (ICRP 60)	w_R , (ICRP 103)
Fotóny všetkých energií	1	1
Elektróny všetkých energií	1	1
Neutróny, energia E		spojitá funkcia:
< 10 keV	5	$2,5 + 18,2e^{-\ln(E_0)/6}, E_0 < \text{MeV}$
10 keV - 100 keV	10	
100 keV - 2 MeV	20	$5,0 + 17,0e^{-\ln(2E_0)/6}, 1\text{MeV} < E_0 < 50\text{MeV}$
2 MeV - 20 MeV	10	
> 20 MeV	5	$2,5 + 3,25e^{-\ln(0,04E_0)/6}, E_0 > 50\text{MeV}$
Protóny > 2 MeV	5	2
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20	20

Obr. 19 – Tabuľka hodnôt radiačného váhového faktora.

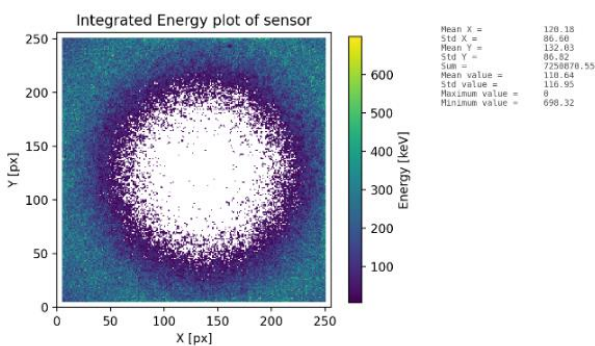
Pri analýze všetkých neočakávaných výsledkov a experimentálnych obmedzení sme zistili viaceré limitácie, ktoré

môžu ovplyvniť interpretáciu našich meraní. Dlhý expozičný čas viedol k prelínaniu stôp častíc, klastrov, čo spôsobilo nesprávnu interpretáciu dát. (Obr. 20)



Obr. 20 – Príklad prelínania dvoch klastrov.

Intenzívne zdroje mohli spôsobiť zahľtenie senzora a stratu dát v týchto oblastiach (Obr. 21), čo ďalej ovplyvnilo výsledky meraní. Naopak, krátky expozičný čas viedol k fragmentácii dát a v niektorých prípadoch k ich nesprávnej interpretácii.



Obr. 21 – Príklad zahľteného senzora.

Hrúbka senzora má významný vplyv na merania v rôznych aspektoch. Ovplyvňuje energetické straty častíc v materiáli. Hrúbšie senzory poskytujú viac materiálu pre interakcie častíc, čo vedie k väčšiemu odovzdaniu energie a potenciálne lepšiemu rozlíšeniu energie. Veľmi hrubé snímače však môžu viesť k zhoršenej detekcii, pretože niektoré častice môžu byť absorbované alebo rozptýlené pred dosiahnutím aktívneho objemu.

Hrúbšie senzory môžu tiež znížiť priestorové rozlíšenie tým, že vyžadujú, aby častice prechádzali väčším množstvom materiálu, čo má za následok širšie dráhy častíc a horšiu lokalizáciu interakcií.

Na základe našich zistení sme identifikovali, že najspôhlivejšie expozičné časy boli 0.1 s a 0.01 s, ktoré minimalizovali vplyv týchto obmedzení a poskytli najpresnejšie výsledky pre uvedený experiment.

5 Záver:

Experiment skúmajúci vplyv rôznych časov expozície na spoľahlivosť nameraných dát detektorom Timepix3 priniesol dôležité zistenia. Pozorovali sme, že dlhšie expozičné časy viedli k zachyteniu väčšieho počtu častíc v detektore. Tento

účinnok bol obzvlášť výrazný v prípade gama žiarenia, aj keď s menším vplyvom počas následnej fázy spracovania údajov, vzhľadom na typicky malé veľkosti klastrov (približne 1 až 4 pixelov) spojené s interakciami gama žiarenia.

V prípade beta častíc však predĺžený čas otvorenej uzávierky viedol k prekryvaniu stôp zaregistrovaných častíc, čo ohrozilo presnosť ich analýzy. Prekryvajúce sa stopy zakrývali interakcie jednotlivých častíc, čo komplikovalo identifikáciu a charakterizáciu klastrov častíc. Naopak, použitie veľmi krátkych časov uzávierky fragmentovalo elektrónové stopy na viaceré snímky, čo mohlo zavádzať pri analýze zhlukov tým, že sa chybné predpokladala prítomnosť viacerých stôp s nižšou energiou, hoci v skutočnosti bola prítomná len jedna stopa.

Na základe nášho výskumu a skúseností s používaním Timepix3 sme identifikovali niekoľko potenciálnych smerov pre budúci technický vývoj a výskum. Pre budúce štúdie môže byť integrácia Timepix3 do existujúcich monitorov radiačnej situácie v okolí urýchľovačov prínosom, napríklad pri FLASH terapii. Táto integrácia by umožnila kombinovať výhody Timepix3 s existujúcimi monitorovacími systémami a poskytla by komplexnejší pohľad na radiačné prostredie.

Literatúra

- [1] FRÖJDH, Erik. *Hybrid pixel detectors: Characterization and optimization*. 2015. PhD Thesis. Mid Sweden University.
- [2] BALLABRIGA, R., et al. Medipix3: A 64 k pixel detector readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance.
- [3] GEERTSEMA, Robbert. Dialing back time on Timepix3: A study on the timing performance of Timepix3. *arXiv preprint arXiv:2201.09275*, 2022.
- [4] Campbell, M., Alozy, J., Ballabriga, R., Heijne, E.H.M., Llopart, X., Poikela, T., Santin, E., Sriskaran, V., Tlustos, L., & Wong, W. (Year). The Medipix/timepix chip family. CERN, PH Department, 1211 Geneva 23, Switzerland.
- [5] LUKAS, Marek, et al. Data Processing Engine (DPE): Data Analysis Tool for Particle Tracking and Mixed Radiation Field Characterization with Pixel Detectors Timepix. *arXiv preprint arXiv:2310.15723*, 2023.
- [6] NOVAK, Andrej, et al. Silicon Carbide Timepix3 detector for quantum-imaging detection and spectral tracking of charged particles in wide range of energy and field-of-view. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18.11: C11004.
- [7] Advacam. (n.d.). DPE. Advacam Wiki. Retrieved January 15th, 2024, from <https://wiki.advacam.cz/wiki/DPE>
- [8] FLORES, Jessica; SHAA, Ameir; BAINES, Stephanie. *Particle Trajectory Visualization and Identification with Timepix Detectors*. 2016.
- [9] NATOCHII, Andrii, et al. Characterisation of the fused silica surface quality with a β -source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 910: 15-21.

Sekcia 6

Robotika a kybernetika

Porovnanie sledovacích algoritmov pre UAV

Daniel Fundárek¹

¹ Inžiniersky program robotika a kybernetika, FEI STU v Bratislave

xfundarekd@stuba.sk

Abstrakt – Algoritmus sledovania objektu bez nutnosti využitia detektoru objektu umožňuje sledovanie rôznych objektov v rýchlo meniacom sa prostredí. Základom je algoritmus strojového učenia alebo hlbokého učenia. Aktuálne neexistuje objektívne porovnanie schopnosti sledovania a rýchlosti sledovacích algoritmov pre UAV. Benchmarky, ktoré existujú pre jednotlivé algoritmy, nie sú testované na rovnakom hardvéri, a tak nemožno vybrať vhodný algoritmus bez nutnosti testovania viacerých. Cieľom práce je implementácia viacerých sledovacích algoritmov, vyhodnotenie ich schopnosti sledovania objektu snímanom širokouhlou kamerou počas pohybu a porovnanie rýchlosti algoritmov na homogénnom hardvéri. Algoritmy otestujeme na zariadení Nvidia Jetson Xavier NX.

1 Úvod

Algoritmy sledovania sú zamerané na sledovanie konkrétneho objektu vo video sekvencii alebo v reálnom čase. Tieto systémy pracujú tak, že najskôr identifikujú cieľový objekt v prvej snímke a potom ho sledujú naprieč nasledujúcimi snímkami. To sa dosahuje pomocou rôznych techník, ako sú porovnávanie vzorov, strojové učenie alebo hlboké učenie, ktoré umožňujú udržiavať lokalizáciu a identitu objektu aj napriek zmenám vzhľadu, osvetlenia alebo pohybu.

Sledovanie objektu s využitím UAV prináša možnosti sledovania pohyblivých objektov v meniacom sa prostredí a v rôznej nadmorskej výške. Tieto algoritmy sa často využívajú v záchranných a pátracích akciách, monitorovaní oblastí, sledovaní podozrivých osôb, či sledovaní objektu v kinematografií.

Sledovacie algoritmy častokrát vyžadujú nízky výpočtový výkon, a preto je ich možné využiť v palubných počítačoch lietajúcich prostriedkov. Problém je nájsť relevantné porovnanie rýchlosti sledovacích algoritmov na rovnakých edge zariadeniach alebo procesore.

Cieľom práce je porovnať rýchlosť algoritmov a schopnosť sledovania na obraze získanom zo širokouhlejšej kamery. Zistíme, ktoré algoritmy detegujú stratu objektu, a ktoré dokážu meniť veľkosť sledovaného regiónu. Odmeriame aj rýchlosť sledovania objektu na zariadení Nvidia Jetson Xavier NX.[1]

2 Sledovanie objektov z UAV

V práci sme použili sledovacie algoritmy z OpenCV knižnice, verzia 4.9.0. Konkrétne sme implementovali algoritmy: CSRT, MIL, TLD, MEDIANFLOW, MOOSE, VIT.

Algoritmy CSRT, MIL, TLD, MOOSE sú založené na princípe priebežného trénovania korelačného filtra. Konvolúciou korelačného filtra s fotkou získame pravdepodobnostnú mapu pozície sledovaného objektu.

Algoritmus MEDIANFLOW sleduje objekt zvolením príznačných bodov na sledovanom objekte a následnej lokalizácií rovnakých bodov na nasledovnej snímke.

VIT algoritmus je založený na konvolučnej neurónovej sieti a vizuálnom transformere. VIT patrí medzi algoritmy hlbokého učenia, ktorý bol trénovaný offline na OSTRack datase.[2–7]

2.1 Kamerový systém

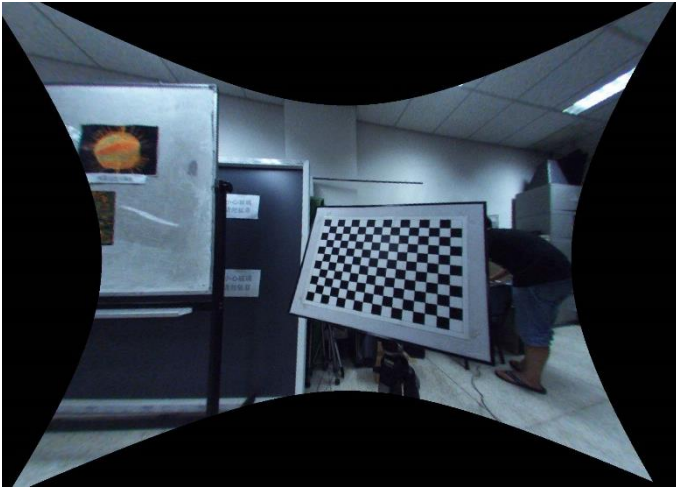
Pracovali sme s kamerou GoPro Hero 10 Black. Maximálne rozlíšenie kamery je 5312 x 2988 pixelov. Kamera má šošovku s diagonálnym FoV 170 stupňov.



Obr. 1 GoPro Hero 10 Black

V našej práci sme nastavili kameru na maximálne rozlíšenie a FoV 170 stupňov. Pri širokouhlých kamerách dochádza k výraznej distorcií obrazu pri krajoch šošovky(obrazu). Distorcia šošovky sa dá korigovať, ako je

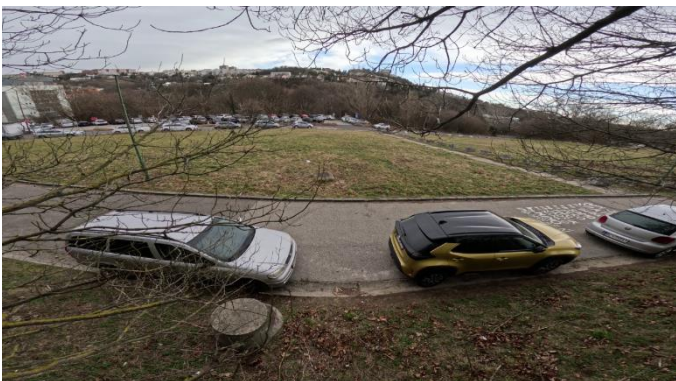
možno vidieť na Obr. 2, avšak bez orezania fotky sa fotka stáva pre operátora dronu menej prehľadná a použiteľná.



Obr. 2 Korekcia distorcie šošovky

Rozhodli sme sa používať fotky bez korekcie distorcie šošovky. Fotky z kamery vyzerali tak, ako Obr. 3.

Pre potreby tejto práce sme natočili videá s ľuďmi a autami. Počas natáčania sme prudko pohybovali kamerou, simulujúc pohyb dronu počas letu.



Obr. 3 Fotka z GoPro Hero FoV 170°

2.2 Palubný počítač UAV

Rýchlosť algoritmov sme testovali na riadiacej doske DCS 1.2 od spoločnosti Airvolute. Na doske je osadený aplikačný počítač Nvidia Jetson Xavier NX.

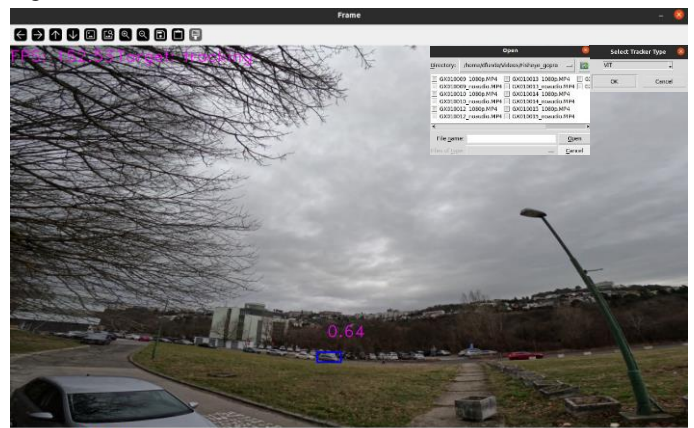
Jedná sa o miniatúrny počítač na Obr. 4, ktorý integruje procesor, grafický čip, obrazové a deep learning akcelerátory na jeden čip. Disponuje 16 GB RAM pamäte ktorá je zdieľaná medzi CPU a GPU. Jetson Xavier NX je optimalizovaný na prácu s AI pre zariadenia s nízkou spotrebou. S maximálnou spotrebou 20 Wattov poskytuje výkon 21 TOPS. SoC má 384 CUDA jadier, 48 Tensor jadier, 2 Nvidia akcelerátory hlbokého učenia a ARM procesor Carmel so 6 jadrami. Tento počítač váži iba 76 gramov s chladičom.



Obr. 4 Airvolute DCS 1.2 s Nvidia Jetson Xavier NX

2.3 Testovacia platforma

Vytvorili sme testovaciu platformu s jednoduchým GUI, v ktorej sme porovnali jednotlivé sledovacie algoritmy na reálnych videách. V aplikácii je možné zvoliť sledovací algoritmus a video.



Obr. 5 Testovacia aplikácia

Do aplikácie sme implementovali možnosť zastaviť a pustiť video. Nutné bolo implementovať inicializáciu sledovaného objektu. Inicializácia sledovaného objektu je vykonaná zvolením regiónu záujmu priamo na videu. Po inicializácii sledovacieho algoritmu sa každú snímku vykoná odhad pozície sledovaného objektu.

2.4 Sledovacie algoritmy

Do testovacej platformy sme implementovali sledovacie algoritmy: CSRT, MIL, TLD, MEDIANFLOW, MOOSE, VIT. V rámci aplikácie sme nastavili sledovacím algoritmom nasledovné parametre:

- Veľkosť prehládavaného okna.
- Rýchlosť učenia.
- Istota predikcie.

Implementovali sme inicializáciu a aktualizáciu (predikciu) sledovaného objektu. Taktiež sme implementovali asociačnú metriku, ktorá hodnotí, či je objekt sledovaný, na základe Eulerovej vzdialenosti stredy sledovaného objektu v dvoch po sebe idúcich snímkach.[2–7]

$$D = \sqrt{(x_{t1} - x_{t0})^2 + (y_{t1} - y_{t0})^2} \tag{1}$$

$$D > \text{threshold_distance}: \text{tracker lost} \tag{2}$$

2.5 Testovanie

Testovali sme rýchlosť sledovania na CPU AMD ryzen 5800H a vlastností jednotlivých algoritmov na testovacích videách pri rozlíšení 1280 na 720 pixelov.

UAV lietajú v rôznych výškach, čo znamená, že sledovací algoritmus musí byť schopný prispôsobiť veľkosť a rozmer sledovaného regiónu. Sledovacie algoritmy, ktoré nedokážu meniť veľkosť regiónu sledovaného objektu sú nedostatočné pre aplikácie UAV. Taktiež je dôležité vedieť rozlíšiť, či sledovací algoritmus stratil sledovaný objekt.

Tab. 1. Porovnanie rýchlosti sledovania a vlastností algoritmov

ALGORITMUS	FPS	DETEKCIA STRATENIA	ZMENA VEĽKOSTI
BOOSTING	140	X	X
MIL	32	X	X
TLD	22	✓	✓
KCF	230	X	Nedostatočne
MEDIANFLOW	435	X	✓
MOSSE	412	✓	✓
CSRT	72	X	✓
VIT	150	zniži sa dôvera	✓

Algoritmy MOSSE a TLD disponujú detekciou stratenia sledovaného objektu. Pre ostatné algoritmy sme implementovali vyššie spomenutú asociačnú metriku.

Z testovania rýchlosti algoritmov na CPU sme zistili že napriek veľkým rozdielom v FPS medzi algoritmi dokázali všetky algoritmy okrem TLD pracovať s videom v reálnom čase na AMD ryzen 5800H CPU.

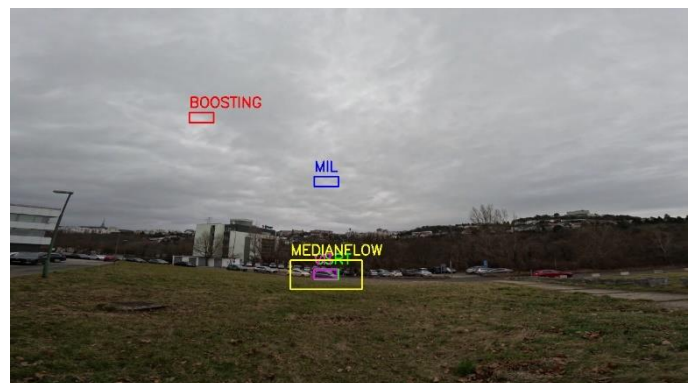
Testovali sme schopnosť algoritmov sledovať vybraný objekt počas nepravidelného pohybu kamery. Všetky algoritmy sme inicializovali na rovnaký objekt.



Obr. 6 Porovnanie sledovania algoritmov po 50 snímkach



Obr. 7 Porovnanie sledovania algoritmov po 100 snímkach



Obr. 8 Porovnanie sledovania algoritmov po 400 snímkach



Obr. 9 Porovnanie sledovania algoritmov po 1250 snímkach

Na Obr. 6 - 9 je graficky znázornené sledovanie objektov jednotlivými algoritmi. Obr. 6 zobrazuje inicializované algoritmy po 50 snímkach. Po 100 snímkach sa stratili algoritmy BOOSTING a KCF. Po 400 snímkach prestal sledovať zvolený objekt aj MIL. CSRT zvládol sledovať objekt takmer celú dobu testovacieho videa. V 1250 snímkach prestal sledovať objekt aj algoritmus CSRT.

MEDIANFLOW s VIT sledovali objekt počas celej dĺžky videa, avšak MEDIANFLOW nesprávne kompenzoval veľkosť sledovaného regiónu.

Z testovaných algoritmov na videách s ľuďmi aj autami sme vyhodnotili, že najrobustnejšie sledoval zvolený objekt algoritmus VIT a CSRT. VIT algoritmus taktiež takmer dokonale prispôboval veľkosť bboxu.

Tab. 2. Porovnanie sledovania

ALGORITMUS	POHYB KAMERY	SLED. AUTA	SLED. ČLOVEKA
BOOSTING	X	✓	✓
MIL	✓	✓	✓
TLD	✓	X	X
KCF	X	X	X
MEDIANFLOW	X	✓	X
MOSSE	X	✓	X
CSRT	✓	✓	✓
VIT	✓	✓	✓

Z viacerých testov sme zistili že sledovacie algoritmy MIL, CSRT a VIT dokázali sledovať auto aj človeka pri nepravidelnom pohybe kamery, ktorý simuloval pohyb UAV.

Algoritmy CSRT a VIT sa preukázali ako robustnejšie oproti ostatným algoritmom a spĺňali nami požadované podmienky na sledovanie objektov s využitím UAV.

Ďalším krokom bolo testovanie rýchlosti algoritmov na zariadení Nvidia Jetson Xavier NX.

Tab. 2. Porovnanie rýchlosti na Jetson Xavier NX

ALGORITMUS	MIN. FPS	AVG. FPS
BOOSTING	8	11
MIL	4	6
TLD	2	8
KCF	6	7
MEDIANFLOW	115	135
MOSSE	91	115
CSRT	8	9
VIT	33	35

Porovnali sme rýchlosť sledovacích algoritmov na zariadení Nvidia Jetson Xavier NX. Zistili sme, že algoritmy VIT, MEDIANFLOW a MOOSE možno využiť v aplikáciách reálneho času na palubnom počítači Jetson Xavier NX. Algoritmus MEDIANFLOW dosiahol najvyššiu rýchlosť, priemerne 135 snímok za sekundu. Podobne dopadol MOSSE, s priemernou rýchlosťou 115 FPS. Algoritmus VIT dosiahol 35 FPS.

Pri algoritme VIT je nutné podotknúť, že sa jedná o algoritmus, ktorý možno akcelerovať na grafickej karte. Taktiež ho možno zrýchliť znížením rozlíšenia (presnosti) z FP32 na FP16. Pri natívnom rozlíšení dosahuje VIT na Jetson Xavier NX grafickom čipe 50 FPS. Zvyšné algoritmy dosahovali rýchlosť medzi 6 až 11 FPS, čo je nedostatočné na sledovanie objektov, ktoré sa pohybujú voči UAV alebo počas letu UAV.

Vo všeobecnosti neexistuje jeden najlepší algoritmus, ktorý sleduje dobre vo všetkých prostrediach. Pri výbere sledovacieho algoritmu možno na základe rýchlostného porovnania eliminovať algoritmy, ktoré nedosahujú dostatočnú rýchlosť, prípadne nie sú dostatočne robustné.

Najrobustnejší algoritmus v našom testovaní je VIT, ktorý dosahuje rýchlosť reálneho času.

Veľmi robustný bol aj algoritmus CSRT, ktorý však dosahoval priemernú rýchlosť iba 9 FPS.

MEDIANFLOW je vhodný kandidát pre aplikáciu, kde sa vyžaduje vysoká rýchlosť za cenu nižšej robustnosti.

3 Záver

V tejto práci sme sa zamerali na porovnanie a hodnotenie rýchlosti vybraných sledovacích algoritmov pre UAV aplikácie.

Porovnali sme rýchlosť na pracovnom počítači aj palubnom počítači UAV a schopnosť sledovať zvolené objekty. Zistili sme ich schopnosti a obmedzenia pri sledovaní.

Zhodnotili sme, že algoritmus VIT sa ukázal ako najlepší algoritmus vďaka svojej vysokej presnosti a robustnosti, čo ho robí ideálnou voľbou pre náročnejšie sledovacie úlohy.

CSRT, napriek presnosti, je kvôli nízkej rýchlosti menej vhodný pre aplikácie reálneho času.

MEDIANFLOW je veľmi rýchly, avšak trpí nedostatočnou robustnosťou.

Zvyšné algoritmy nedosahovali rýchlostne požiadavky ani požiadavky na sledovanie objektov z letiaceho objektu.

Naše výsledky poskytujú dôležité usmernenia pre výber sledovacieho algoritmu v aplikáciách UAV, zohľadňujúc špecifické požiadavky na rýchlosť a presnosť.

Literatúra

- [1] VANEGAS F, CAMPBELL D, ROY N, GASTON KJ, GONZALEZ F. 2017. *UAV tracking and following a ground target under motion and localisation uncertainty*. IEEE Aerospace Conference. 2017. s. 1–10.
- [2] FARKHODOV K, LEE S-H, KWON K-R. 2020. *Object Tracking using CSRT Tracker and RCNN*. 2020. s. 209–12.
- [3] LUKEŽIČ A, VOJÍŘ T, ČEHOVIN ZAJC L, MATAS J, KRISTAN M. 2018. *Discriminative Correlation Filter Tracker with Channel and Spatial Reliability*. 2018, Int J Comput Vis
- [4] BABENKO B, YANG M-H, BELONGIE S. 2009. *Visual tracking with online Multiple Instance Learning*. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2009. s. 983–90.
- [5] SIDHU R. *Tutorial on Minimum Output Sum of Squared Error filter*. 2016
- [6] GRAHAM B, EL-NOUBY A, TOUVRON H, STOCK P, JOULIN A, JÉGOU H, 2021. *LeViT: A Vision Transformer in ConvNet's Clothing for Faster Inference*. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. s. 12259–69.
- [7] YE B, CHANG H, MA B, SHAN S, CHEN X. *Joint Feature Learning and Relation Modeling for Tracking: A One-Stream Framework*. 2022.

Návrh riadenia lietajúcich dronov pomocou Neuroevolúcie

Aleš Melichar¹

¹ Ústav vedy a výskumu, FEI STU v Bratislave

² Ústav Robotiky a kybernetiky

xmelichar@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zaoberá návrhom algoritmu riadenia pre UAV/kvadrokoptéru s cieľom dosiahnuť požadovanú pozíciu statického cieľa v trojrozmernom priestore. Využíva neuro-evolúciu s rozširujúcou topológiou (NEAT), umožňujúcu autonómnu navigáciu pomocou neurónových sietí riadených evolučným algoritmom. Realizácia práce prebiehala v hernom vývojovom programe Unity, v ktorom bolo vyvíjané simulačné prostredie. Na implementáciu riadiacich algoritmov sa využívala voľne dostupná knižnica Neat-python.

1 Úvod

Drony sa stávajú čoraz dôležitejšou súčasťou moderného sveta. Ich využitie siaha od doručovania zásielok a monitorovania infraštruktúry až po záchranné akcie a pomoc pri spracovaní obilnín v poľnohospodárstve. Kľúčovou vlastnosťou dronu je jeho schopnosť presne sa navigovať v trojrozmernom priestore a dosiahnuť zadaný cieľ [1].

Cieľom tejto práce je navrhnúť algoritmus riadenia pre UAV/kvadrokoptéru, ktorej úlohou je dosiahnuť požadovanú pozíciu statického cieľa. Keďže pri riadení kvadrokoptéry je náročne definovať správne rýchlosti rotorov v konkrétnom stave, nie je možné použiť učenie s učiteľom. Preto sme sa rozhodli riešiť problém evolučnými technikami učenia. Algoritmus je vytvorený využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou (NEAT – Neuro-evolution of augmented topologies).

Dron sa pohybuje v 3D priestore, v ktorom vníma polohu cieľa a snaží sa ho dosiahnuť. V práci sa zameriame na metódu autonómnej navigácie dronu, ktorá využíva neurónovú sieť modifikovanú evolučným algoritmom.

V rámci Unity je vyvíjané simulačné prostredie, ktoré zabezpečuje vizualizáciu pohybu kvadrokoptéry a interakciu s prostredím. Na strane implementácie algoritmov riadenia a učenia je využívaná knižnica Neat-python, ktorá poskytuje prostriedky na vytvorenie a evolúciu neurónových sietí [2].

Toto prostredie umožňuje integráciu neurónových sietí do simulácie v Unity, avšak prepojenie a tréning neurónových sietí pomocou evolučných algoritmov vyžaduje dodatočné techniky a implementáciu komunikačných kanálov na zdieľanie informácií do a z prostredia.

2 Dron

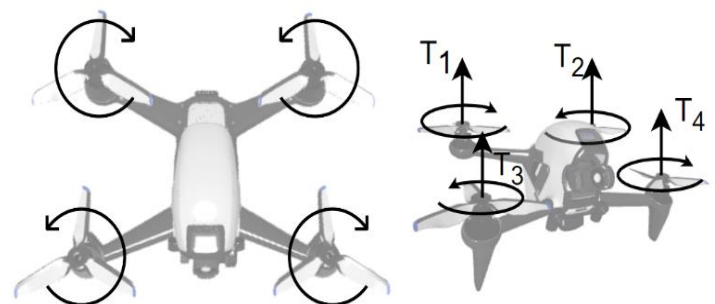
Bezpilotné lietajúce prostriedky (ďalej ako UAV), často označované ako drony, sú letecké vozidlá, ktoré lietajú autonómne alebo s diaľkovým ovládaním, pričom sa na palube nenachádza ľudský operátor [1].

Rozpoznávame viaceré typy UAV, a to:

- UAV s pevným krídlom. Tieto UAV sa používajú v úlohách, kedy je potrebné prekonať dlhé vzdialenosti a pokryť väčšie plochy [3].
- UAV viac-rotorové/s rotačným krídlom. Sú vhodné do aplikácií, kedy je potrebné stáť na mieste napríklad pri inšpekcií elektrických vedení [3].
- Hybridné UAV, ktoré sú kombináciou pevného krídla a rotorov. Podobne ako viac-rotorové UAV majú možnosť vertikálneho vzletu a pristátia, ako aj dlhú dĺžku letu [3].

V tejto práci použijeme viac-rotorové UAV a to konkrétne so 4 rotormi. Takýto dron teda pozostáva zo skeletu (drak) a štyroch rotorov, ktoré sú umiestnené rovnomerne od stredu tela, ktorý sa zhoduje s jeho barycentrom. Rotory vytvárajú ťah a krútiaci moment, čo umožňuje kvadrokoptéru meniť pozíciu a vzletovú výšku [4].

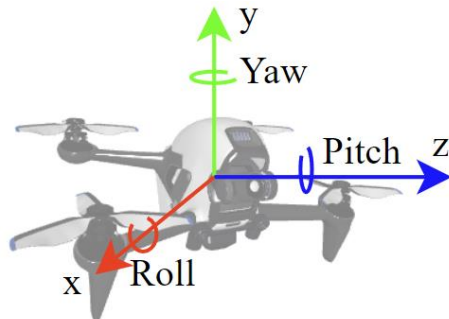
Štandardne sa dva páry rotorov točia opačným smerom ako je zobrazené na Obr. č. 1.



Obr. č. 1 Vľavo: otáčanie rotorov kvadrokoptéry, vpravo: smer ťahu pre každý rotor T_i

Každý rotor vytvára ťah T_i , ktorý je kolmý na rameno kvadrokoptéry. Riadením rýchlosti jednotlivých rotorov je možné kontrolovať rotáciu dronu okolo jeho horizontálnej osi, v podstate sa jedná o klopenie a nakláňanie vid' Obr. č. 2. Aby sa dron točil okolo vlastnej osi, je potrebné aby sa jeden rotor

točil rýchlejšie, a to tak aby vznikol rozdiel v ťahu voči protihľámu rotoru. Naopak, aby sa predišlo nežiaducemu otáčaniu okolo osi y, zvýšenie rýchlosti jedného z rotorov musí byť kompenzované rovnakým znížením rýchlosti rotoru proti nemu (po tej istej osi), čo má za následok nulový točivý moment okolo vertikálnej osi tela [4].



Obr. č. 2 Osi otáčania kvadrokoptéry

Existuje viacero úrovní autonómie dronov, od úrovne 0 (žiadna autonómia) až po úroveň 5, kedy hovoríme o plnej autonómii [5].

V tejto práci sa budeme zaoberať úrovňou autonómie 3, čo znamená, že dron je schopný lietať autonómne misie, no schopnosť vyhýbania v komplexnom priestore je obmedzená.

V súčasnosti sú autonómne drony skvelým nástrojom na vykonávanie rôznych úloh. Používajú sa aj v oblastiach kde je ohrozený ľudský život [6].

3 NEAT

Neuro-evolúcia je evolučný algoritmus na úpravu neurónových sietí pričom požíva genetické operácie ako mutácia, kríženie a selekcia. Týmto operáciami upravuje váhy a biasy neurónovej siete vďaka čomu umožňuje nájsť možné riešenie konkrétneho problému. Rozpoznávame dva druhy neuro-evolúcie a to konvenčnú neuro-evolúciu a neuro-evolúciu augmentatívnych topológií (ďalej ako NEAT) [7].

Konvenčná neuro-evolúcia sa zaoberá hľadaním optimálnych váh a biasov fixnej štruktúry neurónovej siete. Tieto systémy sa trochu líšia od prírody tým, že gény vyvíjajúcich sa umelých neurónových sietí v neuro-evolúcii s fixnou topológiou doslova kódujú ich váhy, ktoré sú od narodenia zamrznuté. Týmto spôsobom sú siete "narodené" s vedomím všetkého, čo kedy budú vedieť, a počas svojho "života" sa už nič ďalšie nenaučia [8].

Váhy avšak nie sú jediným aspektom neurónových sietí, ktoré prispievajú k ich správaniu. Topológia alebo štruktúra neurónovej siete taktiež značne ovplyvňuje ich správanie. NEAT teda okrem hľadania optimálnych hodnôt váh a biasov upravuje aj štruktúru siete [9].

V kontexte riadenia kvadrokoptéry sme zvolili NEAT pre jeho schopnosť adaptácie a riešenia komplexných problémov. NEAT umožňuje dynamicky meniť topológiu neurónovej siete, čo je dôležité pri navigácii v rôznych prostrediach a situáciách. Táto adaptabilita pomáha zlepšovať výkonnosť riadiaceho algoritmu a zvyšovať úspešnosť kvadrokoptéry pri dosahovaní stanovených cieľov.

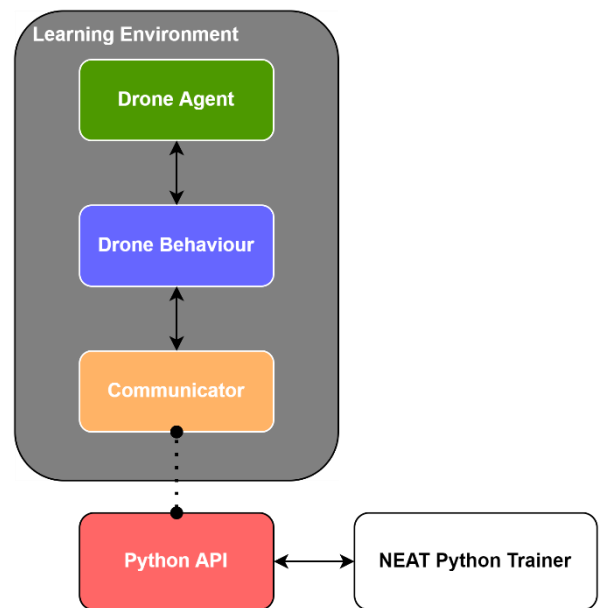
4 Implementácia riešenia

Na implementáciu simulačnej časti nášho výskumu sme zvolili hernú platformu Unity. Unity je vďaka svojmu robustnému fyzikálnemu enginu vhodný na simuláciu realistických fyzikálnych javov. Okrem toho Unity integruje ML-Agents toolbox, open-source platformu pre vývoj a tréning agentov pre úlohy zamerané na učenie s odmenou. Vďaka tejto kombinácii sme mohli efektívne implementovať kvadrokoptéru do herného prostredia.

Unity avšak nie je navrhnuté na tréning, či už konvenčnej neuro-evolúcie alebo NEAT, kvôli čomu bolo potrebné použiť externú knižnicu Neat-python.

4.1 Prepojenie Unity s Neat-Python

Pre spustenie tréningu kvadrokoptéry bolo nevyhnutné prepojiť Neat-python a Unity cez nízko úrovňové API. Tento prístup umožnil komunikáciu medzi Python skriptom, ktorý obsahuje implementáciu NEAT algoritmu, a herným enginom Unity, čo nám umožnilo efektívne tréning kvadrokoptéry priamo v hernom prostredí. Obr. č. 3 znázorňuje logiku komunikácie medzi týmito dvoma technológiami.



Obr. č. 3 Komunikácia medzi Neat-python a Unity

Simulačné prostredie (Learning environment) obsahuje tri komponenty, a to agenta, chovanie (behaviour) a komunikátor.

- Agent - pripojený k hernému objektu (akejkolvek postave v scéne), zabezpečuje zbieranie informácií prostredia a vykonáva akcie za ktoré dostáva odmenu alebo pokutu [10].

V našom prípade je to samotný dron

- Chovanie (Behaviour) – definuje špecifické atribúty agenta, ako je počet akcií ktoré môže agent vykonávať. V podstate sa jedná o funkciu, ktorá prijíma informácie od agenta a vracia mu akcie [10]. V našom prípade môžeme informácie chápať ako fyzikálne vlastnosti drona a pozícia cieľa.

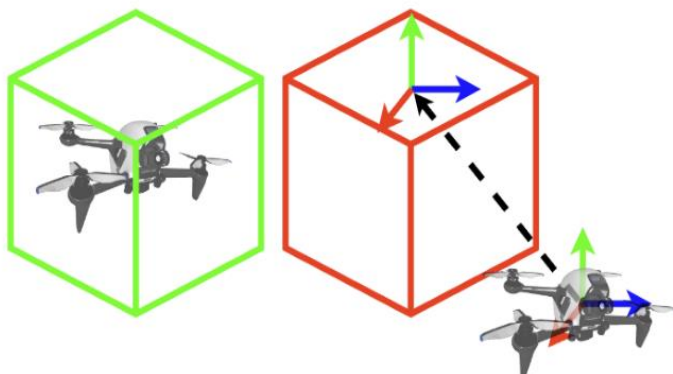
- Komunikátor – spája simulačné prostredie s nízko úrovňovým Python API, čo umožňuje tréningovému algoritmu získavať informácie z prostredia a do prostredia posilať akcie [10].

V našej práci sme od simulačného prostredia vyžadovali informácie z komponentu Chovanie každých 5 simulačných krokov, kde jeden simulačný krok je rovný fixnej časovej konštantne 0.02 [s], čo je rovné 50 snímkam za sekundu.

4.2 Úloha drona

Dron má za úlohu dostať sa do statickej kocky ako je zobrazené na Obr. č. 4. V takejto kocke musí kvadroptéra zotrvať určitý časový interval.

Pozícia kocky sa mení podľa aktuálnej úrovne simulácie, kde po dosiahnutí prvotnej pozície kocky sa zvýši úroveň obťažnosti, čo znamená, že sa zmení pozícia kocky do iného smeru. Vďaka tomuto prístupu získame robustnejšie riadenie schopné dostať drona do viacerých pozícií.



Obr. č. 4 Ukážka cieľa riadenia

4.3 Štruktúra siete

Počiatočná štruktúra neurónovej siete, ktorú používame pre náš problém, je založená na plne prepojenej doprednej neurónovej sieti. Na vstupy sme privedli vektor o veľkosti 13 hodnôt. Skladá sa z prvkov zobrazených v Tab. 1.

Tab. 1 Vstupy do neurónovej siete

Veľkosť	Stĺpec 1	Jednotky
1	Uhol do cieľa	[°]
3	Vektor do cieľa	[m]
3	Rýchlosť drona	[m/s]
3	Uhlová rýchlosť drona	[rad/s]
3	Naklonenie drona	[m]

Evolúciu začíname s 20 skrytými neurónmi v jednej skrytej vrstve, s náhodnými hodnotami váh inicializovanými pomocou Gaussovho rozdelenia. Výstup siete boli 4 hodnoty pre výkon rotorov kvadroptéry. Ako aktivačné funkcie sme použili funkciu sigmoid, vďaka ktorej sme dostali hodnoty z požadovaného intervalu <0; 1> (žiadny výkon rotora, plný výkon rotora).

Populácia siete mala veľkosť 50 jedincov, ktorých siete sa upravovala počas 2000 generácií. Genetický algoritmus

obsahoval aditívnu mutáciu váh a biasov a mutáciu štruktúry, obe s pravdepodobnosťou 15%. Pridanie a odobranie ako neurónu tak aj váh boli vykonané s pravdepodobnosťou 20%. V GA sa kríženie topológií a kríženie jedincov vykonávalo náhodne.

Výsledná neurónová sieť najlepšieho jedinca mala pomerne nízku komplexnosť, čo môžeme prisúdiť genetickému algoritmu knižnice Neat-python. Celkovo sieť obsahovala 18 neurónov v skrytej vrstve a 273 prepojení.

4.4 Simulácia drona

Dron je ovládaný štyrmi vstupmi, kde pre každý rotor je vypočítaný ťah a výsledný krútiaci moment. Vstupy sú v rozsahu <0; 1>, kde 1 znamená plné otáčky rotora a 0 žiadne otáčky rotora. Keďže vieme presnú pozíciu rotora, vypočítame spomínané sily pomocou nasledujúcich rovníc, ktoré použijeme v simulačnom prostredí:

$$F_i = a_i T_f \hat{y}_L \quad (1)$$

kde F_i je sila (výsledný ťah) aplikovaný na pozíciu pre i -tý rotor, a_i je výstup neurónovej siete pre i -tý rotor, T_f je koeficient ťahu vypočítaný tak aby sa dron pri vlastnej váhe 1.3 [kg] a $a = 0.5$, teda polovičnému výkonu rotorov vznášal a konečne \hat{y}_L je vektor nahor voči lokálnej transformácii objektu.

Pre krútiaci moment použijeme rovnicu v tvare:

$$\tau_i = a_i d_i \tau_f (-\hat{y}_G) \quad (2)$$

kde τ_i je výsledný krútiaci moment aplikovaný na pozíciu i -tého rotora, d_i je smer otáčania sa rotora ± 1 , $\tau_f = 1.27$ je koeficient pre násobenie výsledného krútiaceho momentu a \hat{y}_G je vektor nadol voči globálnemu súradnicovému systému

4.5 Výpočet fitness funkcie

Samotná simulácia trvala 1000 simulačných krokov (20 [s]). Agent môže simuláciu ukončiť skôr a to:

- Preklopením, kedy veľkosť vektora vertikálnej osi drona (y), prekoná vopred stanovenú hranicu
- Vyjdením z pomyselného priestoru prostredia, v tvare gule s vopred stanovenou veľkosťou priemeru

Za každý krok t dostane agent malú odmenu za zotrvanie vo vzduchu v podobe:

$$s(t) = \frac{1}{1000} \quad (3)$$

Taktiež v každom kroku vypočítavame odmenu za vzdialenosť cieľa a drona v tvare:

$$d(t) = 1 - \frac{\sqrt{(x_g - x_d)^2 + (y_g - y_d)^2 + (z_g - z_d)^2}}{d_{max}} \quad (4)$$

kde x_g, y_g, z_g sú súradnice cieľa, x_d, y_d, z_d sú súradnice drona, obe v globálnom súradnicovom systéme, d_{max} je maximálna vzdialenosť drona od cieľa.

Z fitness funkcie sa odpočítava pokuta za uhlovú rýchlosť v tvare:

$$p_\omega(t) = -0.5 \left(\frac{|\omega(t)|}{\omega_{max}} \right) \quad (5)$$

kde $\omega(t)$ je uhlová rýchlosť v kroku t a ω_{max} je maximálna uhlová rýchlosť objektu.

V neposlednom rade do fitness funkcie zahrňame aj normalizovanú odmenu za uhol k cieľu:

$$r_{\gamma}(t) = 0.4 \left(1 - \left| \frac{\gamma(t)}{180} \right| \right) \quad (6)$$

kde $\gamma(t)$ je uhol v kroku t medzi smerom drona a smerom k cieľu. Celková fitness funkcia potom vyzerá nasledovne:

$$f(t) = s(t) + d(t) + p_{\omega}(t) + r_{\gamma}(t) \quad (7)$$

Maximálna fitness je teda vtedy, keď je k cieľu najbližšie pričom má nulovú uhlovú rýchlosť (netočí sa okolo vlastnej osi) a je na cieľ priamo natočený. K fitness sa taktiež pripočíta odmena, ak dron zasiahne cieľ a rovnako ak v ňom zotrva počas simulačného kroku. Pri dotknutí sa cieľa je odmena +100, pri zotrvaní v cieľi sa prirába +1.

5 Záver

V tejto práci sme predstavili koncept kvadroptéry riadenej algoritmom Neat-python v simulačnom prostredí Unity. Aj keď sme zaznamenali isté ťažkosti so zotrvaním v statickom cieľi, veríme, že ďalší vývoj a vylepšovanie tohto algoritmu môže viesť k efektívnym metódam riadenia dronov, ktoré sú schopné sa lepšie prispôsobiť dynamickým podmienkam a úlohám v reálnom svete.

Možnosti pre ďalší vývoj zahrňajú optimalizáciu parametrov algoritmu, prispôbenie fitness funkcie, implementáciu dodatočných mechanizmov, integráciu senzorov, simuláciu prostredia a experimentovanie s rôznymi modelmi kvadroptér. Tieto návrhy môžu poskytnúť smerovanie pre ďalší vývoj algoritmu NEAT v kontexte riadenia kvadroptéry v simulačnom prostredí Unity.

Literatúra

- [1] G.R. Bhat, M.A. Dudhedia, Autonomous drones and their influence on standardization of rules and regulations for operating—A brief overview, Results in Control and Optimization, Volume 14, 2024, 100401, ISSN 2666-7207, <https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100401>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666720724000316>)
- [2] McIntyre, A., Kallada, M., Miguel, C. G., Feher de Silva, C., & Netto, M. L. neat-python [Computer software]
- [3] Asif Ali Laghari, Awais Khan Jumani, Rashid Ali Laghari, Haque Nawaz, Unmanned aerial vehicles: A review, Cognitive Robotics, Volume 3, 2023, Pages 8-22, ISSN 2667-2413, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241322000258>)
- [4] Mariani, M.; Fiori, S. Design and Simulation of a Neuroevolutionary Controller for a Quadcopter Drone. Aerospace 2023, 10, 418. <https://doi.org/10.3390/aerospace10050418>
- [5] Alsadik, Bashar & Nex, Francesco. (2021). The Rise in UAV Inspections for Civil Infrastructure <https://www.gim-international.com/content/article/the->

- rise-in-uav-inspections-for-civil-infrastructure. GIM International.
- [6] Mohsan, Syed Agha Hassnain & Othman, Nawaf Qasem Hamood & Li, Yanlong & Alsharif, Mohammed & Khan, Muhammad. (2023). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. Intelligent Service Robotics. 10.1007/s11370-022-00452-4.
- [7] S. Risi and J. Togelius. Neuroevolution in games: State of the art and open challenges. IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 7(1):1–16, 2015.
- [8] Kenneth O. Stanley . Neuroevolution: A different kind of deep learning, O'Reilly <https://www.oreilly.com/radar/neuroevolution-a-different-kind-of-deep-learning>
- [9] K. O. Stanley and R. Miikkulainen. Evolving neural networks through augmenting topologies. Evolutionary Computation, 10(2):99–127, 2002
- [10] Juliani, Arthur and Berges, Vincent-Pierre and Teng, Ervin and Cohen, Andrew and Harper, Jonathan and Elion, Chris and Goy, Chris and Gao, Yuan and Henry, Hunter and Mattar, Marwan and Lange, Danny, Unity: A general platform for intelligent agents, arXiv preprint arXiv:1809.02627, <https://arxiv.org/pdf/1809.02627.pdf>

Mriežková architektúra senzorov s aplikáciou v 'In-sensor computing' technológií

Matej Horský^{1,2}, Ivan Sekaj¹, Boris Hudec²

¹Ústav robotiky a kybernetiky, FEI STU v Bratislave

²Elektrotechnický ústav SAV, v.v.i., Bratislava

matej.horsky@savba.sk

V dnešnej dobe sú technológie neodlučiteľnou súčasťou každodenného života väčšiny z nás. Pomocou senzorov a snímačov dokážeme konvertovať fyzikálne stavy prostredia tak, aby sme im porozumeli. Avšak s postupným vývojom potrebujeme pracovať s väčším množstvom údajov a informácií, ktoré generujú senzory. Tým sa zvyšujú nároky na výkon, energiu a predlžuje sa čas spracovania meraných údajov. S cieľom vyriešiť tieto problémy vzniká čoraz väčšia potreba hľadania nových architektúr senzorov.

V tejto práci predstavíme skupinu senzorov, ktorá spadá do kategórie 'In-sensor computing' (ISC). Táto architektúra dokáže nie len zachytiť meranú veličinu, ale zároveň aj efektívne tieto údaje spracovať a tým zabrániť nadbytočnému presunu nepotrebných informácií. Predstavíme návrh a problematiku výroby takýchto senzorov. A daný postup budeme demonštrovať na návrhu teplotného senzora.

1 Úvod

In-sensor computing je architektúra senzorov, ktorá dokáže efektívne spracovávať veľké množstvo meraných dát efektívne a rýchlo.

V bežných systémoch je potrebné namerané údaje zo senzoru najskôr skonvertovať z analógového na digitálny signál, ktorý sa uloží v pamäti [1]. Z pamäte uložený signál spracuje procesor, obr. 1. Proces spracovania prebieha na niekoľkých úrovniach. Nízka úroveň (potlačanie šumu, filtrácia, ...) a vysoká úroveň do ktorej spadá klasifikácia [2]. Tento postup môže byť v mnohých prípadoch neefektívny, kvôli veľkému presunu nepotrebných informácií. ISC dokáže celý tento proces zjednodušiť a presunúť nízku aj vysokú úroveň spracovania na senzor samotný. Čím sa práve zabráni nadbytočnému presunu nepotrebných informácií [1]. Umožňuje to mriežková architektúra senzoru, ktorá vďaka jedinečnému

zapojeniu dokáže implementovať vlastnosti strojového učenia pomocou umelých neuronových sietí [3].

2 Využitie technológií

V tejto práci bolo využitých niekoľko spôsobov nanášania tenkých vrstiev na atomárnej úrovni. Depozícia atómových vrstiev (ALD) s využitím prístroja Beneq TFS-200 a depozícia naparováním (PVD). Na tvorbu štruktúr horných elektród sa využila foto-litografia. Elektrické merania boli vyhotovené na Keithley 4200-SCS systéme.

3 In-sensor computing

Cieľom ISC je meranú veličinu priamo na senzore klasifikovať. Pri snímaní teploty to znamená že senzor bude mať niekoľko výstupov, z ktorých každý bude predstavovať teplotný interval. Výsledný výstup bude definovaný najväčším prúdom na jednom z výstupov. To znamená, že teplota bude klasifikovaná práve do daného intervalu. Základom je definovať základnú problematiku výroby mriežkových štruktúr, a základné prvky architektúry.

3.1 Umelé neuronové siete

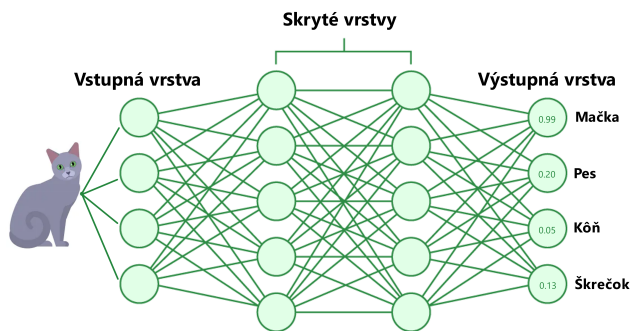
Umelé neuronové siete (UNS) predstavujú taký spôsob reprezentácie informácie (alebo znalostí), ktorý simuluje biologický mozog. Sú parametrizované pomocou algoritmov, ktorým dnes hovoríme strojové učenie [4]. Pomocou mriežkovej štruktúry je možné tento model previesť na elektrický obvod. V takýchto štruktúrach sa často využívajú memristory na napodobnenie synaptických spojení obr. 2, [3]. V ISC však tieto spojenia predstavujú senzory.

Spojenie UNS je nevyhnutné pre správne fungovanie. Základný matematický model neuronových sietí pozostáva z niekoľkých vrstiev, vstupná vrstva, skryté vrstvy a výstupná vrstva. Každá vrstva pozostáva zo skupiny neurónov. Každý neurón je spojený cez synaptické spojenie (váhu) s každým neurónom v nasledujúcej vrstve. Skrytých vrstiev sa v UNS môže nachádzať ľubovoľný počet [5].

Výpočet výstupu do ďalšieho neurónu sa vypočítava na



Obr. 1: Štandardné spracovanie informácií zo senzoru



Obr. 2: Štruktúra umelej neuronovej siete, pozostávajúca zo vstupnej, dvoch skrytých vrstiev a výstupnej vrstvy. Každá vrstva pozostáva z neurónov, ktoré sú medzi vrstvami poprepájané s ďalšími neurónmi

základe nasledujúceho vzťahu (1):

$$y = f_{aktiv} \left(\sum_{i=1}^A (I_i * W_i) + b \right) \quad (1)$$

kde f_{aktiv} predstavuje aktivačnú funkciu, A predstavuje počet neurónov vo vrstve, I je hodnota vstupu, W je váha a b bias.

Mriežková štruktúra predstavuje synaptické spojenie dvoch vrstiev a preto nebudeme uvažovať bias a aktivačnú funkciu.

Toto spojenie (bez biasov a aktivačnej funkcie) vieme zapísať pre celý výstupný vektor vo forme maticovo-vektorového násobenia nasledovne (2):

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{1,1} & V_{1,2} & \cdots & V_{1,n} \\ V_{2,1} & V_{2,2} & \cdots & V_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{m,1} & V_{m,2} & \cdots & V_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

3.2 Implementácia UNS a výpočet výstupu v senzore

ISC sensor pozostáva z mriežkovej (maticovej) štruktúry obr. 3. To znamená, že každý vstup je prepojený so všetkými výstupmi na každom priesečníku pomocou senzoru obr. 4. Odpor tohoto prepojenia predstavuje synaptické spojenie (váhu) [2].

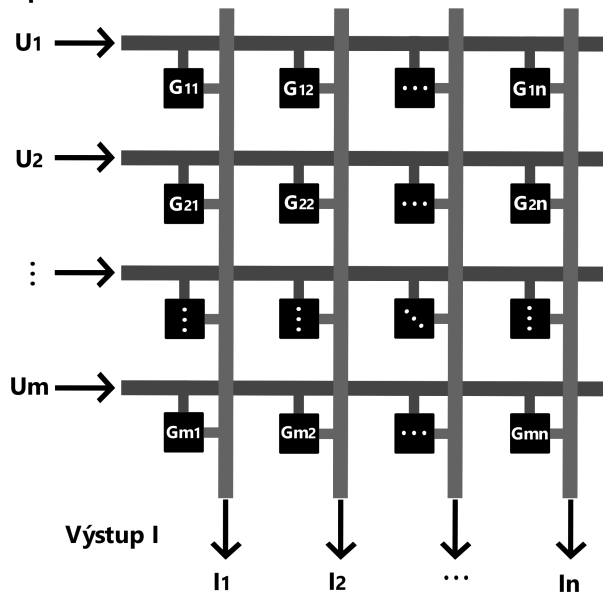
Z každého senzoru vystupuje prúd, ktorý vieme vypočítať jednoduchým ohmovým zákonom (3):

$$I = U * G \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{R} \quad (4)$$

kde I predstavuje výstupný prúd, U vstupné napätie, a odpor R sme si pre zjednodušenie vyjadrili pomocou G (4), ktorá predstavuje vodivosť.

Vstup U



Obr. 3: Znázornenie mriežkovej architektúry so vstupným napätím U , výstupným prúdom I . G predstavuje vodivosť prepojenia (selektor a senzor) vstupu a výstupu.

Na výstupe každého stĺpca potom vieme vypočítať výstupný prúd pomocou kirchhoffovho zákona (5).

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_i \quad (5)$$

kde I_1 až I_i predstavujú výstupné prúdy zo senzorov v stĺpci.

Ak pomocou vzťahov (3) a (5) vyjadríme vzťah pre celý výstupný vektor prúdov pre mriežkový obvod senzorov obr. 3, tak sa dá celý výpočet zapísať vo forme maticovo-vektorového násobenia (6).

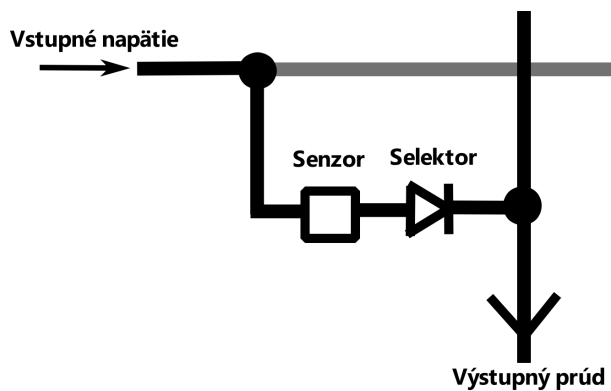
$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,n} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m,1} & G_{m,2} & \cdots & G_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_m \end{pmatrix} \quad (6)$$

pomocou vstupných napätí U_1 až U_i a jednotlivých vodivostí $G_{m,n}$ senzorov.

Pri porovnaní výpočtu výstupu v UNS (2) a vektora prúdov (6) je vidieť, že v oboch prípadoch využívame maticovo-vektorové násobenie. Toto dokazuje že synaptické prepojenie vrstiev neuronovej siete vieme implementovať ako elektrický obvod s mriežkovou štruktúrou. Ak by sme chceli vytvoriť návrh zložitejšej neuronovej siete s viacerými vrstvami, je potrebné vytvoriť návrh neurónu, čiže aktivačnej funkcie a biasu.

3.2.1 Selektor

Návrh štruktúry ISC senzoru sprevádzajú mnohé výzvy. Jednou z nich je potlačenie parazitických prúdov v mriežke (v angl. 'sneak-path current'). Tento jav predstavuje nechcený prechod prúdu susednými spojeniami v mriežke. Nastane to v prípade ak



Obr. 4: Zapojenie selektora (diódy) a senzoru (platinový meander) v sérii, pri prepojení vstupu s výstupom

má spojenie, ktoré chceme odmerať vysoký odpor v porovnaní s okolitými spojeniami.[6].

Jedným z riešení je zapojenie selektora do série ku každému senzoru obr. 4. Dióda má ideálne vlastnosti na splnenie funkcie selektora [7]. Táto súčiastka prepúšťa prúd v kladnej polarite a v zápornej ho zase blokuje [8]. Toto nelineárne správanie vie efektívne predísť vzniku parazitných prúdov.

3.2.2 Senzor

Platinový (Pt) meander predstavuje ideálne riešenie teplotného senzoru. Pt má vynikajúce tepelné vlastnosti, preto je častokrát zvolená ako komponent v tepelných senzoroch. Jej odpor je lineárne závislý od teploty a to až do vysokých teplôt [9]. Zmenou rozmerov čiže hrúbky, šírky alebo dĺžky meandru vieme modulovať odpor meandru a tým aj zmenu odporu pri rôznych teplotách.

3.3 Fabrikácia a elektrické merania

Selektor a senzor sú dve dôležité súčasti pri návrhu ISC senzoru. Na jednotlivé elektrické merania sme vytvorili samostatné vzorky selektorov a Pt meandrov.

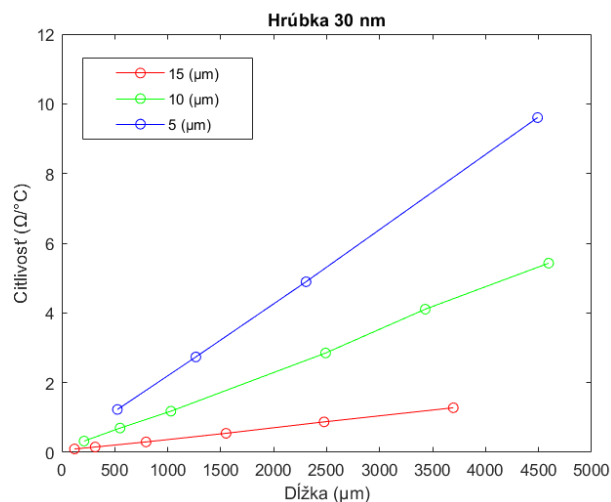
Pre správny dizajn a návrh mriežky senzorov je potrebné zistiť správanie sa jednotlivých komponentov pri zmene teploty. Preto je potrebné odmerať vlastnosti súčiastok pri rôznej teplote.

3.3.1 Pt senzor

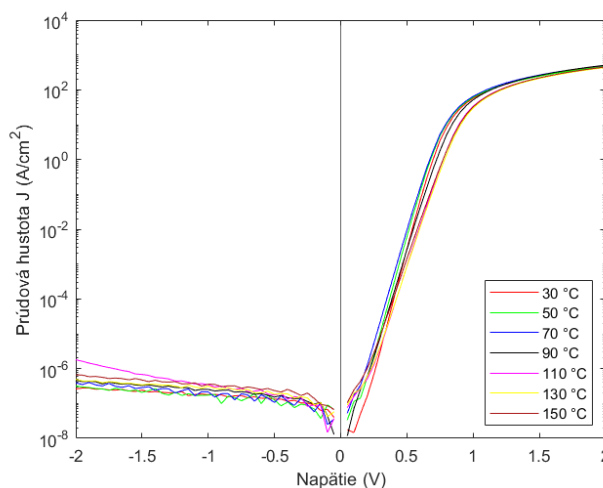
Pre teplotnú charakterizáciu Pt meandrov boli vyrobené vzorky so sadou meandrov o rôznej šírky, dĺžky aj hrúbky. Na vzorke sa nachádzalo 30 rôznych meandrov. Ktoré boli rozdelené podľa šírky na: 15 μm , 10 μm , 5 μm , 3 μm , 1.5 μm . Avšak s fotolitografiou sa 1.5 μm meandre nepodarili vyrobiť.

Odpor meandrov boli merané od 30 °C po 150 °C každých 20°C. Citlivosť v závislosti od rozmerov meandrov je vyobrazená na obr. 5. S rastúcou dĺžkou sa zvyšuje citlivosť zatiaľ čo s rastúcou šírkou sa citlivosť znižuje. Citlivosť je vypočítaná na základe vzorca (7):

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (7)$$



Obr. 5: Citlivosť meandrov v závislosti od rozmerov. Pri hrúbke Pt 30 nm. Meraná šírka vodiča meandru bola 15, 10 a 5 μm



Obr. 6: J-V charakteristiky pri teplotách od 30 °C po 150 °C,

3.3.2 Selektor

Selektor bol meraný pri rovnakých podmienkach ako Pt meandre, od 30°C po 150°C. selektor predstavuje schottkyho diódu, ktorá pozostáva z vrstiev Pt/TiO₂/TiN.

Z volt-ampérovej charakteristiky obr. 6, je vidno asymetriu prúdu prechádzaného cez diódu v kladnej a zápornej polarite. Toto správanie zabezpečí voľný prechod prúdu v priepustnom kladnom smere a zabráni prechodu v závernom smere, čím sa predíde nechcenému vytvoreniu sneak-path current.

Hrúbka TiO₂ je 20 nm. Napriek tomu nastáva pri zvyšovaní teploty menšia zmena odporu. Tepelné spracovanie vzorky (vyžíhanie) by malo prúdy stabilizovať.

4 Záver

Nakoľko dnešné technológie vyžadujú čoraz väčšie nároky na výkon, rýchlosť a spotrebu energie je potrebné hľadať rôzne alternatívy a možnosti zjednodušenia celého procesu spracovávaní informácií. In-sensor computing sa preukázal ako jedna z možností. Táto architektúra vie efektívne implementovať neurónové siete a vďaka tomu obmedziť nadbytočný presun nepotrebných informácií.

Spojenie neurónových sietí sa dá pomocou mriežkovej štruktúry implementovať ako elektrický obvod. Realizácia takejto mriežky prináša niekoľko výziev. Hlavné návrh senzoru a selektoru, čo sú nevyhnutné súčiastky mriežkovej architektúry. Pri teplotnom senzore sa Pt meander osvedčil ako ideálna možnosť senzoru v mriežkovej štruktúre. Vzhľadom na jeho lineárnu odozvu odporu od teploty.

Pri selektore sme využili Schottkyho diódu pozostávajúcu z tenkých vrstiev Pt/TiO₂/TiN vyrobenú pomocou technológie ALD. Táto dióda vykazuje nelineárnosť a asymetriu pri zápornej a kladnej polarite čo je žiadúca vlastnosť pri prevencii parazitných prúdov.

Pod'akovanie

Tento výskum je čiastočne financovaný z projektu m-era.net ATOSENS, prebiehajúceho na Elektrotechnickom ústave SAV.

Literatúra

- [1] Shao, Bangjie and Ma, Sijie and Zhou, Yue and Li, Qiao and Chai, Yang. In-Sensor Computing: Materials, Devices, and Integration Technologies. *Advanced Materials*, doi:10.1002/adma.202203830,2022.
- [2] Zhou, F., Chai, Y. Near-sensor and in-sensor computing. *Nat Electron*, 3, 664–671 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00501-9>.
- [3] Aguirre, F., Sebastian, A., Le Gallo, M. et al. Hardware implementation of memristor-based artificial neural networks. *Nat Commun* 15, 1974 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45670-9>.
- [4] Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., Arshad, H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*,2018 Nov 23;4(11):e00938. doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
- [5] Alzubaidi, L., Zhang, J., Humaidi, A.J. et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *J Big Data*8, 53 (2021), <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>.
- [6] Shi, Lingyun and Zheng, Guohao and Tian, Bo Bo and Dkhil, Brahim and Duan, Chun-Gang. Research progress of the solutions to the sneak path issue in memristor crossbar arrays. *Nanoscale Advances* 2. 10.1039/D0NA00100G (2020).
- [7] Chen, A. Memory selector devices and crossbar array design: a modeling-based assessment. *J Comput Electron*16, 1186–1200 (2017).<https://doi.org/10.1007/s10825-017-1059-7>
- [8] Horský, Matej and Nádaždy, Peter and Dobročka, Edmund and Gregušová, Dagmar and Seifertová, Alena and Dérer, Ján and Fedor, Ján and Ščepka, Tomáš and Hudec, Boris. Electrical properties of Pt/TiO₂/Pt and Pt/TiO₂/TiN structures grown by atomic layer deposition using TTIP and water. *2022 14th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM)*,2021, 10.1109/ASDAM55965.2022.9966782.
- [9] Weiming, Lv and Wang, Yiqun and Shi, Wenhua and Cheng, Wei and Huang, Rong and Zhong, Ruifang and Zeng, Zhongming and Fan, Yaming and Zhang, Baoshun. Role of micro-nano fabrication process on the temperature coefficient of resistance of platinum thin films resistance temperature detector. *Materials Letters* 309. 131313. 10.1016/j.matlet.2021.131313. 2021

PID controller implementation in C++

David Janto¹, Ing. Martin Dodek PhD¹

¹Institute of Robotics and Cybernetics, FEI STU, Bratislava

xjanto@stuba.sk

The paper analyzes the theory of Proportional-Integral-Derivative (PID) control in the context of embedded systems. We examine standard methods of approximating the derivative and integration and transform them into difference equations implementable as a computer program. We implement these equations, together with other auxiliary routines and interfaces, using C++ programming language. Finally, we perform a series of tests on a simulated artificial and real-world system, using Arduino UNO with the attached peripherals for real-time control of temperature. We conclude, that our methods of approach were correct and the behaviour of our final product closely mimics that of the expected one

1 Introduction

The world of embedded systems is very different to that of classical computer systems. By the term ‘embedded system’ we understand a computer system that is in general designed to perform a specific set of tasks or operations. It is usually an integral part of a larger mechanical or electrical system or a device, while its dimensions, computational power and energy requirements are often reduced.

Many of the limitations in working capabilities often require engineers to come up with creative solutions and have deep understanding of both hardware and software to meet the criteria of a given application. Engineers tasked to design such systems are often required to have deep knowledge of not only physical and mathematical equations and operations, but also computer engineering, algorithms and communication techniques for optimal resource usage.

At the heart of any embedded system lies a microcontroller, or a microprocessor unit on a chip, with the peripheral devices connected to it. Among other concepts required to be understood at the fundamental level are analog-to-digital converters, timers, interrupt management and handling, to name a few.

Since classical computer systems naturally operate in discrete time due to the sequential nature of code execution, for control of continuous-time processes, the essential mathematical operations such as derivative and integration have to be implemented in some way. In order implement these operation to a discrete-time machine however, we must understand the methods of numerical approximation.

Finding equivalents of these mathematical operations in discrete-time domain will allow us to deploy them to a computer

system. The integration and derivative operations will further be used to construct the subject of this paper, which is the PID controller.

2 Methods of numerical approximation

In this section, we will closely describe the most popular methods for numerical approximation of integration and derivative based on [1]. These methods are meant to approximate the continuous-time derivative and integration by some difference equation in discrete time domain considering the sample time T_s .

2.1 Forward Euler method

Forward Euler method (abbr. FEM) defines the approximation of derivative as

$$u_D(t) = D \frac{de(t)}{dt} \implies u_D(k) = D \frac{e(k+1) - e(k)}{T_s} \quad (1)$$

By applying the Z-transform, we have

$$G_{R_D}(z) = \frac{U_D(z)}{E(z)} = D \frac{z-1}{T_s} = D \frac{1-z^{-1}}{T_s z^{-1}} \quad (2)$$

Similarly, the integration is defined as

$$u_I(t) = I \int_0^t e(\tau) d\tau \implies u_I(k) = IT_s e(k-1) + u_I(k-1) \quad (3)$$

By applying Z-transform we get this form

$$G_{R_I}(z) = \frac{U_I(z)}{E(z)} = \frac{IT_s}{z-1} = \frac{IT_s z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (4)$$

In general, approximation of the Laplace operator s gets

$$s \approx \frac{z-1}{T_s} = \frac{1-z^{-1}}{T_s z^{-1}} \quad (5)$$

This approximation is not applicable in real-time due to the causality issue since the derivative term is based on a difference between the next and current sample (in time). Therefore, in the controller implementation, we will use the derivative in the form of Backward Euler method.

2.2 Backward Euler method

Backward Euler method (abbr. BEM) approximates the derivative in the s-domain as

$$u_D(t) = D \frac{de(t)}{dt} \implies u_D(k) = D \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (6)$$

By applying the Z-transform, we get this form for the derivative term of the controller

$$G_{R_D}(z) = \frac{U_D(z)}{E(z)} = D \frac{z-1}{T_s z} = D \frac{1-z^{-1}}{T_s} \quad (7)$$

Integration is approximated such as

$$u_I(t) = I \int_0^t e(\tau) d\tau \implies u_I(k) = IT_s e(k) + u_I(k-1) \quad (8)$$

Transfer function after applying the Z-transform has this form

$$G_{R_I}(z) = \frac{U_I(z)}{E(z)} = \frac{IT_s z}{z-1} = IT_s \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (9)$$

In general, approximation of the Laplace operator s gets

$$s \approx \frac{z-1}{T_s z} = \frac{1-z^{-1}}{T_s} \quad (10)$$

2.3 Trapezoidal method

The trapezoidal method (abbr. TM) approximates the derivative term using the Padé approximant

$$z = e^{sT_s} = \frac{e^{s \frac{T_s}{2}}}{e^{-s \frac{T_s}{2}}} \approx \frac{1 + \frac{T_s}{2}s}{1 - \frac{T_s}{2}s} \quad (11)$$

Integration is approximated such as

$$u_I(t) = I \int_0^t e(\tau) d\tau \implies u_I(k) = \frac{IT_s}{2} [e(k) + e(k-1)] + u_I(k-1) \quad (12)$$

Transfer function for integration after applying the Z-transform has this form

$$G_{R_I}(z) = \frac{U_I(z)}{E(z)} = \frac{IT_s}{2} \frac{z+1}{z-1} = \frac{IT_s}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (13)$$

In general, approximation of the Laplace operator s gets

$$s \approx \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (14)$$

2.4 Method comparison

Comparing equations (1) and (6) we can see the crucial difference between the aforementioned methods. FEM approximates the derivative term in 'forward' fashion - by calculating the difference of the next sample and the current sample. BEM approximates it 'backwards' by calculating the difference of the current sample and the previous sample. TM then combines these two approaches by using a trapezoid as a means of difference calculation. Graphical representation in Fig 1 further explains this topic.

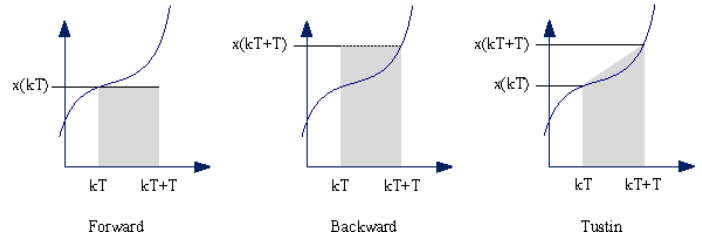


Figure 1: Graphical representation of numerical methods (Tustin symbolizing Trapezoidal Method in this case)

3 Discrete-time PID controller

PID controller, as a classical tool in the control theory toolbox, contributes to 95% of industry's automated control solutions [3]. This controller defines its output based on the error i.e. difference between the set point value and the measured controlled variable. The output of the PID controller is then fed to the process itself, managing its behavior.

In this paper, we will consider the discrete-time equivalent of the continuous-time PID controller. An advantage is that the parameters (gains) of the discrete-time PID controller are compatible with the parameters of the continuous one. Therefore, the poleplacement method performed in the continuous time domain can be applied to design the controller parameters. We will also implement some of the most common auxiliary functionalities of the PID controller.

PID controller uses 3 distinctive parts - proportional (P), integral (I) and derivative (D) - and the corresponding gain coefficients, respectively. This controller is defined such as [1]:

$$u(t) = Pe(t) + I \int_0^t e(\tau) d\tau + D \frac{de(t)}{dt} = Pu_P(t) + Iu_I(t) + Du_D(t) \quad (15)$$

where P, I, D are the individual gain coefficients for the proportional, integral and derivative terms, $e(t)$ is the error and terms $u_P(t)$, $u_I(t)$, $u_D(t)$ represent the individual outputs of each term.

3.1 Saturation

In most practical applications of automatic control, an actuator has some construction or physical limits, hence the output of the controller is bounded to some interval. Therefore, it is necessary to implement a saturation in the considered PID controller.

The saturation of the controller output is defined as

$$u = \begin{cases} u_{max} & u > u_{max} \\ u_{min} & u < u_{min} \\ u & u_{min} \leq u \leq u_{max} \end{cases} \quad (16)$$

Usage of this tool, however, complicates simulating the control loop f.e. in the example of *windup effect*

3.2 Difference equation of PID controller

Here we discuss the difference equations of various forms of PID controllers. This will allow us to directly implement the PID

controller algorithm in the form of source code.

We will be combining (15) with the individual approximation methods described in section 2. By using the inverse Z-transform and some algebra operations, we get these difference equations.

3.2.1 FEM

$$u(k) = e(k)(P + \frac{D}{T_s}) + e(k-1)(-P + IT_s - \frac{2D}{T_s}) + e(k-2)(\frac{D}{T_s}) + u(k-1) \quad (17)$$

3.2.2 BEM

$$u(k) = e(k)(P + IT_s + \frac{D}{T_s}) + e(k-1)(-P - \frac{2D}{T_s}) + e(k-2)(\frac{D}{T_s}) + u(k-1) \quad (18)$$

3.2.3 TM

$$u(k) = e(k)(P + IT_s + \frac{2D}{T_s}) + e(k-1)(IT_s - \frac{4D}{T_s}) + e(k-2)(-P + IT_s + \frac{2D}{T_s}) + u(k-2) \quad (19)$$

4 System model

For testing purposes, we will implement a numerical model of simple 1st order system. This system will be defined by the transfer function

$$G_{SM}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (20)$$

where K is the static gain and T is the time constant.

For the purposes of implementation, we can therefore derive a discrete-time transfer function such as

$$G_{SM}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (21)$$

The equivalent difference equation for model (21) is

$$y(k) = b_1 u(k) - a_1 y(k-1) \quad (22)$$

Next, we will create an artificial system with specific parameters

$$G(s) = \frac{2}{3s + 1} \quad (23)$$

With the help of MATLAB's $c2z$ command, for sample period $T_s = 1$ s, we get the discrete-time equivalent

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0.5669}{z - 0.7165} = \frac{0.5669z^{-1}}{1 - 0.7165z^{-1}} \quad (24)$$

The difference equation will therefore have the form of

$$y(k) = 0.5669u(k-1) + 0.7165y(k-1) \quad (25)$$

Due to the problems with causality emerging from the sequential execution of the closed control loop, we will implement this equation as

$$y(k) = 0.5669u(k) + 0.7165y(k-1) \quad (26)$$

5 Implementation

Now we can finally approach the implementation. For this purpose, we will use the Arduino UNO board for its extensive capabilities in terms of input-output interfacing, functionality such as PWM output and ADC input, low cost and large community of support. The programming language of Arduino is based on C++, with some minor differences. The convention here is to split definitions of classes and its methods into a header file (.h) and the actual implementation in a C++ file (.cpp). We will focus only on the essential methods of calculation. Auxiliary methods such as getters, setters and constructors are up to the reader to set up.

5.1 Plant system model

For the system model described in section 4 we create a class 'Model'. We implement (26) as

```
double Model::update(double u) {
    y_last = y;
    y = b1*u + a1*y_last;
    return y;
}
```

This method takes u as an input, which represents the control action. Parameters $b1$ and $a1$ are the coefficients of system as described in (21) and variable y_{last} is the last remembered value of y , which is a private variable of this class.

5.2 PID Controller

For a better readability and future code maintenance we divide the implementation into a few classes. Class "Generic_PID" acts as a parent class - we implement the most general functionality here, with each other class defining its functionality in its own way.

Most crucial method of class "Generic_PID" is virtual method `update()`, which announces the obligation to the child classes to implement their own definition of the controller output calculation. Various versions of PID calculation, as described in section 2, are implemented in `update_FEM`, `update_BEM` and `update_TM`.

```
double Generic_PID::update_FEM(double e) {
    u = Kp*e + Kd*e + Kp*e_last +
        Ki*Ts*e_last + Kd*e_last - u_last;
    return returnU(u);
}
double Generic_PID::update_BEM(double e) {
    u = e*(Kp + Ki*Ts + Kd/Ts) +
        e_last*(-Kp - 2*Kd/Ts) +
        e_last2*Kd/Ts + u_last;
    return returnU(u);
}
double Generic_PID::update_TM(double e) {
    u = e*(Kp+Ki*Ts/2+2*Kd/Ts) +
        e_last*(Ki*Ts - 4*Kd/Ts) +
```

```

        e_last2*(-Kp+Ki*Ts/2+2*Kd/Ts) +
        u_last2;
    return returnU(u);
}

```

Variables K_p, K_i, K_d correspond to the PID gain coefficients P, I, D respectively. Variables e_{last}, e_{last2} are values of e in previous iterations (up to 2 past cycles), which acts as an input to these methods. Same with u_{last} and u_{last2} being a value of u in previous iterations. Finally, T_s is the sampling period.

The value being returned is then processed by method `returnU()`, which takes into account the saturation. If we wish to include a saturation limit, we can do so using `setSat`. Variables `u_sat_min` and `u_sat_max` act as private class variables.

```

void Generic_PID::setSat(double max,
double min) {
    saturation = true;
    u_sat_min = min;
    u_sat_max = max;
}
double Generic_PID::returnU(double u)
const {
    if (saturation) {
        if (u > u_sat_max) {
            return u_sat_max;
        } else if (u < u_sat_min) {
            return u_sat_min;
        } else {
            return u;
        }
    }
    return u;
}

```

For clarification, here is 'Generic_PID.h' (we have included (de)constructors for convenience)

```

<Generic\_PID.h>

protected:
    double Kp, Ki, Kd, Ts;
    double u, u_last, u_last2;
    double e_last, e_last2;
    bool saturation;
    double u_sat_max, u_sat_min;

    Generic_PID(double P, double I,
                double D, double T);
    Generic_PID();

    double returnU(double u) const;

public:
    virtual ~Generic_PID();

```

```

virtual double update(double e) = 0;

double update_DOBD(double e);
double update_SOBD(double e);
double update_LICHO(double e);

```

5.2.1 Example code

Here is an example code, using 'PID_BEM' class in C++

```

<PID_BEM.h>
#include "Generic_PID.h"

class PID_BEM : public Generic_PID {
public:
    PID_BEM(double P, double I, double D,
            double T);
    PID_BEM();
    ~PID_BEM() override;

    double update(double e) override;
};

```

Implementation of methods in .cpp file is as follows

```

<PID_BEM.cpp>
#include "PID_BEM.h"

PID_BEM::PID_BEM(double P, double I,
                double D, double T) : Generic_PID(P,
            I, D, T) {
}
PID_BEM::PID_BEM() : Generic_PID() {
}
PID_BEM::~~PID_BEM() = default;

double PID_BEM::update(double e) {
    u_last2 = u_last;
    u_last = u;
    u = update_BEM(e);
    e_last2 = e_last;
    e_last = e;

    return u;
}

```

Finally, our main class in which we would run our control loop

```

<PID_RUN.cpp>
#include "Model.h"
#include "PID_BEM.h"

int main() {
    PID_BEM Pid(0.2,0.2,0.1,1); // random
        PID parameters

    std::chrono::milliseconds Ts =
        std::chrono::milliseconds(1000);
}

```

```

double w = 1;
double e;
double u = 0;
double y = 0; // causality issue
    solution
int i = 0; // simulation time

Model Model(0.566937378852422,
            -0.716531310573789, 0);

printf("---Running PID
simulation---\n");

while (i <= 20) {
    y = Model.update(u);
    e = w - y;
    u = Pid.update(e);

    printf("model>> i: %d, y: %f, u:
%f, w: %f, e: %f\n", i, y, u,
w, e);

    std::this_thread::sleep_for(Ts);
    i++;
}

printf("---Simulation ended---\n");

return 0;
}
    
```

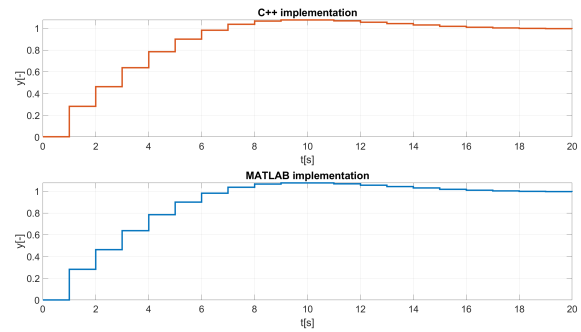


Figure 3: C++ and Simulink implementation comparison on a discrete system model

6 Testing

6.1 Plant model

First, we will use the following Simulink block diagram to simulate the PID control considering system (24).

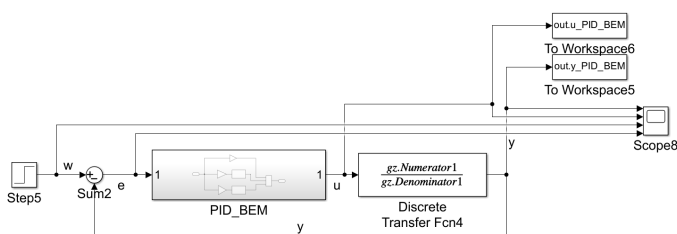


Figure 2: Reference Simulink scheme of PID control

Comparison between Figure 2 and C++ code implementing BEM-type PID controller with the same parameters yields the result shown in Figure 3.

We can see that the output responses generated by two compared techniques are identical and our implementation therefore works in a compliance with the expected result. We can now apply our solution to the real system.

6.2 Thermal system

Next, we will apply our implemented PID controller code within a real-world application for testing purposes.

The plant system for this testing is a temperature control system, consisting of Arduino UNO as a controller device, resistor to generate heat, thermistor to sense the temperature, driver chip and a voltage divider as shown in Figure 4. Simply put, we are adjusting the duty of the output PWM signal from the Arduino to the driver chip, which is powered by a 12V power supply unit. This way we are effectively adjusting the input power delivered to the heat-generating element (resistor). To measure the temperature, we use an NTC thermistor and a voltage divider with known parameters.

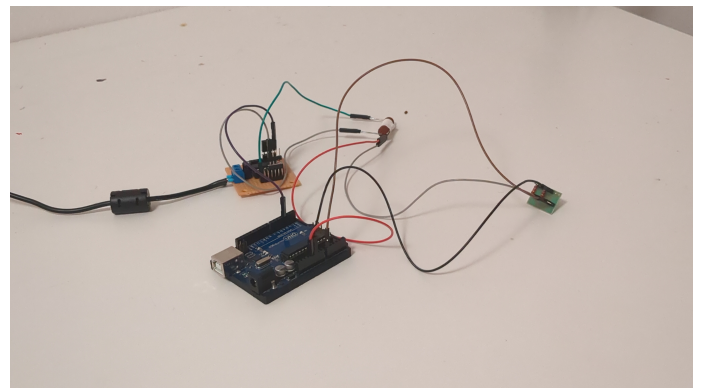


Figure 4: Thermal system

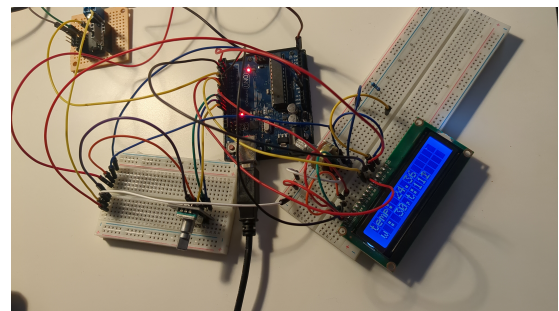


Figure 5: Thermal system with peripherals

Without going into too much detail about the system identification techniques, we have estimated the parameters of 1st order system in the following form

$$G_{TS}(s) = \frac{K}{Ts + 1} = \frac{696.7500}{208.5808s + 1} \quad (27)$$

Comparing model step response to real step response gives us Figure 6

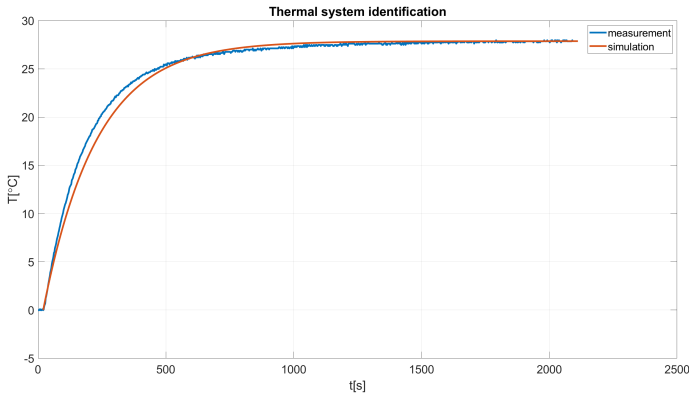


Figure 6: Thermal system model and measurement comparison of step response

6.2.1 PID controller design

For the PID controller design, we will use the Pole-Placement method. Transfer function of a closed-loop system considering IP controller and model (20) has this form [3]

$$G_{CL} = \frac{K(Ps+I)}{s^2 + s(\frac{1+KP}{T}) + \frac{KI}{T}} \quad (28)$$

Then, the desired transfer function gets

$$\frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (29)$$

where parameter ξ is the damping ratio and is ω_0 the natural system frequency.

Comparing (28) with (29), we can calculate PI parameters such as

$$P = \frac{2\xi\omega_0T - 1}{K} \quad (30)$$

$$I = \frac{\omega_0^2T}{K} \quad (31)$$

Using MATLAB simulations, we have tuned the optimal desing parameters such as

$$\xi = 2.2 \quad (32)$$

$$\omega_0 = 0.02 \quad (33)$$

therefore giving us parameters P, I such that

$$P = 0.0249 \quad (34)$$

$$I = 1.1975 \times 10^{-4} \quad (35)$$

6.2.2 Results

In figure 7 we compare results of thermal system control implemented on Arduino UNO with results of simulation. We

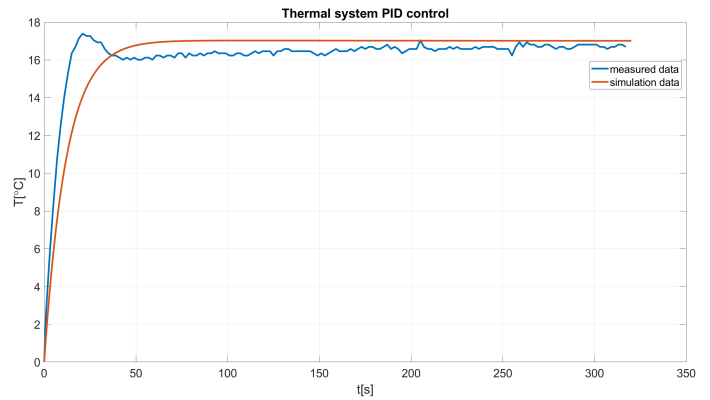


Figure 7: Thermal system measurement versus model with PID controller applied

can see that our system closely mimics the expected simulated output. Finally, we can add peripherals to Arduino UNO for set point control in real-time, as presented in figure 5

7 Conclusion

In conclusion, our methods of deriving various PID controller variants described in section 2 were correct. We have successfully applied theoretical knowledge, in the form of difference equations, into a C++ program. Our system performs as expected, within the range of error. We expected some error from thermal system identification as a result of approximation using just 1st degree system. With added peripherals, such as an LCD display and a rotary encoder, as displayed in figure 5, our device is capable of real-time PID control, with adjustable set point value.

Acknowledgement

I would like to extend my sincere thanks to my supervisor, Martin Dodek, for his invaluable guidance and support throughout this paper. His expertise has been essential in shaping this work.

References

- [1] J. Paulusová. Diskrétné riadenie spojitéch systémov (1. časť) Slovenská technická univerzita v Bratislave 2023
- [2] P. Horowitz, W. Hill. Art of electronics (Third Edition) Cambridge University Press 2015
- [3] S. W. Sung, J. Lee, I. Lee Process Identification and PID control IEEE PRESS 2009
- [4] A. Visioli Practical PID Control Springer 2006

Návrh a realizácia komunikačného protokolu pre virtuálnu robotickú arénu

Adrián Jakubčík¹, Juraj Slačka¹

¹ Ústav robotiky a kybernetiky, FEI STU v Bratislave

xjakubcik@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zaoberá problematikou návrhu a realizácie komunikačného protokolu pre simuláciu robotov vo virtuálnom prostredí v reálnom čase. Cieľom je vytvoriť protokol, ktorý bude plynulý, bezpečný a spoľahlivý. Práca sa zameriava na simuláciu robotických diferenciálnych podvozkov v 2D virtuálnej aréne. Protokol je navrhnutý s ohľadom na minimalizáciu latencie a zabezpečenie plynulého pohybu robotov v reálnom čase. Bezpečnosť komunikácie je zaistená šifrovaním a autentifikáciou klientov. Očakávané výsledky práce je funkčný prototyp komunikačného protokolu pre simuláciu robotov.

1 Úvod

Komunikácia v digitálnom svete znamená kontrolovaný tok dát z bodu A do bodu B, v ideálnom prípade. V dnešnom svete sa každodenne stretávame s nejakým tokom dát, či je to náš smartfón, inteligentné hodinky, bezdrôtové slúchadlá alebo počítač či roboty. Stretneme sa s tým naozaj všade, avšak nie je komunikácia ako komunikácia.

Ak chceme navrhnúť a zabezpečiť digitálnu komunikáciu medzi dvoma alebo viacerými digitálnymi bodmi, je nutné zväziť požiadavky takejto komunikácie a tomu prispôbiť prostriedky a technológiu, ktoré budú danú komunikáciu zabezpečovať.

Je rozdiel ak chceme načítať jednoduchú webovú stránku pozostávajúcu iba z jedného súboru (.html), ktorého obsah je prenesený za pomoci HTTP protokolu a keď chceme zabezpečiť komunikáciu medzi dvoma alebo viacerými AGV robotmi.

Potrebujeme rozlíšiť či sa jedná o komunikáciu v reálnom čase, ďalej o aký druh komunikácie sa jedná, či ide o jednosmernú alebo obojsmernú komunikáciu, aké dáta budeme prenášať atď. V neposlednom rade by bolo na mieste zväziť citlivosť komunikácie, či a do akej miery je treba šifrovať komunikáciu.

Nakoľko sa budeme zaoberať komunikáciou medzi virtuálnym prostredím (ďalej ako server) a robotickými diferenciálnymi podvozkami (ďalej ako klienti), budeme riešiť komunikáciu reálneho času s potrebou obojsmernej komunikácie, nakoľko server bude plniť zároveň aj úlohu centrálného uzla medzi klientami.

Nevyhnutnosťou bude šifrovaná komunikácia medzi jednotlivými klientami a serverom, spôsob unikátnej identifikácie jednotlivých klientov, riešenie synchronizácie dát

pre klientov na všeobecnej úrovni a taktiež na úrovni individuálnej.

Navrhované riešenie umožňuje simultánny pohyb robotickým diferenciálnym podvozkom v aréne na základe príkazov posielane na server a dát prijímaných zo serveru. Prepočty pozícií všetkých klientov a orientácie sa z dôvodu bezpečnosti odohrávajú na serveri čím vieme zaručiť synchronizáciu všetkých klientov. Pohyb robotov je riešený jednoduchou lineárnou matematikou. Na základe dát prijatých zo serveru je okrem iného možné graficky znázorniť polohu robota, riadiť robota a riešiť orientáciu v priestore pomocou umelej inteligencie (viď Obr. 1).

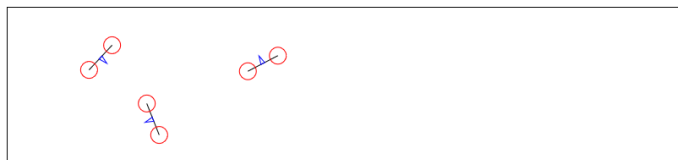
Virtual Robotic Arena

Connected to the server. Press W, A, S, D to move the car.
ID: 1h-45rX1i8UpIqdrAAAD
Token: eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJpZCI6IjFhLTQ1cS...

Client Data

Linear Velocity: 0 Angular Velocity: 0 Rotation (rad): 57/64 π Position: X: 171.606 Y: 132.421

Arena



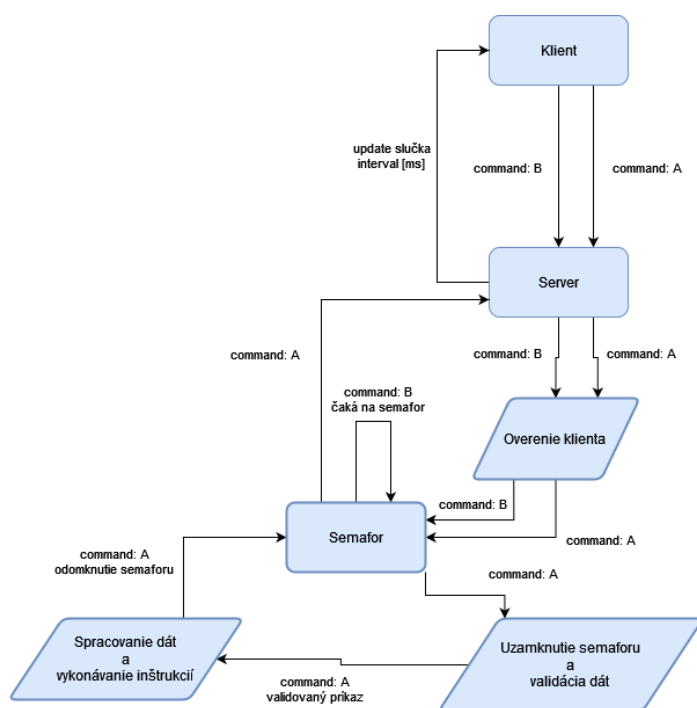
Obr. 1. Grafické znázornenie virtuálnej robotickej arény

Pri komunikácii s klientom si overíme autentickosť klienta pomocou unikátneho identifikátora a potrebné je myslieť aj na overenie prijatých dát od klienta. Nakoľko by sa mohlo stať, že by klient poslal neplatné dáta ktoré by mohli vážnym spôsobom narušiť priebeh simulácie a znehodnotiť tak jej výsledky.

Komunikačný protokol aplikačnej vrstvy Websockets použijeme ako základ pre naše riešenie, pretože nám umožní otvoriť obojsmernú udalostnú komunikáciu reálneho času, ktorá bude zabezpečená štandardným RSA asymetrickým šifrovaním za použitia TLS (Transport Layer Security) protokolu.

2 Komunikačný protokol

Na vytvorenie serveru som sa rozhodol využiť technológiu Node.js za použitia Express frameworku ktorý sa používa na vytvorenie HTTP serveru pre Node.js prostredie. Využitím javascriptu na vytvorenie jednoduchého konceptu arény sme si otvorili možnosť ľahkej komunikácie cez websockets, nakoľko aj náš klient využije javascript. Výhodou tohto postupu je, že podpora v akomkoľvek modernom webovom prehliadači, ktorý ma povolené spustiť javascript. Vďaka tomu bude stačiť spustiť iba server a klient sa napojí, za pomoci .html súboru ktorý v sebe načíta javascript pre klientov a práve ten nám pomôže nadviazať vitálny komunikačný kanál so serverom (viď Obr. 2).



Obr. 2. Grafické znázornenie protokolu ako flowchart

2.1 Socket.io

Socket.io je javascriptová knižnica prístupná verejnosti, ktorú je možné nainštalovať pomocou NPM (Node Package Manager) a využíva sa na socketovú komunikáciu cez internet. Socket.io implementuje 3 možnosti obojsmernej komunikácie. Najčastejšie sa využíva implementácia Websockets protokolu, avšak Socket.io, si do každého packetu pridáva vlastné metadáta ktorého ho diskvalifikujú v rámci kompatibility s natívnym Websockets protokolom. Viac o Socket.io nájdete tu [1].

Preto na komunikáciu pomocou knižnice Socket.io je nevyhnutné použiť túto knižnicu ako aj na serveri tak aj u klienta. Aby sme nadviazali bezpečný komunikačný kanál pre naše socketové spojenie, použijeme štandardný TLS protokol a sebou vygenerované certifikáty.

Prvé si potrebujeme vytvoriť HTTPS server pomocou ktorého sa vykoná handshake medzi klientom a serverom, predajú si šifrovacie kľúče. Následne si zadefinujeme na serveri, aby socketové spojenia použili šifrovacie nastavenia a nastavenia HTTP serveru pre socketové spojenie aby sa zabezpečila bezpečnosť komunikácie používane v socketovej

komunikácii a tiež plynulosť prechodu z jedného protokolu na druhý.

Počas handshaku je potrebné požiadať o zmenu komunikačného protokolu, klient uvedie požadovaný protokol do poľa „Upgrade“ v hlavičke packetu, čím si klient vypýta od serveru „upgrade“ pripojenia a server následne buď povolí takúto zmenu a vráti odpoveď „HTTP 101“ ktorá znamená, že sa mení protokol alebo z nejakého dôvodu môže takúto požiadavku zamietnuť, vrátiť odpoveď „HTTP 200“ a pokračuje sa v komunikácii cez HTTPS protokol. Bližšie informácie nájdete tu [2].

Po úspešnej zmene protokolu sa vytvorí komunikačný kanál cez Websockets, v prípade ak to podmienky dovoľujú Socket.io sa pokúsi zmeniť protokol na 3. možnú implementáciu komunikácie a to cez WebTransport čo je vlastne moderný update WebSockets protokolu ktorý beží na HTTP/3.0 Transport protokole ktorý využíva QUIC (Quick UDP Internet Connections) protokol. Viac o WebTransporte sa dočítate tu [3].

Hlavný rozdiel medzi Websockets a WebTransport je protokol transportnej vrstvy ktoré tieto technológie využívajú. Zatiaľ čo Websockets využívajú zaužívaný TCP (Transmission Control Protocol) ktorý okrem iného v čase písania tejto správy nepodporuje vstavaný multiplex. To značí, že nie je možné multiplexovať viacero tokov cez to isté pripojenie. Danú problematiku, za nás rieši knižnica Socket.io. WebTransport ako sme už spomenuli na transportnej vrstve využíva QUIC protokol, ktorý už v názve odkrýva skutočnosť, že funguje na UDP protokole, ktorý však rozširuje o viaceré možnosti a to napríklad aj multiplexovanie viacerých tokov cez to isté pripojenie, preto HTTP/3.0 protokol má vstavaný multiplex bez potreby knižnice 3. strany. Viac o TCP a UDP protokoloch si môžete prečítať tu [6].

Pri WebSockets protokole nemusíme kontrolovať validitu packetov nakoľko túto problematiku za nás rieši TCP protokol.

2.2 Server

Najprv musíme na serveri vytvoriť kanál cez ktorý budeme prijímať a spracovať žiadosť o pripojenie klientov, ktorým sú následne po pripojení na server pridelené identifikátory (id socketu) a tiež nové dáta (viď Kód 1), ktoré budú držať informácie (polohu, lineárnu rýchlosť, uhľovú rýchlosť, rotáciu) o danom klientovi (robotickom podvozku). Tieto údaje sú následne posielané všetkým klientom tak aby sa dali na klientskej časti spracovať a zobraziť.

```
io.on('connection', (socket) => {
    console.log(`User ${socket.id} connected`);
    // Trieda Client drží dáta a logiku robota
    clients.set(socket.id, new Client());
    // Mapa keys drží privátne kľúče klientov ktoré
    // sú použité na podpis tokenu
    keys.set(socket.id, generateKey(32));

    // Každému klientovi je pridelený semafor na
    // synchronizáciu
    locks.set(socket.id, new Lock());
    // Generovanie jedinečného tokenu na overenie
    // totožnosti klienta
```

```
const token = generateToken({ id: socket.id },
keys.get(socket.id));
}
```

Kód 1. Pridelovanie identifikátorov, semaforu a novej inštancie dát

Každému klientovi po pripojení musí byť vytvorený binárny semafor ktorý bude zabezpečovať synchronizáciu dát na individuálnej úrovni, privátny kľúč ktorým sa podpíše unikátny JWT (Json Web Token) token, potrebný na overenie totožnosti klienta. Vygenerovaný token klienta v sebe šifruje id socketu vytvoreného pre daného klienta a po vygenerovaní je tento token pomocou socketu zaslaný klientovi, ktorý sa ním musí preukázať pri každej interakcii so serverom z klientovej strany.

Server tiež zašle klientovi konfigurácie potrebné na synchronizáciu klientov so serverom a počiatočné dáta vo formáte vopred stanovenom, my sme zvolili posielať dáta vo formáte JSON (JavaScript Object Notion) kvôli jednoduchosti a kompatibilitate s JavaScriptom. V podstate prevedieme komplexnejšie dátové štruktúry do štandardnej textovej podoby.

2.3 Príkazy

Príkazy server vykonáva na požiadavku klienta, preto server asynchrónne (neblokuje vykonávanie ďalšieho kódu) počúva na sockete a čaká na udalosť „command“ ktorá už menom naznačuje, že server bude vykonávať nejaký príkaz. V jednoduchom virtuálnom prostredí aké máme my, predpokladáme, že udalosť „command“ obsahuje okrem overovacieho tokenu iba dáta „linearVelocity“ (lineárna rýchlosť) a „angularVelocity“ (uhl'ová rýchlosť), to sú všetky potrebné premenné ktoré server potrebuje na prepočítanie polohy klienta (viď Kód 2).

```
{
  token:
'eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJpZCI6Im1HbE1jeGR3NW12UWs5NHpBQUFCIIiwiaWF0IjoxNzEyMjQzNDMxZm9uLW8yIi1m9-Mp_KXGPiyRPuvGV56qBNCXP9rgs',
  command: { linearVelocity: 1, angularVelocity: 0 }
}
```

Kód 2. JSON štruktúra dát posielané klientom v udalosti „command“

Každý príkaz po prijatí od klienta, začne server spracovávať samostatne (asynchrónne). Najprv overíme totožnosť klienta vďaka tokenu, následne skontrolujeme semafor a počas vykonávania príkazu zamkneme semafor, skontrolujeme validitu dát, vykonáme príkaz, upravíme dáta a po vykonaní príkazu semafor odomkneme, aby sme neblokovali ďalšie príkazy od klienta.

Po úspešnom vykonaní príkazu, server drží nové dáta (lineárnu a uhl'ovú rýchlosť) trvale uložené, až do vykonania ďalšieho príkazu, ktoré by dané dáta zmenili alebo do odpojenia klienta zo serveru.

2.4 Synchronizácia

Ako sme už vyššie uviedli komunikácia pomocou Socket.io zabezpečí asynchrónny komunikačný kanál medzi klientom a serverom, neblokuje ďalšie vykonávanie inštrukcii.

Asynchrónne čakanie na udalosť prináša svoje výhody, avšak aj nevýhody. Skutočnosť, že kód nie je pozastavený počas spracovávania udalosti, otvára dvere problémom so synchronizáciou, hráči by mohli dostávať odlišné dáta alebo oneskorené dáta, na všeobecnej úrovni. Na individuálnej úrovni by mohlo dôjsť ku kuriozite kedy by sa snažili prístupit' k dátam dve asynchrónne vykonávané inštrukcie.

Preto je nutné zaviesť mechanizmus synchronizácie ktorý rieši nastolenú problematiku. Server obsahuje riešenie ako na všeobecnej úrovni tak aj na individuálnej.

Riešením pre synchronizáciu na všeobecnej úrovni sa stala nekonečná slučka ktorá beží iba ak počet klientov pripojených na server je väčší ako 0. V danej slučke sa vykonáva prepočet pozície všetkých pripojených klientov, následne sa všetkým klientom cez socket odošlú dáta naraz. Týmto spôsobom vieme zaručiť, že každý klient dostane rovnaké dáta v ten istý čas za ideálnych podmienok (ak zanedbáme vzdialenosť klienta od serveru a pripojenie klienta).

Na individuálnej úrovni je treba zaviesť trochu odlišnú synchronizáciu, pretože v tomto prípade ide o to, aby server nejakým spôsobom vedel asynchrónne udalosti zaradiť do poradovníka, ak sa nestíhajú vykonávať rýchlejšie ako prichádzajú ďalšie. Na vyriešenie takejto situácie server implementuje systém binárnych semaforov, každý klient má svoj vlastný semafor (viď Kód 1) ktorým sa riadi synchronizácia. Celý mechanizmus funguje nasledujúco, cez socket príde udalosť „command“ A, ktorá po overení a validácii uzamkne semafor predtým než začne pristupovať k dátam klienta. Následne príde cez socket udalosť „command“ B, ktorý po overení a validácii, pristúpi k semaforu overí či je odomknutý, ak nie je tak čaká nejaký časový interval a opäť vyskúša semafor. V momente ako udalosť A dokončí vykonávanie inštrukcii, odomkne semafor a tým skončí. Teraz udalosti B je umožnení prístup. Opäť udalosť B uzamkne semafor a začne vykonávať inštrukcie a nová udalosť C teraz čaká na semafore.

Takýmto spôsobom server dokáže efektívne zaručiť to, že k dátam klienta môže pristupovať simultánne iba jedna inštrukcia a nemôže nastať zmätok a dosiahnuť nechcenú funkcionálnosť.

3 Záver

Podarilo sa nám vytvoriť plne funkčné virtuálne prostredie pre simulovanie robotov, ktoré môžu byť ovládané umelou inteligenciou na základe nami navrhnutého komunikačného protokolu, ktorý zahŕňa vitálne funkcie a mechanizmy na efektívnu, bezpečnú a spoľahlivú komunikáciu medzi centrálnym uzlom a klientami, dosahujúc tak požadované komunikačne rozpätie potrebné na budúcu implementáciu spoločnej koordinácie.

Riešenie v ďalšom kroku predpokladá implementáciu, možnosti komunikácie medzi jednotlivými klientmi na priamo.

Literatúra

- [1] Team Socket.io, 2024, Dokumentácia Socket.io, dostupné na: <https://socket.io/docs/v4/>
- [2] Team Mozilla, 2024, Protocol upgrade mechanism – http, dostupné na: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Protocol_upgrade_mechanism
- [3] Team Mozilla, 2024, WebTransport API, dostupné na: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebTransport_API
- [4] ROHIT RAI, 2013. *Socket.io Real-time Web Application Development*. ISBN 9781782160793.
- [5] ANDREW LOMBARDI, 2015. *WebSocket: Lightweight Client-Server Communications*. ISBN 1449369278.
- [6] Leoš Boháč, Pavel Bezpalec, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *DÁTOVÉ SÍŤE. 2014*. ISBN 978-80-01-04694-4.