

Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti

Študentská vedecká a odborná činnosť
26. apríl 2023

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 978-80-227-5307-4

Obsah

Vyhodnotenie prehliadky prác ŠVOČ	7
1 Aplikovaná informatika	14
1.1 Implementing an SDR communications system: simulations and measurements Viktor Szitkey, Tomáš Páleník	15
1.2 New perturbation modifier of HFE scheme Sabina Daniela Pekareková, Viliam Hromada	21
1.3 Vývoj platformy pre snímanie a rekonštrukciu 3D objektov Radovan Bittner, Alexander Šatka	25
1.4 Možnosti sledovania pohybu tela vo VR Simona Richterová, Eugen Antal	32
1.5 Komunikácia vo virtuálnom prostredí Patrik Šebeš, Eugen Antal	38
1.6 Edukačná pomôcka pre výučbu vybraných klasických šifier Marek Klimo, Eugen Antal	43
2 Mechatronika, Robotika a kybernetika	49
2.1 Riadenie laboratórneho systému levitácie Richard Schwarz, Danica Rosinová	50
2.2 Riadenie rakety využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou Oliver Halaš, Ivan Sekaj	56
2.3 Arrhythmia detection from single-channel ECG using deep learning methods Martin Berki, Slavomír Kajan	62
2.4 Riadenie udalostného systému s využitím multiplatformovej mobilnej aplikácie Danijela Pavlovič, Erik Kučera	68
2.5 Edukačná aplikácia vo virtuálnej realite pre obsluhu pálenice Adam Móricz, Erik Kučera	74
2.6 Programatické generovanie 3D identifikátora pre systémy zmiešanej reality Martin Michalovič, Oto Haffner	80

3 Elektroenergetika	86
3.1 Modelovanie osvetlenia verejného parku a vplyv osvetlenia na jeho prostredie Damián Šeliga, Dionýz Gašparovský	87
3.2 Energetická chudoba na Slovensku Tomáš Farkaš, Matej Rolko, František Janíček	94
3.3 SWOT analýza vodíkového hospodárstva Dominik Oravec, Miroslava Farkas Smitková	100
3.4 Výpočet parametrov verejného osvetlenia na komunikáciách nepravidelného tvaru Gergely Fekete, Dionýz Gašparovský	106
3.5 Stanovenie hodnoty elektrotechnických a energetických zariadení Matej Rolko, František Janíček	110
3.6 Využitie biomasy v podmienkach Slovenska Natália Marko, Lucia Šišoláková, František Janíček	115
3.7 Analýza fotovoltickej elektrárne Dávid Takács, Milan Perný	121
4 Elektronika a fotonika	128
4.1 Návrh a realizácia hardvéru pre elektrickú charakterizáciu a testovanie integrovaných obvodov Emma Puváková, Peter Benko	129
4.2 Simulácie elektrických, tepelných a magnetických vlastností výkonového MOS tranzistora v technológiách povrchovej montáže na DPS a zabudovania do DPS Patrik Suhaj, Aleš Chvála	135
4.3 Progresívne senzory ohybu pripravené technológiou atramentovej tlače Ondrej Kokavec, Juraj Nevřela	141
4.4 Analýza porúch výkonového tranzistora na báze SiC Viktor Málík, Ľubica Stuchlíková, Matej Matuš	147
4.5 Skúmanie porúch vo výkonových diódach z karbidu kremíka Tomáš Táčik, Matej Matuš, Ľubica Stuchlíková	152
5 Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I	156
5.1 Šumy a ich prejav vo fotodetektoroch Kateryna Buzko, Pavol Valko	157
5.2 Pozorovanie Fresnelovej difrakcie svetla Filip Viest, Juraj Chlpík	162
5.3 Modeling Neutron Anisotropy in SCALE Matej Kleštinec, Jakub Lüley	166

5.4	Deterministické vyhodnotenie digitálnych snímkov pasívnych detektorov žiarenia Matúš Kornhauser, Štefan Čerba	170
5.5	Computational analysis of VR1 reactor Juraj Valluš, Jakub Lüley	174
6	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo II, Elektrotechnika	178
6.1	Vplyv umiestnenia výhrevného telesa na koeficient prestupu tepla Karolína Kovalčíková, Peter Bokes	179
6.2	Elektrónová hustota stavov v organických polovodičoch Natalia Kamila Calvo, Vojtech Nádaždy	183
6.3	Detekcia chybnéj antény v anténnom systéme pomocou merania fázy odrazenej vlny Michal Štibraný, René Hart'anský	187

Členovia programového a recenzného výboru

doc. Ing. Milan Vojvoda, PhD.
Mgr. Tomáš Fabšič, PhD.
Ing. Maroš Čavojský, PhD.
Ing. Vladislav Novák
doc. Ing. Ján Kardoš, PhD.
doc. Ing. Erik Kučera, PhD.
doc. Ing. Ladislav Körösi, PhD.
Ing. Mária Hypiúsová, PhD.
Ing. Jana Paulusová, PhD.
prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.
doc. Ing. Daniela Špírková, PhD.
Ing. Jozef Bendík, PhD.
doc. Mgr. Miroslava Farkas Smitková, PhD.
prof. Ing. Ľubica Stuchlíková, PhD.
Ing. Martin Florovič, PhD.
Ing. Peter Benko, PhD.
Ing. Juraj Nevřela, PhD.
Ing. Matej Matuš
doc. Ing. Gabriel Farkas PhD.
doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.
Ing. Katarína Sedláčková, PhD.
Ing. Patrik Novák, PhD.
prof. Ing. Peter Ballo, PhD.
Ing. Ján Halgoš, PhD.
Mgr. Martin Konôpka PhD.
Ing. Patrik Novák, PhD.

Vyhodnotenie prehliadky prác ŠVOČ

Úvod

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave sa dňa 26. apríla 2023 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 2023 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	7	7
2	Elektrotechnika	ÚE	1	1
3	Elektroenergetika	ÚEAE	7	8
4	Elektronika a fotonika	ÚEF	5	5
5	Informačné a komunikačné technológie	ÚMIKT	0	0
6	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo	ÚJFI	9	9
7	Mechatronika	ÚAMT	4	4
8	Robotika a kybernetika	ÚRK	3	3
			36	37

Prihlásené práce boli prezentované v troch sekciách nasledovne:

- Aplikovaná informatika: 7 príspevkov
- Mechatronika, Robotika a kybernetika: 7 príspevkov,
- Elektroenergetika: 7 príspevkov
- Elektronika a fotonika: 5 príspevkov
- Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I: 5 príspevkov
- Jadrové a fyzikálne inžinierstvo II, Elektrotechnika: 5 príspevkov

Po niekoľkých rokoch online formy konferencie, v dôsledku pandémie ochorenia COVID – 19, prebiehalo rokovanie ŠVOČ 2023 opäť prezenčnou formou. Príspevky v jednotlivých sekciách hodnotili najmenej trojčlenné komisie.

V každej sekcií boli najlepšie práce ocenené Cenou dekana FEI STU v Bratislave a ďalšie vynikajúce práce získali Diplom dekana FEI STU v Bratislave. Ceny odovzdal dekan FEI STU prof. Ing. Vladimír Kutíš, PhD. 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 tri najlepšie príspevky vypracované s využitím systému MATLAB a COMSOL Multiphysics. Autori víťazných prác získali voucher na online školenie podľa vlastného výberu a 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 stať 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 predseda Slovenskej svetelnotechnickej spoločnosti prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.

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. Radovan BITTNER	Vývoj platformy pre snímanie a rekonštrukciu 3D objektov	prof. Ing. Alexander Šatka, CSc.	Aplikovaná informatika
Bc. Oliver HALAŠ	Riadenie rakety využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou	prof. Ing. Ivan Sekaj, PhD.	Mechatronika, Robotika a kybernetika
Bc. Dávid TAKÁCS	Analýza fotovoltickej elektrárne	Ing. Milan Perný, PhD.	Elektroenergetika
Bc. Ondrej KOKAVEC	Progresívne senzory ohybu pripravené technológiou atramentovej tlače	Ing. Juraj Nevřela, PhD.	Elektronika a fotonika
Juraj VALLUŠ	Computational analysis of VRI reactor	Ing. Jakub Lüley, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I
Natalia Kamila CALVO	Elektrochemická impedančná spektroskopia s energetickým rozlíšením	Ing. Vojtech Nádaždy, CSc.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo II, Elektrotechnika

Diplom dekana FEI STU v Bratislave

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Sabina Daniela PEKAREKOVÁ	New perturbation modifier of HFE scheme	Ing. Viliam Hromada, PhD.	Aplikovaná informatika
Bc. Viktor SZITKEY	Implementing an SDR communications system: simulations and measurements	Ing. Tomáš Páleník, PhD.	Aplikovaná informatika
Bc. Martin BERKI	Arrhythmia detection from single-channel ECG using deep learning methods	Ing. Slavomír Kajan, PhD	Mechatronika, Robotika a kybernetika
Bc. Richard SCHWARZ	Riadenie laboratórneho systému levitácie	prof. Ing. Danica Rosinová, PhD.	Mechatronika, Robotika a kybernetika
Bc. Damián ŠELIGA	Modelovanie osvetlenia verejného parku a vplyv osvetlenia na jeho prostredie	prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.	Elektroenergetika
Matej ROLKO	Stanovenie hodnoty elektrotechnických a energetických zariadení	prof. Ing. František Janíček, PhD.	Elektroenergetika
Bc. Emma PUVÁKOVÁ	Návrh a realizácia hardvéru pre elektrickú charakterizáciu a testovanie integrovaných obvodov	Ing. Peter Benko, PhD.	Elektronika a fotonika
Kateryna BUZKO	Šumy a ich prejav vo fotodetektoroch	doc. RNDr. Pavol Valko, CSc.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I
Bc. Michal ŠTIBRANÝ	Detekcia chybných antén v anténnom systéme pomocou merania fázy odrazenej vlny	prof. Ing. René Hart'anský, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo II, Elektrotechnika

Cena Československej sekcie IEEE

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Radovan BITTNER	Vývoj platformy pre snímanie a rekonštrukciu 3D objektov	prof. Ing. Alexander Šatka, CSc.	Aplikovaná informatika
Bc. Adam MÓRICZ	Edukačná aplikácia vo virtuálnej realite pre obsluhu pálenice	doc. Ing. Erik Kučera, PhD.	Mechatronika, Robotika a kybernetika
Bc. Gergely FEKETE	Výpočet parametrov verejného osvetlenia na komunikáciách nepravidelného tvaru	prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.	Elektroenergetika
Bc. Viktor MÁLIK	Analýza porúch výkonového tranzistora na báze SiC	prof. Ing. Ľubica Stuchlíková, PhD., Ing. Matej Matuš	Elektronika a fotonika
Matúš KORNHAUSER	Deterministické vyhodnotenie digitálnych snímkov pasívnych detektorov žiarenia	Ing. Štefan Čerba, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I
Bc. Karolína KOVALČÍKOVÁ	Vplyv umiestnenia výhrevného telesa na koeficient prestupu tepla	doc. Ing. Peter Bokes, PhD.	Jadrové a fyzikálne inžinierstvo II, Elektrotechnika

Cena HUMUSOFTu

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Richard SCHWARZ	Riadenie laboratórneho systému levitácie	prof. Ing. Danica Rosinová, PhD.	Mechatronika, Robotika a kybernetika
Bc. Viktor SZITKEY	Implementing a SDR communication system: simulations and measurement	Ing. Tomáš Páleník, PhD.	Aplikovaná informatika
Patrik SUHAJ	Simulácie elektrických, tepelných a magnetických vlastností výkonového MOS tranzistora v technológiách povrchovej montáže na DPS a zabudovania do DPS	Ing. Aleš Chvála, PhD.	Elektronika a fotonika

Cena ZSVTS

Meno	Názov práce	Vedúci práce	Sekcia
Bc. Radovan BITTNER	Vývoj platformy pre snímanie a rekonštrukciu 3D objektov	prof. Ing. Alexander Šatka, CSc.	Aplikovaná informatika

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

Implementing a SDR communication system: simulations and measurement

Viktor Szitkey¹, Tomas Palenik¹

¹ Institute of Multimedia Information and Communication Technologies, FEI STU Bratislava

viktor.szitkey@ieee.org, tomas.palenik@ieee.org

Abstract – In this paper we provide selected insights documenting our efforts to implement a working digital communications system. First a simplified system model within the MATLAB platform, with error performance evaluated by means of Monte-Carlo simulation is presented. Second, a realistic Software-Defined Radio (SDR) implementation is described for the complementary platform GNU Radio using the Universal Software Radio Peripheral (USRP). Some parallels with the MATLAB platform extended by the USRP support package are described together with preliminary statistical results of actual over-the-air transmission measurements.

1 Introduction

Digital communication systems are essential in modern society, with applications ranging from wireless communication to satellite communication.

In this paper, we provide insights into the implementation of a working digital communication system using the MATLAB and GNU Radio platforms. The objective of this paper is to implement and simulate a communication chain for a quadrature phase shift keying (QPSK) [1] system, evaluate its error performance, and compare the results obtained from the two platforms.

Our study is divided into two parts: the first part involves the simulation of a QPSK system in MATLAB, while the second part involves the implementation of a realistic software-defined radio (SDR) system using GNU Radio and the Universal Software Radio Peripheral (USRP).

The simulation in MATLAB involves the use of an existing QPSK communication system as a starting point, with the addition of necessary components, such as pulse shaping and raised cosine filtering, to generate bit error rate (BER) curves. The GNU Radio implementation expands upon the MATLAB simulation, with emphasis on implementation of missing parts needed for correct capture of BER curves. Our study also includes the determination of the signal-to-noise ratio (SNR) value for QPSK and its corresponding value of AWGN signal value in both platforms. Our results demonstrate the feasibility of implementing a digital communication system using both platforms and provide insights into the similarities and differences between the two approaches.

2 Simulations

In both used environments some existing implementation of communication chains was used, as a starting point.

2.1 MATLAB simulation

In case of simulation of QPSK communication system in MATLAB, [2] was used. It included a simple signal space modulator, channel, and demodulator part of communication chain while using pulse shaping and raised cosine filtering, but it was designed for 16-QAM modulation and without proper BER curve calculation and presentation.

Therefore, missing parts, that are necessary for further work on and generation of BER curves were added, like multiple transmissions with different options (samples per symbol, ...), plotting of results with added theoretical BER curves for QPSK and DQPSK (Differential encoding QPSK) used for comparison.

2.1.1 Filter analysis

As was mentioned this QPSK communication implementation used two pulse shaping filters with root raised cosine filtering which are commonly used in digital communications to shape the transmitted signal to minimize inter-symbol interference (ISI) and spectral leakage.[3] Our task was to use different settings for designing these filters and observation of its effects on individual transmission, with emphasis on BER curves as well as later ability to recreate a similar filter in GNU Radio simulations/measurements. Example of using these designer tools [4][5] can be observed on Figure 2-1 and Figure 2-2 in MATLAB and GNU Radio respectively.

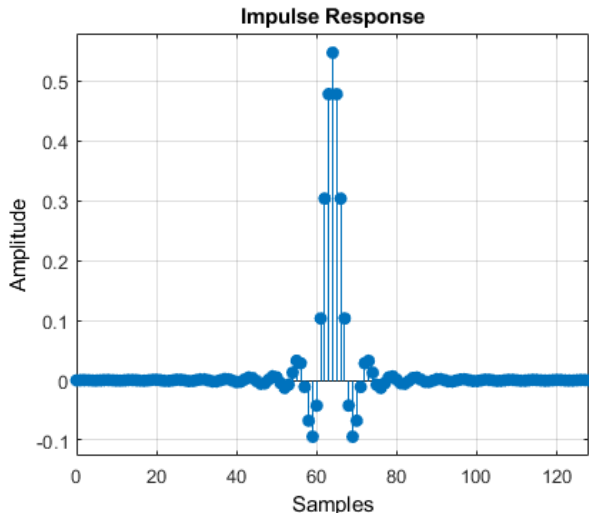


Figure 2-1 Impulse response of filter designed in MATLAB.

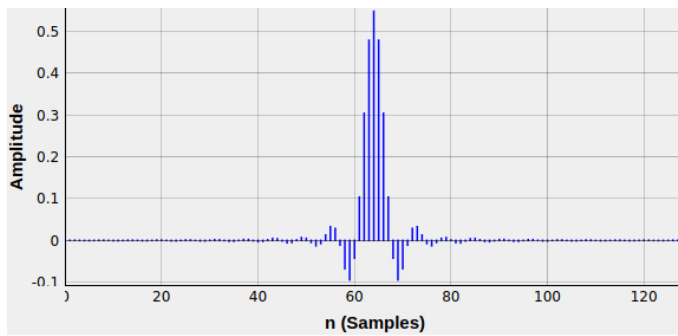


Figure 2-2 Impulse response of filter designed in GNU Radio.

With ability to design filters with specific parameters (that can be also mapped one to one in GNU Radio filter designer) following graph in Figure 2-3 shows BER curves generated by **biterr** function [6], while using different RRC filter parameters especially focusing on samples per symbol (sps). It can be observed that all correspond to the theoretical value of QPSK signal.[7]

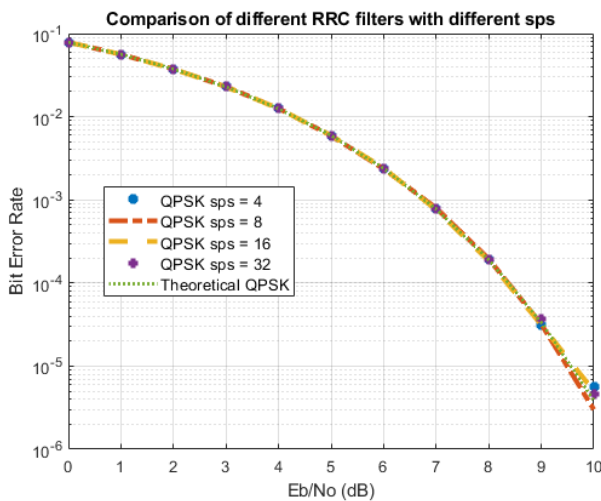


Figure 2-3 Comparison of BER curves generated with different RRC filter parameters.

2.1.2 AWGN function and Standard deviation calculation

One of the most important aspect, in the case of establishing one to one relationship between MATLAB and GNU Radio parameters, is determining Standard deviation value or sigma (in MATLAB) and its corresponding value of noise voltage (in GNU Radio).

To generate AWGN signal, MATLAB simulation used **awgn** function.[8] This function was debugged so that following equations were established and then also used with GNU Radio system.

Equation (1) describes calculation of signal to noise ratio value (SNR) in dB:

$$SNR = E_b N_o + 10 * \log_{10} k - 10 * \log_{10} sps \quad (1)$$

where k is number of bits per symbol, and sps is samples per symbol. With SNR value determined, standard deviation of AWGN signal can be calculated with equation (5):

$$S = \sum s^2 = 1 \quad (2)$$

$$SNR_{req} = 10^{\left(\frac{SNR}{10}\right)} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{S}{SNR_{req}} \quad (4)$$

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

where S represents the average power of a signal in dBW, s represent sample vector of signal, σ^2 is channel noise variance of a complex signal and σ_c is standard deviation of each component (Real, Imaginary).

The validity of these equations was tested in simulating BER curves with different approaches to AWGN signal value calculation as well as with different sps values. Result is shown in Figure 2-4, where it can be observed that all BER curves regardless of AWGN noise calculation approach correspond to the theoretical value of QPSK signal.

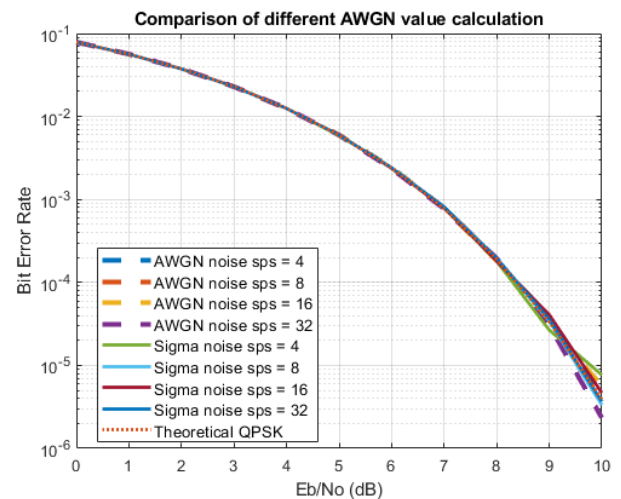


Figure 2-4 Comparison of BER curves generated with different approach for AWGN value calculation and with different sps.

With understanding of RRC filter design as well as having validated way of calculating AWGN signal value, next subchapter describes results of transforming and using this understanding in GNU Radio system.

2.2 GNU Radio simulations

Similarly, as with MATLAB simulation, this project used an already existing approach for simulating QPSK signal. Guide from [9] provides step by step tutorial for building communication chain for QPSK signal. As with MATLAB simulation no part of flowgraph provides a way to determine BER value of this simulation. Also missing documentation and descriptions can be noticed, for example how is delay, caused by RRC filters, determined/calculated.

These and other parts need to be implemented to get BER value of this simulation.

2.2.1 Delay value calculation

This simulation produces two data byte streams. First of the data stream is processed by the communication chain and is therefore affected by channel impairments. The second data stream is an original data stream unaffected by detrimental effects of communication chain blocks, and is used as a control, for calculating BER curves.

Like MATLAB simulation, this flowgraph also uses RRC filtering. This creates a complication, because data stream is delayed by certain value of samples behind control data stream. GNU Radio has a solution in Delay block, that can delay one stream of data to equalize with another stream as shown in Figure 2-5:

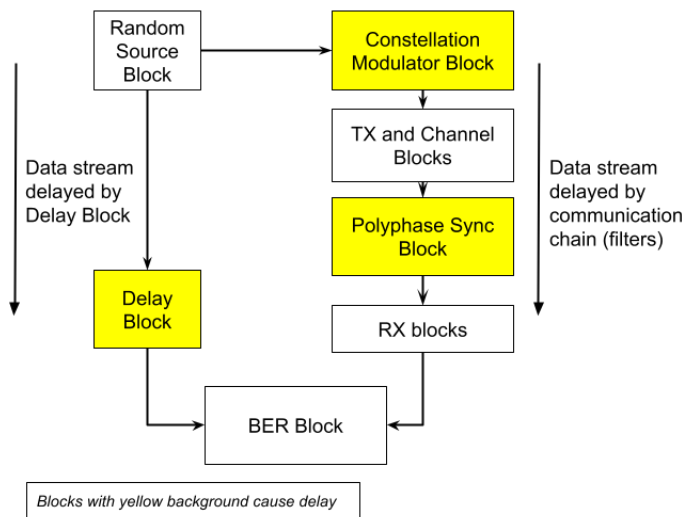


Figure 2-5 Diagram of blocks showing delay of data streams.

To find correct value for delay block, variables of filters causing delay, needed to determine and its relation to delay established.

One of the first findings was that delay caused by filter in modulation block can be bypassed completely if we activate transient mode of this block. Therefore, the only source of

delay that remains is in hierarchical block (contains multiple blocks) called Polyphase Sync block, that has important role in demodulation of received signal, but more importantly for delay, consist of RRC filter that causes delay.

After testing all the variables used in designing this filter, several showed an effect on delay. These were tested further until a clear relationship could be established between them and delay value. This relationship is described in equation (6):

$$D(sps) = \begin{cases} ntaps + 1, & sps < 4 \\ ntaps + 3, & sps \in \{4,5,6,7\} \\ ntaps + 5 - 2(sps \% 2), & sps > 7 \end{cases} \quad (6)$$

where D is required delay value, sps are samples per symbol, $ntaps$ are number of taps per filter, which refers to coefficients used in digital filter.

2.2.2 Results of GNU Radio simulations

At this point the value of delay for synchronization of data streams can be quickly found. Next task was to establish reliable method of comparing these streams. For this purpose, GNU Radio BER block could be used. In this case this approach will not work. Native BER block is expecting a stream of packaged bytes. Simulation on the other hand uses unpacked byte stream. This could be bypassed by packing this stream with corresponding block, but for this reason as well as others explain in chapter 3.2.1, usage of native BER block was omitted.

In the case of simulation, no BER block was needed, because a different approach was selected for generating BER curves. This approach was based on using python script that enables us to run several simulations at same time. This simulation saves its synchronized data streams into text files, which were then compared and value of BER curve was determined. These values are displayed in Figure 2-6:

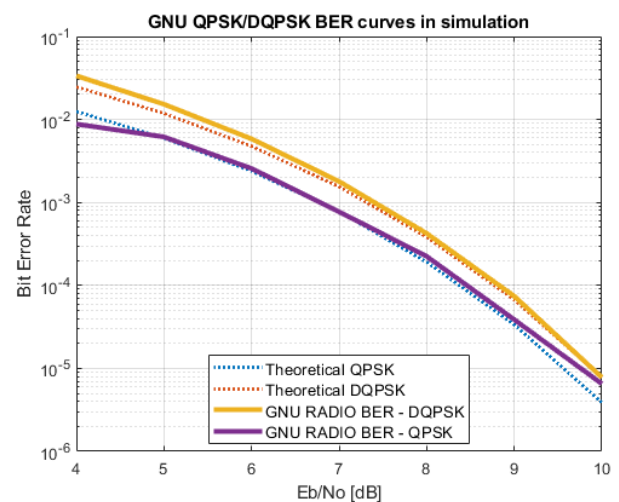


Figure 2-6 BER curves of QPSK and DPQKS obtained from GNU Radio simulation.

3 Measurements

The second part of this project is concerned with using the previously mentioned communications chains, but with real

channels. More specifically over-the-air channel. This is achieved while using Universal Software Radio Peripheral. USRP series N210 [10] and B210 [11] were used in this project.

3.1 MATLAB USRP support

Before describing work done with USRPs and GNU Radio, it is worth mentioning that MATLAB also supports usage of USRP with its communication toolbox, if special driver is installed.[12] This approach was tried while using Simulink spectral analyzer [13], in which source of signal can be picked from supported device. Spectrum of received signal can be then displayed on display unit block.

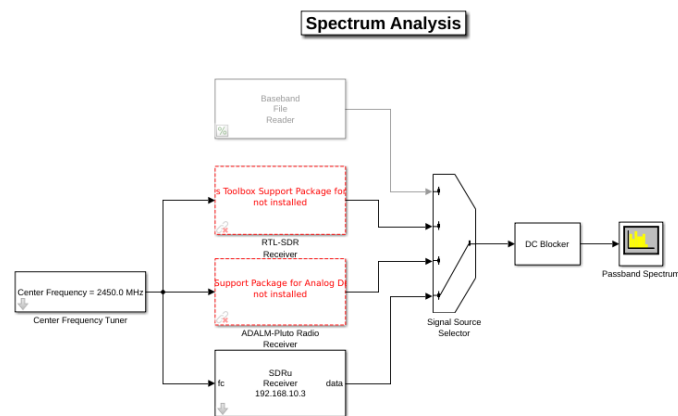


Figure 3-1 Example for MATLAB spectrum analysis Simulink schema

This MATLAB implementation enables us to capture QPSK signal transmitted from different computer shown in Figure 3-2.

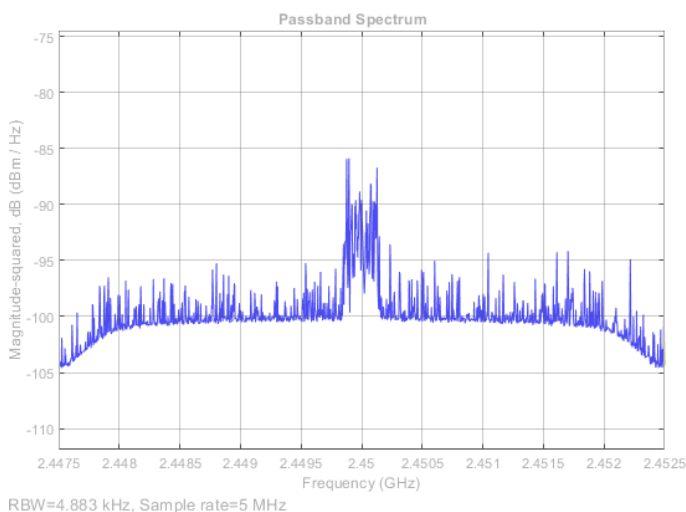


Figure 3-2 Capture of QPSK signal using MATLAB USRP support Simulink spectral analyzer.

Actual work with captured data with this approach and following processing with MATLAB is a subject of future work.

3.2 GNU Radio measurements

To be able to use flowgraph [9], for measurement purposes, this flowgraph needs to be split into three parts: transmitter, receiver, and one of the USRP will have role of jammer. This will enable us to capture transmitted data with different SNR, because level of AWGN signal will be controlled with computer with the role of a jammer. Additionally, TCP socket connection is utilized for supplying original data stream over the LAN connection. Diagram of original flowgraph as well as partitioned flowgraph is shown in Figure 3-3.

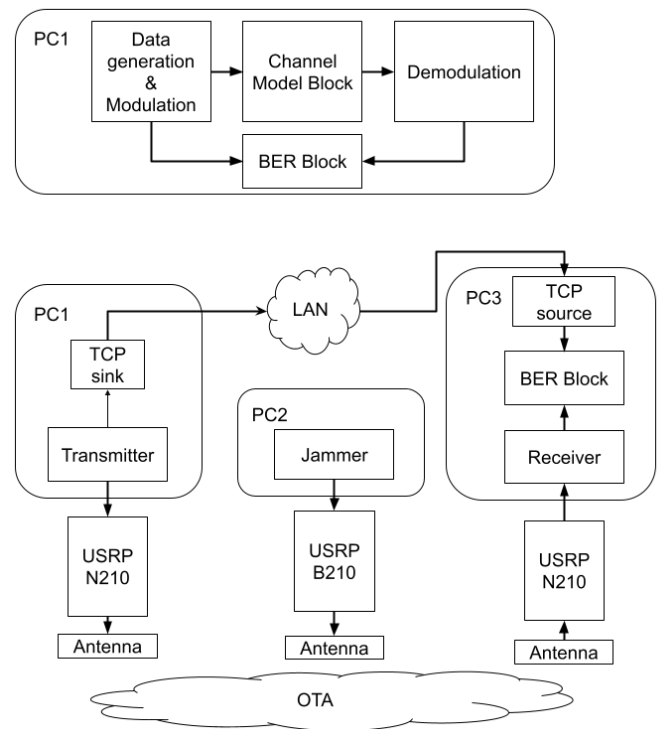


Figure 3-3 Diagram of flowgraph used for simulation and partitioned flowgraph used for measurement.

3.2.1 Jammer

In simulation jammer signal was generated using Channel Model block. In case of measurement, Noise Source block is used, which output is then sent to USRP block which gain can be dynamically controlled. Diagram of this flowgraph is shown on Figure 3-4.

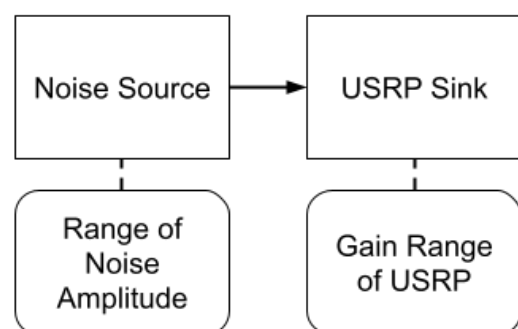


Figure 3-4 Diagram of jammer flowgraph.

An important parameter of any GNU Radio flowgraph is used sample rate. This value determines the resolution of the signal and the amount of information that can be transmitted. In other words, sample rate is proportional to the bandwidth of the transmitted signal, which is important while designing flowgraph used as a jammer of different signal. This value should be at least as high as sample rate of a signal that jammer is supposed to interfere with. Figure 3-5 shows effect on jammer signal captured on GNU Radio spectral analyzer flowgraph.

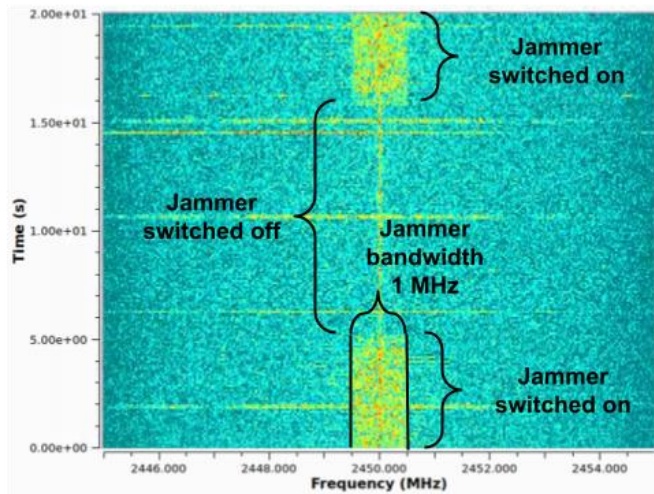


Figure 3-5 Spectral analyzer capture of jammer signal effect.

3.2.2 Custom BER block

As was mentioned in simulation chapter, native BER block was not used. Instead, custom block was written in python. GNU Radio enables this approach with Python block, that can be edited to act with desired functionality.

For purposes of measurement, custom block needed to work with unpacked bits, show counted errors and bits, not just BER value, for debugging purposes. Additionally, functionality of switching the processing of the block on/off was added as well as resetting all processed value to 0, as a preparation for measurement for different value of SNR, without the need to restarting entire flowgraph.

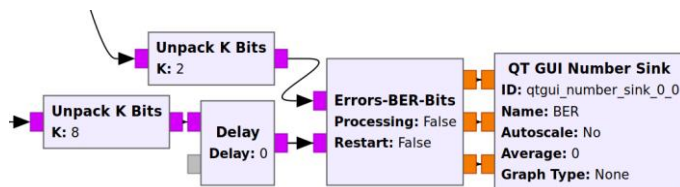


Figure 3-6 Flowgraph snippet of receiver, showing custom BER block.

3.2.3 Result of measurement

After above mentioned preparation measurement for acquiring BER curve for DQPSK signal could take place. All

measurements were performed in the ISM 2,4 GHz band. Figure 3-7 shows placement of all 3 components as well as a mention of used antennas.

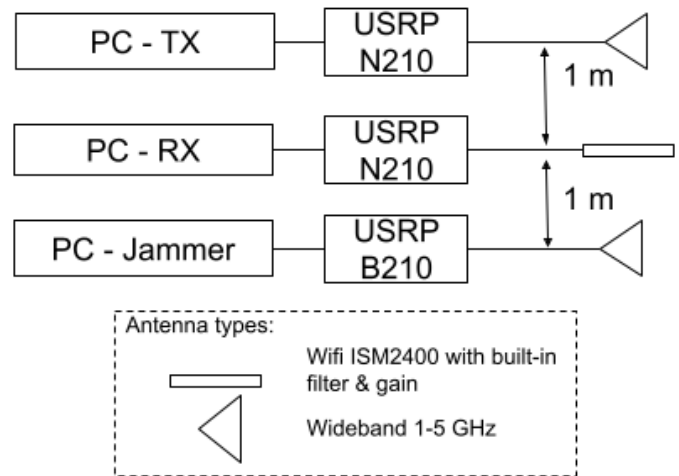


Figure 3-7 General position of PCs and used antennas.

To measure the value of SNR of received signal, MPSK SNR estimator block [14] was used. Captured values were then converted with (1) to obtain E_b/N_0 values. As can be seen, on Figure 3-8 resulting BER curve is almost identical to the theoretical values of DQPSK signal.

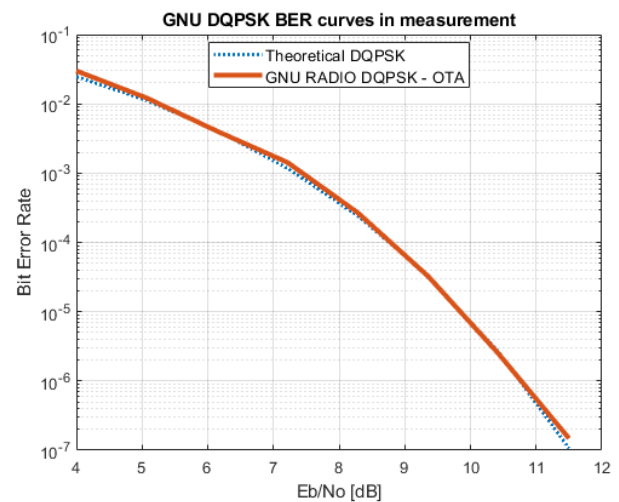


Figure 3-8 BER curve of DQPSK signal obtained with OTA measurement.

4 Conclusion

In conclusion, we have presented our experiences in implementing a digital communication system using the MATLAB and GNU Radio platforms. We began by using an existing simulation for QPSK communication in MATLAB, and then extended it by adding missing parts necessary for further work and generation of BER curves. We then analyzed the pulse shaping filters with root raised cosine filtering and used different settings for designing these filters to observe

their effects on individual transmission. We also determined the standard deviation value for generating AWGN signal in the MATLAB simulation, which was validated by simulating BER curves with different approaches. Finally, we transformed our understanding of RRC filter design and AWGN signal value calculation into the GNU Radio system, where simulations and measurements were performed and BER curves of QPSK signal acquired.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the Contract no. APVV-19-0436 and by the Tatra bank foundation project: SDRLab 2.0 – technologies of 5G networks and IoT in classroom.

References

- [1] All About Circuits. (n.d.). Digital Phase Modulation: BPSK, QPSK, DQPSK. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/radio-frequency-modulation/digital-phase-modulation-bpsk-qpsk-dqpsk/>
- [2] MathWorks. (n.d.). Examine 16-QAM Using MATLAB. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/help/comm/gs/examine-16-qam-using-matlab.html>
- [3] Gentile, K. (2007). Digital Pulse Shaping Filter Basics. Semantic Scholar. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.semanticscholar.org/paper/Digital-Pulse-Shaping-Filter-Basics-Gentile/ef808af121a34ae35aa602b8155c443805b0f02f#extracted>
- [4] MathWorks. (n.d.). Introduction to Filter Designer. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/introduction-to-filter-designer.html>
- [5] GNU Radio. (n.d.). Filters. Retrieved on April 18, 2023 from https://www.gnuradio.org/doc/doxygen/page_filter.html
- [6] MathWorks. (n.d.). Bit-Error-Rate Analysis Techniques. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/bit-error-rate-analysis-techniques.html>
- [7] MathWorks. (n.d.). berawgn. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/berawgn.html>
- [8] MathWorks. (n.d.). awgn. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/awgn.html>
- [9] GNU Radio. (n.d.). Guided Tutorial: PSK Demodulation. Retrieved on April 18, 2023 from https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_PS_K_Demodulation
- [10] Ettus Research. (n.d.). USRP Networked Series Starter Kit. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.ettus.com/all-products/UN210-KIT/>
- [11] Ettus Research. (n.d.). USRP B200/B210/B200mini/B205mini Starter Kit. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>
- [12] MathWorks. (n.d.). USRP Support from Communications Toolbox. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/hardware-support/usrp.html>
- [13] MathWorks. (n.d.). Spectral Analysis of Signals in Simulink. Retrieved on April 18, 2023 from <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/spectral-analysis-of-signals-in-simulink.html>
- [14] GNU Radio. (n.d.). MPSK SNR Estimator. Retrieved on April 18, 2023 from https://wiki.gnuradio.org/index.php/MPSK_SNR_Estimator

New perturbation modifier of HFE scheme

Sabina Daniela Pekareková¹

¹Institute of Computer Science and Mathematics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovakia

xpekarekova@stuba.sk

Abstract: This paper analyzes the new perturbation modifier combined with HFE trapdoor called $HFE^{\hat{+}}$. The main goal of the work is to verify the computational complexity of the HFE signature scheme with and without the addition of this perturbation modifier. Also, we implemented and compared two versions of $HFE^{\hat{+}}$: perturbation modifier with inversion using exhaustive search and perturbation modifier with inversion using projection. We compared the time the CPU spent on the public key generation, signature generation, and signature verification.

- isogeny-based key exchange schemes and
- multivariate cryptography.

This paper deals with the multivariate quadratic systems which are a subset of the last mentioned family. The aim of this paper was to implement a classic HFE scheme and a HFE scheme with a new perturbation modifier and to compare them in terms of computational complexity.

This paper is organized as follows. In Section 2 we describe the basic theory behind $HFE^{\hat{+}}$ perturbation modifier of the HFE scheme. This section also includes the basic HFE scheme, $HFE^{\hat{+}}$ perturbation modifier, perturbation $\hat{+}$, modifier $-$, inversion of modified HFE, inversion using exhaustive search, and inversion using projection. Section 3 is devoted to the evaluation of our results. Finally, in Section 4 we summarize the results.

1 Introduction

The arrival of a powerful quantum computer could potentially bring the risk of breaking the security of asymmetric cryptography. Most of the asymmetric cryptosystems used today are based on the problem of factorization or the discrete logarithm problem (e.g. RSA [7] or DSA [3]). Since this computer would work differently than a regular computer (with qubits instead of bits) the question is whether problems on which current asymmetric cryptosystems are built could not be solved on such a quantum computer faster than on a regular PC. In 1994 [8] Peter Shor proposed an algorithm (called Shor's algorithm), that can solve number theoretic problems such as the integer factorization problem and the discrete logarithm problem in polynomial time on a quantum computer. This means that the construction of a powerful quantum computer is a threat to currently used asymmetric encryption and further research in the field of post-quantum cryptography is needed. Postquantum-cryptography (PQC) is a term used for cryptographic algorithms that should be resistant to cryptanalytic attacks by a quantum computer in the post-quantum era. Since it's been shown that NP problems (such as factorization problem and the discrete logarithm) could be solved by a quantum computer in polynomial time, scientists are now focusing on NP-complete problems that are believed not to be solvable in polynomial time even with the power of quantum computers [1]. The main families of post-quantum cryptosystems according to the respective recommended mathematical problems on which they are based are:

- lattice-based cryptosystems
- code-based cryptosystems
- hash-based signatures

2 Preliminaries

2.1 HFE scheme

Hidden Fields Equations (HFE) is a public key cryptosystem proposed by Jacques Patarin [6] following the idea of the Matsumoto and Imai system [5]. It is a type of trapdoor that uses the theory of field extensions, which means that it uses a field F_q and one of its finite extensions F_{q^n} . Canonical bijection $\phi_n : F_{q^n} \rightarrow F_q^n$ says that every element from F_{q^n} can be mapped to some n -element vector over the field F_q . HFE trapdoor is not entered directly as a system of polynomials at the beginning but as a polynomial with one variable over the extension field. Equation (1) is a polynomial in HFE form for the extension field $GF(2^n)$.

$$P'(X) = \sum_{\substack{0 \leq i, j \leq d \\ 2^i + 2^j \leq d}} C_{i,j} X^{2^i + 2^j} + \sum_{\substack{0 \leq k \leq d \\ 2^k \leq d}} B_k X^{2^k} + A \quad (1)$$

Coefficients A, B, C, and the indeterminate X represent elements from the extension field $GF(2^n)$. The number d represents the degree of the polynomial $P'(X)$ and has a special property - it should not be very large. The terms of the polynomial are powers of X multiplied by some coefficient that represents an element from the field. It is important to notice that the powers of X are either powers of two (coefficient B_k) or the sum of 2 powers of two (coefficient $C_{i,j}$).

While the public key is a set of quadratic polynomials, which appears as random (its members consist of various combinations of indeterminates), the private key is a system of quadratic polynomials that has a specific structure (also called trapdoor) that makes the system of equations efficient to solve. To hide the structure of HFE trapdoor in public key P , $P'(X)$ is composed with two affine maps S and T . The public key P is then formed by the composition $P = S \circ P' \circ T$ and the private key of this scheme consists of 3 maps - S , T and P' . HFE scheme can be used as an encryption or it can be used as a digital signature scheme. In this paper, we are considering the implementation of the HFE signature scheme.

2.2 $HFE^{\hat{+}}$ perturbation modifier

In [4] Faugère et al. proposed a new perturbation modifier of HFE scheme. This scheme is called $HFE^{\hat{+}}$ since there are two more parameters improving the scheme. There is a parameter t , the dimension of the new perturbation called “Hat Plus” and a parameter a , the “Minus” modifier.

2.2.1 Perturbation $\hat{+}$

Let's have a HFE polynomial $H(x)$ (1) over extension field F_{q^n} . First, the parameter $t \in N$ is chosen. Next t random quadratic polynomials $p_1, \dots, p_t$ over the base field F_q in all indeterminates are generated. Then all polynomials p_i are mapped to p'_i , which are equivalent polynomials over the extension field F_{q^n} . Next t randomly chosen elements from F_{q^n} are selected as $\beta_1, \dots, \beta_t$. The polynomial $Q(x) = \sum_{i=1}^t \beta_i p'_i(x)$ is obtained with a linear combination of polynomials, where coefficients of the linear combination are $\beta_1, \dots, \beta_t$ selected in the previous step. The resulting central map (trapdoor) in the modified HFE will be created as $F(x) = H(x) + Q(x)$.

2.2.2 Modifier -

Two additional linear secret mapping S and T are selected at random, where $S : F_q^n \rightarrow F_q^{n-a}$ and $T : F_q^n \rightarrow F_q^n$. By mapping this $F(x)$ polynomial to an equivalent system of polynomials over a base field F_q we would get P' , and by applying affine transformations S and T to it, we would get the corresponding public key. Since the parameters q, n, d, t and a are public, the secret key lies in the description of affine transformations S and T and the structure of polynomials H and Q .

2.3 Inversion of modified HFE

Since the degree of polynomial $F(x)$, that arose from the HFE polynomial $H(x)$ by perturbation, could be huge, the classic method of HFE inversion by factorization of a polynomial via Berlekamp's algorithm [2] would have too much complexity. In the original article [4] the authors, therefore, proposed 2 ways, how to invert the perturbed HFE.

2.3.1 Inversion using exhaustive search

First method proposed in the article to solve $F(x) = y$ suggests to solve the q^t number of equations $H(x) = y - \sum_{i=1}^t r_i \beta_i$, $r_i \in F_q$

and to keep the solutions satisfying $p'_i(x) = r_i$. Since the degree is bounded by constant d and therefore it is not too big, this can be solved using Berlekamp algorithm.

2.3.2 Inversion using projection

The second method lies in the application of the operator of projection. The central map of HFE is formed by the sum of the HFE polynomial $H(x)$ and polynomial $Q(x)$ that represents linear combination $Q(x) = \sum_{i=1}^t \beta_i p'_i(x)$. The definition of projection says that it is a linear transformation P on some vector space, where $P \circ P = P$. This means that we can apply such projection multiple times and get the same result as if we have applied it just once, $P^2 = P$. This is a property used to eliminate Q . We are looking for such a projection Π_t , where a property that $\Pi_t(F(x)) = \Pi_t(H(x)) = \Pi_t(y)$ applies. Since $\Pi_t(F(x)) = \Pi_t(H(x))$ and $F(x) = H(x) + Q(x)$ and the operator of projection is linear operator, this means that $\Pi(Q(x)) = 0$. Projection $\Pi(x)$ is then such a projection, where all values obtained by a polynomial $Q(x)$ are projected on 0.

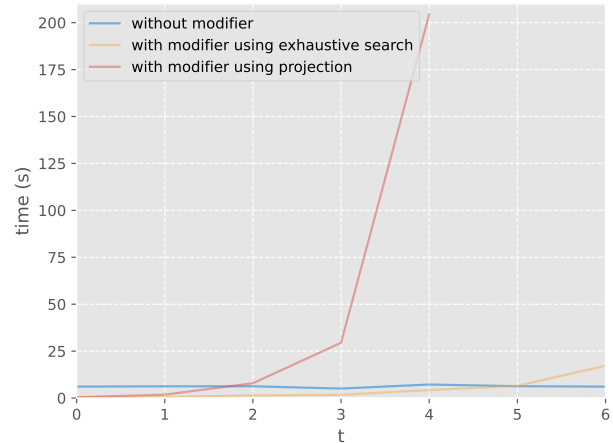


Figure 1: Representation of time CPU spent on the valid signature generation of HFE schemes with and without perturbation modifier.

3 Results

We have implemented HFE with and without perturbation modifier in C++ using NTL¹ library. In the case of HFE with a perturbation modifier, both inversion methods mentioned above were implemented. The final solution was built in release mode using the highest level of compiler optimizations. Our implementation can be found at repository². All the tests have been run on the machine with 8-core AMD Ryzen 9 5900HS, 16 GB of RAM, and a Windows operating system. In [4] authors proposed the optimal parameters for a 128bits security to be: $q = 2$, $n = 263$, $r = 7(d = 65)$, $t = 6$, $a = 7$. Our aim was to

¹<https://libntl.org/>

²<https://github.com/wasabi2199/PerturbationModifierHFE>

	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$
Generate public key	6.101 ± 0.124	6.245 ± 0.150	6.277 ± 0.178	5.058 ± 0.093	7.215 ± 2.054	6.319 ± 0.188	6.084 ± 0.555
Generate signature	0.390 ± 0.217	0.417 ± 0.262	0.402 ± 0.261	0.305 ± 0.208	0.439 ± 0.285	0.380 ± 0.200	0.362 ± 0.221
Attempts	1.640 ± 0.893	1.720 ± 1.064	1.680 ± 1.110	1.580 ± 1.093	1.560 ± 0.820	1.580 ± 0.854	1.560 ± 0.946
Verify signature	0.006 ± 0.007	0.006 ± 0.007	0.005 ± 0.007	0.005 ± 0.007	0.007 ± 0.007	0.005 ± 0.007	0.006 ± 0.007

Table 1: Average values from 100 test runs (together with standard deviation) for HFE without perturbation modifier. Values are depicted in seconds (except Attempts, which represents the number of attempts for valid signature generation).

	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$
Generate public key	6.130 ± 0.129	6.293 ± 0.133	6.326 ± 0.173	5.078 ± 0.083	7.286 ± 2.070	6.388 ± 0.192	6.155 ± 0.555
Perturbation with inversion using exhaustive search							
Generate signature	0.378 ± 0.257	0.573 ± 0.416	1.411 ± 1.264	1.738 ± 1.710	4.267 ± 3.994	6.514 ± 6.535	17.190 ± 15.557
Attempts	1.610 ± 1.090	1.510 ± 0.810	1.920 ± 1.330	1.630 ± 1.050	1.490 ± 0.731	1.410 ± 0.766	1.770 ± 1.135
Verify signature	0.008 ± 0.007	0.006 ± 0.007	0.006 ± 0.007	0.005 ± 0.007	0.006 ± 0.007	0.005 ± 0.007	0.006 ± 0.007
Perturbation with inversion using projection							
Generate signature	0.429 ± 0.254	1.825 ± 1.023	7.894 ± 4.745	29.444 ± 16.472	204.389 ± 142.071	*	*
Attempts	1.740 ± 1.050	1.610 ± 0.908	1.520 ± 0.915	1.610 ± 0.897	1.700 ± 1.184	*	*
Verify signature	0.006 ± 0.007	0.007 ± 0.007	0.007 ± 0.007	0.004 ± 0.007	0.008 ± 0.007	*	*

Table 2: Average values from 100 test runs (together with standard deviation) for HFE with perturbation modifier using both inversion methods (inversion using exhaustive search and inversion using projection). Values are depicted in seconds (except Attempts, which represents the number of attempts for valid signature generation). * represents tests omitted because of computational complexity

compare a classic HFE scheme and a HFE scheme with a new perturbation modifier in terms of computational complexity. We have measured CPU time for the following processes:

- public key generation
- signature generation
- signature verification

and number of iterations for:

- attempts of creating a valid signature.

We used the recommended parameters for q, n, d, t and a from [4], but we set the values from 0 to 6 to the parameter t . This means that we changed the parameter t , which sets the number of generated polynomials of t indeterminates in the system of perturbation polynomials. All the results for HFE without modifier can be seen in Table 1 and results for $HFE^{\pm-}$ using both mentioned inversions can be found in Table 2. The performed tests show that as t increases, so does the time it takes to generate valid signatures for HFE signature scheme with $HFE^{\pm-}$ perturbation modifier. As we can see in the table 2, for the parameter $t = 4$, the average time to generate a valid signature for $HFE^{\pm-}$ using inversion with projection was equal to 204.389 seconds. This shows that such a signature generation would not be usable in real-world, since it takes too much time. Therefore we have decided not to test $HFE^{\pm-}$ using inversion with projection for $t = 5$ and $t = 6$. The difference in the increase of time it takes to generate a valid signature for 3 tested versions of HFE (HFE without a modifier, $HFE^{\pm-}$ using inversion with exhaustive search and $HFE^{\pm-}$ using inversion with projection) can be seen in Figure 1.

Because during the generation of signature, a situation could arise when the system of polynomials did not have a solution, it was necessary to re-generate randomly chosen values from F_q according to parameter a , the average number of iterations that it took to get a valid signature is also included in the table.

4 Conclusion

In this work, we focused on measuring the time complexity of a new perturbation modifier presented in [4]. We have compared the time complexity of a classic HFE scheme and $HFE^{\pm-}$ scheme with modifications, while we also compared two methods of inversion used to obtain $HFE^{\pm-}$. Our aim was to test how would adding this new perturbation modifier affect the time complexity of public key generation, valid signature generation and signature verification. According to our findings, the implementation of $HFE^{\pm-}$ with inversion using projection has such an increase in time complexity, that it would not be realistically deployable in the real-world, since the signature generation could take in the worst case scenario over 346 seconds just for parameter $t = 4$.

Acknowledgment

We would like to thank Viliam Hromada for his helpful suggestions and discussion related to this paper.

References

- [1] Scott Aaronson. The limits of quantum. *Scientific American*, 298(3):62–69, 2008.
- [2] Elwyn R Berlekamp. Factoring polynomials over large finite fields. *Mathematics of computation*, 24(111):713–735, 1970.
- [3] Schneier Bruce. Applied cryptography: Protocols, algorithms, and source code in c.-2nd, 1996.
- [4] Jean-Charles Faugère, Jacques Patarin, Ludovic Perret, et al. A new perturbation for multivariate public key schemes such as hfe and uov. *Cryptology ePrint Archive*, 2022.
- [5] Kohji Matsumoto. Value-distribution of zeta-functions. In *Analytic Number Theory: Proceedings of the Japanese-French Symposium held in Tokyo, Japan, October 10–13, 1988*, pages 178–187. Springer, 1990.
- [6] Jacques Patarin. Hidden fields equations (hfe) and isomorphisms of polynomials (ip): Two new families of asymmetric algorithms. In *Advances in Cryptology—EUROCRYPT’96: International Conference on the Theory and Application of Cryptographic Techniques Saragossa, Spain, May 12–16, 1996 Proceedings 15*, pages 33–48. Springer, 1996.
- [7] Ronald L Rivest, Adi Shamir, and Leonard Adleman. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2):120–126, 1978.
- [8] Peter W Shor. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM review*, 41(2):303–332, 1999.

Vývoj platformy pre snímanie a rekonštrukciu 3D objektov

Radovan Bittner, Alexander Šatka

¹Ústav elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave

xbittner@stuba.sk

Táto práca je zameraná na rekonštrukciu 3D objektov zo série dvojrozmerných obrazových máp snímaných objektov a tvorbu modelov 3D objektov. Dvojrozmerné obrazové mapy sú postupne snímané počas natáčania objektu voči kamere snímacím zariadením, ktoré sme pre tieto účely navrhli a vyvinuli v rámci tejto práce. Na automatizovanú detekciu a rekonštrukciu 3D objektov sme v jazyku C++ využitím knižnice *PCL* napísali a odladili softvérovú platformu, ktorá zahŕňa moduly pre snímanie, registráciu, segmentáciu a filtráciu nameraných dát. Platforma umožňuje pridávanie ďalších pluginov pre fúziu a segmentáciu skenovaných objektov. Využitím počítačovej simulácie sme zistili najvýznamnejšie zdroje chýb. Funkčnosť realizovaného systému sme overili meraním reálnych 3D objektov a 3D model nasnímaného objektu sme vytvorili 3D tlačou.

1 Úvod

Vytváranie modelov reálnych objektov využitím techník snímania dvojrozmerných máp objektov a 3D počítačovej rekonštrukcie nachádza široké využitie v automobilovom priemysle, architektúre, zdravotníctve, robotike a mnoho ďalších. 3D rekonštrukcia má významne miesto aj v oblasti počítačového videnia a strojového učenia, kde pomáha zlepšiť proces klasifikácie a rozpoznania objektov na základe ich tvaru, farby a ďalších vizuálnych vlastností.

S príchodom cenovo dostupných hĺbkových kamier vzniklo mnoho zaujímavých výskumov v oblasti snímania a vývoja rôznych algoritmov optimalizujúcich proces 3D rekonštrukcie. Príčinou je, že viaceré techniky sú výpočtovo náročné, alebo sú vhodné iba pre snímanie málo štrukturovaných objektov, prípadne okolité prostredie (osvetlenie, mechanické vibrácie...) spôsobujú nestabilné riešenie zaťažené veľkou chybou. Z tohto dôvodu je potrebné experimentálne overiť vlastnosti vybranej techniky snímania a vybraných algoritmov pre zvolený typ objektu vo vhodne simulovaných podmienkach. V súčasnosti sú v dispozícii platformy pre snímanie a rekonštrukciu 3D objektov, ktoré používajú dedikovaný softvérový systém. V rámci tejto práce bola vyvinutá experimentálna platforma využívajúca kameru s hĺbkovým rozlíšením na automatizovanú detekciu a rekonštrukciu modelov 3D objektov a ktorá využíva napísaný a odladený softvérový systém. Platforma bola vyvinutá s cieľom získať nové poznatky a praktické skúsenosti s implementáciou a vlastnosťami rôznych algoritmov používaných pri snímaní a spracovaní dát, a tvorbe 3D modelov.

2 Snímanie obrazov 3D objektov a prezentácia dát

Na získanie trojrozmerných informácií o 3D objektoch možno použiť dotykové alebo bezdotykové metódy. Bezdotykové metódy využívajú pasívne triangulačné techniky, aktívne techniky so štruktúrovaným osvetlením predmetu, najnovšie optické impulzné techniky (LIDAR) využívajúce preletovú techniku (Time of Flight). Každá takáto technika má svoje výhody a nevýhody, preto je potrebné experimentálne overiť jej použitie pre riešenie konkrétneho problému.

Pri aktívnych metódach snímania sa využíva emisia a štruktúrované osvetlenie objektu určitým druhom žiarenia (svetlo, ultrazvuk, RTG, UV, IR žiarenie) a analyzuje sa jeho odraz alebo absorpcia pri prechode cez objekt. Pasívne metódy snímania sú založené na detekcii odrazeného žiarenia odrazeného od objektu. Väčšina riešení tohto typu analyzuje viditeľné svetlo, pretože spravidla ide o ľahko dostupné žiarenie z okolia. Pasívne metódy snímania môžu byť veľmi lacné, pretože vo väčšine prípadov nepotrebujú špecializovaný hardvér, ale postačujú jednoduché kamery alebo digitálne fotoaparáty. Zároveň však môžu byť nepresné a náročné na výpočty [1].

Pre účely sme overili vlastnosti pasívnej ZED2 kamery, ktorá využíva stereoskopiu, a aktívnej kamery Orbbec Astra S, ktorá využíva techniku snímania štruktúrovaným osvetlením. Zistili sme, že snímanie ZED2 kamerou je efektívne pri otvorených vonkajších priestoroch s dostatočne veľkým slnečným žiarením do vzdialenosti 20 metrov. Pri nízkej intenzite osvetlenia alebo v uzavretých priestoroch s umelým osvetlením boli okrajové časti (mimo stred obrazového priestoru) príliš deformované. Naopak kamera Orbbec Astra S je vhodná na snímanie objektov do vzdialenosti dvoch metrov v uzavretom priestore, bez priameho slnečného osvetlenia.

Výstupný číslcový signál z kamery reprezentuje vzorky obrazu vo forme čísel usporiadaných do dvojrozmernej matice. Vzdialenosť elementov povrchu objektov je reprezentovaná dvojrozmernou číselnou maticou, tzv. hĺbkovou mapou (depth map). Mračno bodov reprezentujúce 3D objekt (point cloud) sa získava z hĺbkových máp vhodnou geometrickou transformáciou.

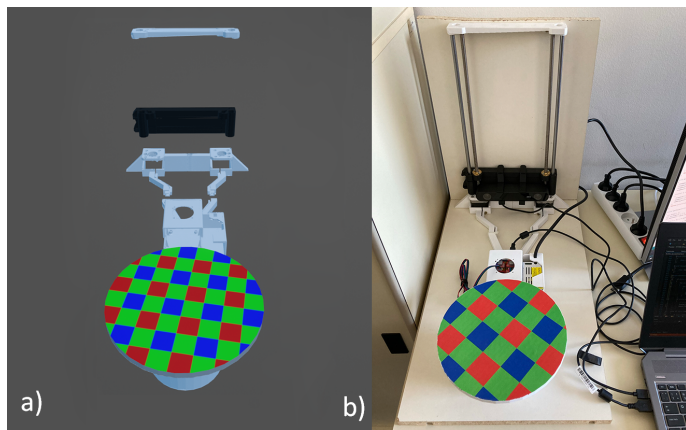
Pre spracovanie číslcového signálu zo snímacieho zariadenia sa používajú dedikované ovládače. Výrobca takéhoto zariadenia dodáva ovládač, prípadne celú knižnicu (*SDK*), ktorý umožňuje zber dát a základné spracovanie obrazu, prípadne je možné naprogramovať potrebné úpravy pre prepojenie s

riadiacim systémom. 3D rekonštrukcia je realizovaná na úrovni, ktorú reprezentuje neorganizovaná mapa 3D bodov (point cloud). Každé snímacie zariadenie má dostupné aplikačné rozhranie pre prácu s 3D geometriou a nezávisle je možné naprogramovať potrebné úpravy pre vstup do systému. Ak sú dostupné ďalšie informácie, ako napríklad údaje z gyroskopu pre mapovanie trajektórie kamery, je potrebné doplniť funkcionalitu ovládača pre každé snímacie zariadenie. Pre dosiahnutie vzájomnej kompatibility ovládače spracujú dáta v predpísaných formátoch.

3 Návrh a realizácia snímacieho zariadenia

Zostrojili sme zariadenie špeciálne navrhnuté na rekonštrukciu reálneho objektu uloženého na rotačnej plošine. Riešime problematiku segmentácie a rekonštrukcie 3D povrchov objektov, pričom zohľadňujeme nazbierané poznatky z oblastí registrácie a segmentácie. Zariadenie musí spĺňať kritériá, ktoré umožňujú úspešné riešenie problému s citlivosťou algoritmov upravenou pre dané prostredie. S menším rozlíšením kamery pri skenovaní miestnosti dokážeme získať dostatočný počet kľúčových bodov na analýzu, ako sú hrany a farebné zhľuky. Avšak pri rekonštrukcii menších objektov narozdiel od vonkajšieho prostredia disponujeme oveľa menej geometrickými informáciami v rovnakom rozlíšení. Preto je nutné bezprostredne stanoviť určité hranice pre potrebné naladenie popisujúcich algoritmov.

Vzhľadom na dostupné možnosti realizácie, návrh zariadenia sme vypracovali pomocou dostupného programu *Blender*. Zariadenie je rozdelené na tri hlavné komponenty, ktoré zahŕňajú rotačný stolík s farebným vzorom (Bayerov vzor), miesto pre riadenie motorov a posuvnú plošinu pre kameru. Hlavnú pohybovú činnosť zabezpečujú krokové motory riadené vývojovou doskou *Arduino* s integrovaným mikrokontrolérom *ATmega328P*. Komunikácia so zariadením prebieha v half-duplex režime cez seriálový port s potvrdením prijatia správy a rýchlosťou 128000 symbolov za sekundu (baud rate). Program zariadenia riadi krokové motory a prepočítava požadovanú vzdialenosť v *mm* alebo natočenie na počet otáčok motorov.



Obr. 1: Pohľad na vypracovaný návrh (a); vyhotovená konštrukcia testovacieho zariadenia (b)

Výrobu zariadenia sme realizovali pomocou 3D tlače na tlačiarňi *Prusa MK3S* a na vyhotovenie komponentov používame *PLA* materiál, ktorý je jednoduchý a tvrdý. Vytlačené komponenty boli upevnené na drevené dosky pre ľahšiu manipuláciu a spevnenie konštrukcie. Na obrázku 1 je vidieť výsledok návrhu a realizácie zariadenia.

4 Registrácia povrchov 3D objektov

Problematika povrchovej registrácie zohráva kľúčovú úlohu pri rekonštrukcii geometrie objektov. Registrácia predstavuje proces hľadania priestorovej transformácie (zmena mierky, rotácia, posun), ktorá zrovnáva dve rôzne N -rozmerné množiny údajov. V našom prípade registrácie 3D objektov je povrch reprezentovaný mračnom bodov. Účelom nájdenia takejto transformácie je vzájomné zarovnanie dvoch množín bodov. Na základe hľadanej transformácie rozdelíme registráciu na rigidnú a flexibilnú. Rigidná registrácia využíva lineárne transformácie a flexibilná registrácia je zameraná na kombináciu lineárnych a nelineárnych transformácií.

Vo väčšine aplikácií sa používa práve rigidná registrácia. Kľúčovou vlastnosťou je zachovanie vzájomnej vzdialenosti medzi bodmi. Tento typ registrácie, hľadá posun alebo rotáciu, prípadne aj mierku v priestore. V prípade, že dve množiny bodov majú straty údajov alebo deformácie, registrácia tieto faktory nezohľadňuje. Pretože ak sa vo vstupných množinách bodov nenájde vzájomne korešpondenčná dvojica bodov, odmietnu sa.

Hľadanie priestorovej transformácie dvoch mračen bodov, rozlišuje vstupné údaje, ako zdroj a cieľ. Zdrojové mračno bodov môže predstavovať aktuálne nasnímaný snímok a cieľom registrácie bude nájsť zarovnanie na referenčné mračno bodov. Výsledkom registrácie často býva N -rozmerná transformačná matica, ktorá vynásobí body v množine. Vďaka tomu získame zarovnanie zdrojovej množiny bodov na referenčnú množinu bodov. Využívame dostupné rigidné registračné algoritmy implementované v *PCL* knižnici [11] ako sú Iterative Closest Point (ICP), G-ICP, LM-ICP, SLAM a ELCH [2]-[4]. Softvérová platforma vyladila spomínané algoritmy pre konkrétny prípad rekonštrukcie zohľadnené snímaným prostredím.

Citlivosť algoritmov nastavujeme pomocou zvolenej úrovne filtrácie a vzájomnej vzdialenosti bodov mračna bodov. Tento parameter priamo ovplyvňuje rozlíšenie kamery a zohráva kľúčovú rolu pri ladení parametrov pre algoritmy využívajúce prehľadávanie k -susedných bodov.

5 Segmentácia povrchov 3D objektov

Segmentácia obrazového priestoru slúži na identifikáciu a rozdelenie jednotlivých častí obrazu (objektov) v trojrozmernom priestore na základe ich povrchových vlastností. Cieľom rôznych segmentačných metód je získanie presnej reprezentácie každej obrazovej časti na základe dostupných geometrických vlastností.

Poznáme tri základné skupiny (sémantická, inštancná, panoptická) metód segmentácie obrazu. My budeme pracovať so sémantickou segmentáciou, ktorá rozdelí obraz

do špecifických skupín pomocou tradičných segmentačných algoritmov v našej softvérovej platforme. Budeme používať algoritmy Region Growing a Euclidean Cluster Extraction (ECE). Segmentácia rozdelí priestor na regióny. V prípade statickej rekonštrukcie objektu vložného na rotačný stolík, získané regióny analyzujeme, či predstavujú rovinu a či obsahujú špecifický farebný Bayerov vzor pomocou štatistiky [5]-[6].

Pomocou implementovaného algoritmu Random Sample Consensus, ktorý sa nachádza v *PCL* knižnici získame modelové koeficienty a, b, c, d rovnice roviny segmentovanej oblasti. Známý tvar rovnice roviny upravíme na nerovnicu v tvare:

$$ax + by + cz + d = 0 \implies ax + by + cz \geq -d \quad (1)$$

Ak daný región spĺňa podmienky, vieme, že rotačný stolík je kružnica. Zoberieme dva odľahlé body segmentovanej oblasti a vypočítame ich geometrický stred, ktorý bude reprezentovať stred kružnice. Zároveň poznáme polomer dvoch najvzdialenejších bodov. Následne upravíme interval pomocou známej rovnice kružnice. Avšak, nás zaujíma plocha vo vnútri kružnice, takže rovnicu upravíme na nerovnicu v tvare:

$$r^2 = (x - h)^2 + (y - k)^2 \implies r^2 \geq (x - h)^2 + (y - k)^2 \quad (2)$$

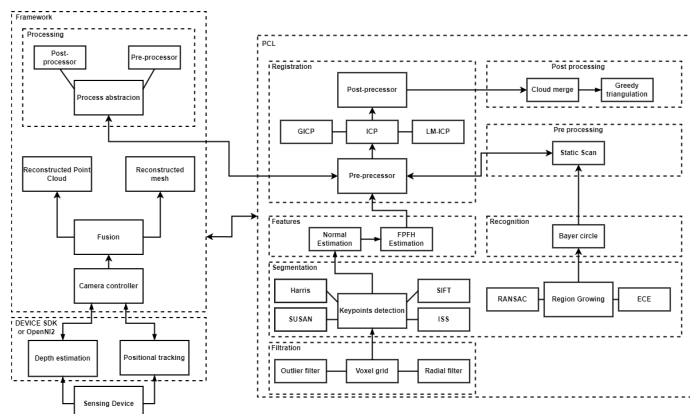
Koeficient h reprezentuje súradnicu x geometrického stredu detekovaného regiónu a analogicky koeficient k patrí súradnici y . Po splnení všetkých podmienok zoberieme len také body, ktoré ležia v kružnici nad získanou rovinou a výsledkom je odfiltrovaný objekt vložený na rotačnej plošine.

6 Fúzia povrchov 3D objektov

Počas registrácie zarovnáваме dve snímky voči sebe. Avšak, výsledok je potrebné určitým spôsobom zachovať a spracovať. Implementovali sme automatizovaný proces, ktorý v prvom kroku spracuje surové dáta z kamery pomocou filtrácie aby sa predišlo chybám. Zašumené dáta a vybočujúce merania znižujú účinnosť registračných algoritmov. Následne prichádza extrakcia kľúčových bodov dôležitých pre registráciu, ktoré reprezentujú špecifické vlastnosti obrazu ako sú napríklad hrany. Ak už poznáme transformáciu medzi dvoma snímkami, môžeme ich zjednotiť. Korešpondujúce body, ktoré sú blízko seba spojíme do jedného bodu pomocou geometrického priemeru. Aby sa predišlo prudkému nárastu veľkosti výsledného rekonštruovaného modelu. Výsledok, ktorý máme reprezentovaný ako mračno bodov ďalej pomocou triangulácie spracujeme na 3D model počítačovej grafiky. Ktorý už vieme použiť v rôznych aplikáciách, hrách alebo 3D tlačí.

Vďaka našej softvérovej platforme, aplikačný vývojár pre zostrojenie aplikácie, ktorá dokáže rekonštruovať prostredie alebo objekt, potrebuje len nakonfigurovať snímacie zariadenie a definovať parametre fúzie. Ako sú napríklad úrovne filtrácie, registračný algoritmus, a rôzne pre a post proces zásuvné moduly (pluginy). Zjednodušený funkcionálny diagram fúzie môžeme vidieť na obrázku 2.

Fúzia využíva optimálnym spôsobom aplikačné rozhranie registračného, filtračného a segmentačného modulu. Zároveň, platforma umožňuje prístup k týmto modulom aj separátne a



Obr. 2: Funkcionálny diagram fúzie.

aplikačný vývojár si môže vytvoriť vlastnú fúziu, prípadne inak využiť dostupný softvér. Avšak, naša fúzia je vyladená pre 3D rekonštrukciu prostredia. A s pomocou pluginov sa proces môže upraviť aj na statické snímky a segmentáciu vybraného objektu [7]-[9].

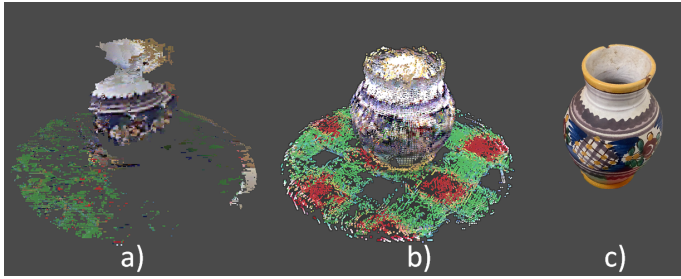
6.1 Rekonštrukcia modelu reálneho objektu

Rekonštrukcia konkrétneho objektu zo scény je náročnejšia a nie je veľmi možné túto problematiku riešiť všeobecne. Potrebujeme mať presne definované čo je potrebné detegovať a podľa toho zvoliť a upraviť správne algoritmy. Vo väčšine prípadov dnes pre danú problematiku sa využíva strojové učenie. V tejto práci využívame tradičné segmentačné algoritmy, ktoré na zostrojenom zariadení poskytujú dostatočnú úspešnosť pre zvolenú triedu problémov.

Keďže parametre zariadenia poznáme a vieme zistiť ohniskovú vzdialenosť kamerového snímača voči stredu rotačného stolíka, nepotrebujeme priamo používať registračné algoritmy. Namiesto toho vykonáme korekciu polohy kamery kalibráciou voči rotačnému stolíku tak, aby os jeho rotácie bola v strede. To umožňuje automatizované natáčanie meraného objektu o vopred zadaný uhol. Údaje pre kalibráciu (rozmery) sa zatiaľ zadávajú ručne.

Pre statické skenovanie je proces rekonštrukcie upravený tak, že použije iba jeden snímok pre určité natočenie objektu. Kamera teda čaká na príkaz, kým sa dokončí natočenie stolíka. Následne sa nasníma obraz a začne proces segmentácie a registrácie. V tomto procese sa stolík paralelne ďalej natáča do novej pozície.

Ako experiment sme použili registračný algoritmus ICP. Výsledky ukázali, že pri skenovaní symetrického objektu rotujúceho okolo stredu stolíka a kamera sa nepohybuje, získavame veľmi podobnú geometriu povrchu v každom snímku. V takom prípade, ak použijeme registračné algoritmy, ktoré nevyužívajú farebné informácie bodov alebo kľúčové body povrchov, môžeme dosiahnuť zarovnanie snímkov, ako vidno na obrázku 3 (a).



Obr. 3: Výsledok registrácie algoritmom ICP (a); registráciou s rotáciou stredu (b); 2D snímka referenčného objektu (c)

7 Testovacie rozhranie

Zistili sme, že nepresné údaje z 3D kamery (chybné vstupné dáta) môžu spôsobiť komplikácie pri analýze. Analytická časť práce porovnáva výstupy z algoritmov pomocou softvérových nástrojov a overuje ich pomocou generovaných testovacích dát. Vytvorili sme testovacie rozhranie pre testovanie algoritmov a generujeme syntetický objekt pomocou spojitkej funkcie $\mathbb{R}^3$ priestoru. Dáta sa rozdelia na referenčný celok a uložia sa na disk pre kontrolu vygenerovaných vzoriek.

Vytvorili sme testovaciu aplikáciu na báze softvérovej platformy pre automatizované testovanie registračných a segmentačných algoritmov pri rôznych vlastnostiach objektov. Výsledky uložené vo formáte CSV sú porovnávané s referenčnými dátami, ktoré sme generovali s 0 chybovosťou a ohodnocujeme ich pomocou Hausdorffovej vzdialenosti. Táto metóda meria, ako ďaleko sú od seba podmnožiny priestoru. Hľadá sa najväčšia vzdialenosť pre každý bod z ktorejkoľvek množiny v okolí niektorého bodu z inej množiny [10]:

$$d_H(X, Y) = \max \left\{ \sup_{x \in X} d(x, Y), \sup_{y \in Y} d(X, y) \right\} \quad (3)$$

kde $\sup$ predstavuje supremum a maximálnu hodnotu z množín predstavuje $\max$. Výsledkom je najväčšia vzdialenosť d z dvoch mračien bodov. Keďže poznáme dĺžku strany kubického priestoru n , môžeme vypočítať najväčšiu možnú vzdialenosť bodov pomocou priestorovej diagonály:

$$d = \sqrt{n^2 + n^2 + n^2} \Rightarrow n\sqrt{3} \quad (4)$$

Z pomeru najväčšej vzdialenosti voči dĺžke priestoru je podobnosť s :

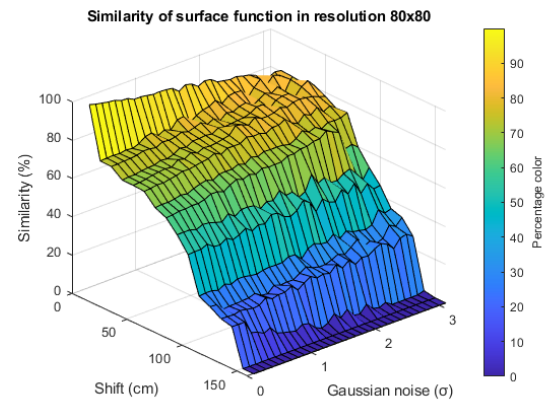
$$s = (1 - \frac{d_H(X, Y)}{d})100 \quad [\%] \quad (5)$$

V prípade, keď je pomer Hausdorffovej vzdialenosti a dĺžky priestorovej diagonály väčší ako 1 (s je záporný), výsledok možno vylúčiť, lebo objekt je interpretovaný mimo pracovný rozsah.

7.1 Porovnanie registračných algoritmov

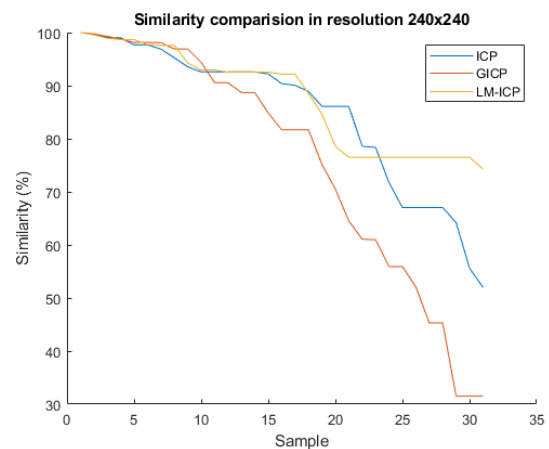
Množiny bodov môžu byť zarovnané globálnou alebo párovou inkrementálnou registráciou. Globálna registrácia zlúčená z

predchádzajúcich snímok má problém s narastajúcou veľkosťou výslednej množiny a výpočet môže trvať dlhšie. Párová registrácia má konštantnú dobu trvania a uchováva globálnu transformačnú maticu predchádzajúcich zarovnaní, ktorú pre násobíme s lokálnou párovou transformáciou. Násobenie však nie je komutatívne. Problémom môže byť kumulujúca sa transformačná chyba, ktorá môže spôsobiť postupne rastúce chyby zarovnania. Vygenerovali sme testovacie dáta pre zadanú funkciu v požadovanom intervale. V každej scéne sa pre zvolený počet vzoriek, inkrementálne zvyšoval posun a šum podľa vstupných parametrov. Výsledkom je 3D graf, kde os Z predstavuje závislosť voči posunu a šumu.



Obr. 4: Závislosť podobnosti zarovnania s od veľkosti bieleho šumu a posunu voči testovaciemu objektu

Obrázok 4 ukazuje vypočítanú podobnosť vzoriek testovacích dát v kubickom priestore o veľkosti $n = 24$ metrov voči referenčnému modelu v rozlíšení 80×80 pixelov. Vidieť, že pri posune viac ako 150 cm je podobnosť zanedbateľná ($s \approx 0$). Paradoxne, v niektorých prípadoch šum pomáha zarovnaniu, pretože registračný algoritmus je citlivý na vzdialenosť počas hľadania korešpondencie. Šum zmenšil vzdialenosť medzi mračnami bodov a tak pomohol nájsť korešpondenciu.



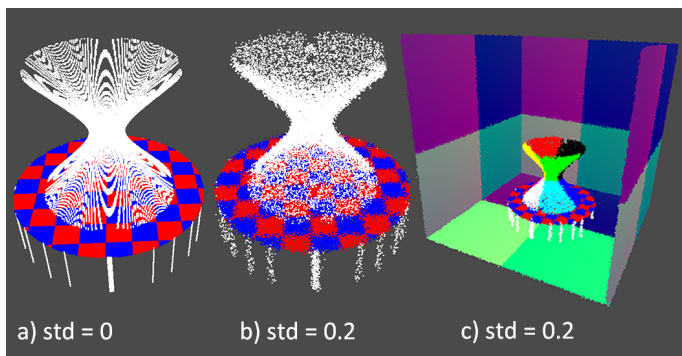
Obr. 5: Porovnanie registračných algoritmov pre graf podobnosti zarovnania voči testovaciemu objektu pri rozlíšení 240×240 pixelov

Testovali sme rôzne varianty ICP algoritmov v rozlíšení 240×240 pixelov s posunom do troch metrov na rovnakom intervale. Výsledky sú zhrnuté na obrázku 5.

Stanovili sme maximálny posun predstavujúci 3 metre a každá iterácia zvýši posun danej vzorky v priestore o 10 cm. Z toho je celkový počet 31 možných konfigurácií simulovaného prostredia. Najmenšiu chybovosť vykazuje optimalizovaná verzia algoritmu LM-ICP, zatiaľ čo časovo najmenej zložitý je pôvodný ICP algoritmus. V oboch prípadoch v takto malom rozlíšení sa G-ICP algoritmus ukazuje ako najmenej efektívna voľba. Napriek pomerne veľkému posunu podobnosť neklesla pod 30%.

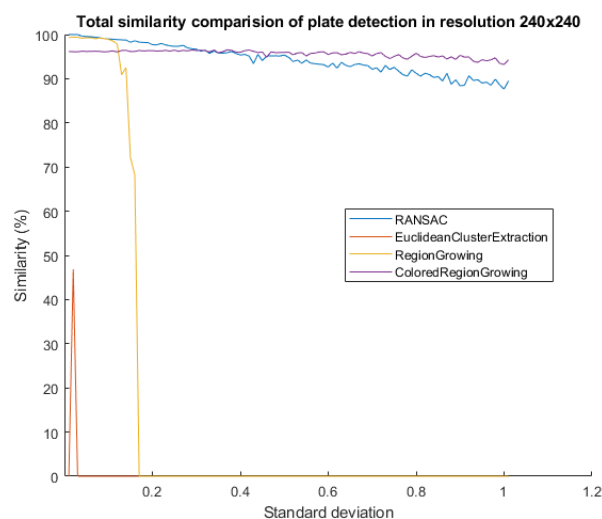
7.2 Porovnanie segmentačných algoritmov

Úspešnosť merania vzdialenosti môže byť ovplyvnená šumom a nepresnosťami, rovnako ako aj pri registrácii. Preto sme vytvorili testovacie rozhranie, ktoré umožňuje vygenerovanie rotačného stolíka s rôznymi vzormi (šachovnica, pásiky, homogénna farba). Na stolík vložíme povrchovú funkciu, generovanú rovnako ako pri registrácii. Testovacie rozhranie disponuje aj možnosťou generovať pozadie simulujúce umiestnenie objektu ohraničenom rovinami s prudkým prechodom farieb a vysokou intenzitou, aby sme analyzovali citlivosť detekcie rotujúcej plošiny s farebným Bayerovým vzorom s možnosťou pridania aditívneho šumu. Na obrázku 6 je ukážka vygenerovanej modelovej scény.



Obr. 6: Generované testovacie dáta s hyperboloidom a šachovnicovým vzorom bez šumu (a); s generovaným aditívnym bielym šumom $\sigma = 0.2$ (b); s farebným pozadím a generovaným aditívnym bielym šumom $\sigma = 0.2$ (c)

Pre množinu testovacích dát bez šumu a s aditívnym šumom v intervale $\sigma = [0, 1.0]$, v rozlíšení 240×240 pixelov a bez generovaného farebného pozadia sme porovnávali úspešnosť detekcie roviny rotačného stolíka voči známemu referenčnému modelu. Zistili sme, že úspešnosť detekcie meraná podobnosťou zarovnania s dvoch algoritmov (Euclidean Cluster Extraction a Region Growing) prudko klesne už pri veľmi nízkej úrovni šumu (obrázok 7). Ďalšie experimenty s pridaním farebných plôch do pozadia ukázali prudký pokles úspešnosti detekcie stolíka všetkými metódami pod 50% okrem algoritmu Region Growing, ktorý dosahoval úspešnosť 70% pri pridaní šumu do hodnoty $\sigma = 0.2$, no neskôr nedokázal detekovať rovinu.



Obr. 7: Simulovaná závislosť podobnosti zarovnania na veľkosti bieleho šumu v obraze objektu vyjadreného smerodajnou odchýlkou

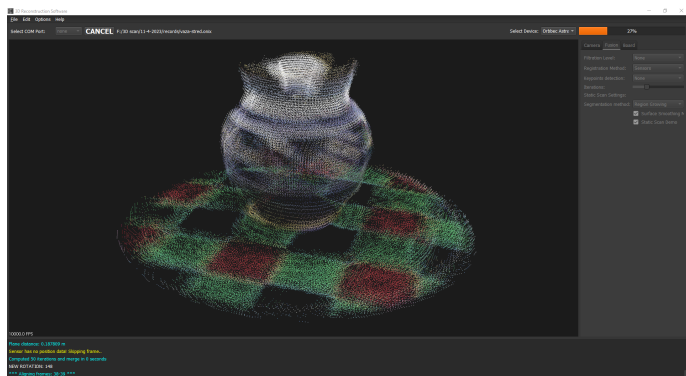
8 Platformové aplikácie

Softvérová platforma obsahuje základné moduly pre prácu s geometriou a možnosť automatizovanej analýzy implementovaných registračných a segmentačných algoritmov. Pripravili sme niekoľko vzorových aplikácií, ako napríklad automatizované testy, v ktorých sa vygeneruje simulovaný testovací objekt a okolité prostredie, ohodnotí sa chybovosť segmentačných a registračných algoritmov, a výsledky spolu s referenčnými dátami sa uložia na disk (pre prípadnú aplikáciu ML algoritmov). Okrem vyhodnotenia testov, platforma obsahuje interaktívne grafické aplikácie, ktoré renderujú projekciu 3D objektu využitím VTK knižnice [12] a užívateľ má možnosť v reálnom čase pozorovať priebeh zarovnania počas registrácie, prípadne postupné vykresľovanie segmentovaných povrchov scény s možnosťou odfiltrovaného vloženého objektu. V neposlednom rade obsahuje nástroje pre prácu s kamerami, rotačným zariadením a možnosťou nahrávania scény pre neskoršie spracovanie.

8.1 Grafická aplikácia pre snímanie a rekonštrukciu

Navrhli sme a zostrojili grafickú aplikáciu, ktorá umožňuje 3D rekonštrukciu prostredia a zároveň podporuje rotačné zariadenie. Pre zvýšenie priepustnosti systému využívame paralelné programovanie. Hlavné vlákno obsluhuje prvky používateľského rozhrania a 3D renderovacie okno. Všetky výpočty bežia na inom vlákne, a tiež aj komunikácia s kamerou a rotačným zariadením. Využívame tiež asynchrónne programovanie pre riadenie rotačného zariadenia s verifikáciou prenosu dát.

Používateľské rozhranie bolo vytvorené využitím Qt knižnice [13]. Aktuálny pohľad na aplikačné rozhranie je na obrázku 8. Používateľské rozhranie umožňuje voľbu rôznych



Obr. 8: Pohľad na vizualizačné rozhranie s rekonštruovaným modelom 3D objektu a používateľským rozhraním

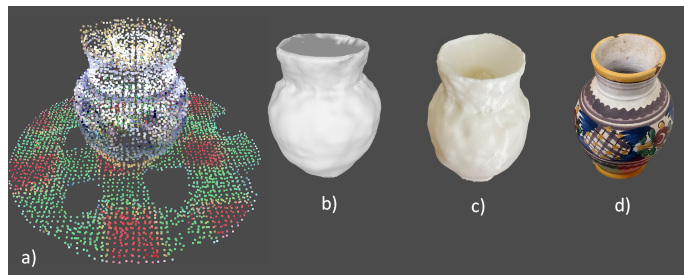
parametrov na vyladenie prostredia pre daný experiment. Implementovali sme možnosť úpravy parametrov snímacieho zariadenia ako napríklad kontrast, svetelnosť, farebnosť, rozlíšenie, maximálnu vzdialenosť hĺbky a mnoho iných parametrov pre kamery, ktorých efekt je možné v reálnom čase overiť a zobrazit' výstup mračna bodov vo vizualizačnom okne. V prípade, ak dané zariadenie nemá implementáciu ovládača, ktorá umožňuje nastavenie spomínaných parametrov, rekonštrukcia bude pracovať s tým čo je dostupné. Zároveň je možné zvolit' užívateľom registračný alebo segmentačný algoritmus, úroveň filtrácie, počet iterácií alebo algoritmus pre detekciu kľúčových bodov. Sám užívateľ má možnosť prispôbiť vlastnosti rekonštrukcie voči prostrediu, v ktorom sa práve nachádza. Implementovali sme aj nezávislé ovládanie rotačného zariadenia pre zmenu polohy posuvnej plošiny a rotácie. Užívateľ tak môže zistiť optimálnu výšku snímacieho zariadenia pre daný snímaný objekt. Rekonštruovaný objekt možno uložiť ako 3D model vo formáte mračna bodov *PLY* alebo ako 3D triangulačnú sieť bodov vo formáte *OBJ*.

9 Záver

Cieľom tejto práce bolo zostrojit' univerzálnu platformu zameranú na rekonštrukciu 3D objektov zo série dvojrozmerných obrazových máp snímaných objektov. V rámci tejto práce sme navrhli a zrealizovali systém pre snímanie obrazových máp objektov, ktorý pozostáva z hardvérovej a softvérovej platformy. Hardvérová platforma umožňuje snímanie tvaru kamerou s 3D rozlíšením rotáciou objektov s uhlovým rozlíšením 1° , typický rozmer objektu je limitovaný kamerou na 15 cm. V softvérovej platforme je implementovaný modul pre adaptáciu a rozšírenie základných funkcií zvolenej *SDK* snímacieho zariadenia (kamery) s hĺbkovým rozlíšením. Ďalej sú tu implementované viaceré softvérové moduly pre automatizovaný proces registrácie, segmentácie, filtrácie a rekonštrukciu 3D modelu objektu.

Celkovú funkčnosť navrhnutého a zrealizovaného systému sme overili nasnímaním obrazových máp reálneho objektu, vytvorením 3D modelu vázy, ktorý sme vyhotovili 3D tlačou. Porovnanie 3D modelu vyhotoveného z nasnímaných 2D

obrazových máp a 3D modelu vyhotoveného 3D tlačou je na obrázku 9.



Obr. 9: Výsledok fúzie pomocou registrácie s rotáciou stredu a Region Growing algoritmom (a); opravený rekonštruovaný 3D model s trianguláciou povrchu pomocou Screened Poisson metódy (b); rekonštruovaný 3D model vyhotovený pomocou 3D tlačiarne (c); referenčná fotografia vázy (d)

Hlavným prínosom tejto práce je navrhnutý a vytvorený otvorený systém, ktorý umožňuje verifikáciu zvolených/skúmaných algoritmov pre spracovanie dát reprezentujúcich reálny objekt snímaný zvoleným, v podstate ľubovoľným snímacím zariadením (kamerou) s hĺbkovým rozlíšením. Ďalším prínosom tejto práce je možnosť implementovať nové registračné alebo segmentačné algoritmy a experimentálne overiť ich vlastnosti pre zvolenú triedu snímaných objektov. Vyvinutá otvorená softvérová platforma je tiež dobrým základom pre rozšírenie o modely strojového učenia.

Pod'akovanie

Chcel by som pod'akovať spoločnosti Siemens Healthineers za zabezpečenie potrebných hardvérových prostriedkov. Táto práca bola vypracovaná aj s podporou projektu ECSEL-2019-1-IA iRel40, GA 87665.

Literatúra

- [1] Li, Beiwen and An, Yatong and Cappelleri, David High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 1:86-103, 2017; <https://doi.org/10.1007/s41315-016-0001-7>
- [2] Bentley, J. L. Multidimensional binary search trees used for associative searching *Communications of the ACM*, 18(9):509-517, 1975; <https://doi.org/10.1145/361002.361007>
- [3] Bes, P.J., McKay, and Neil D. A method for registration of 3-D shapes *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239-256, 1992; DOI: 10.1109/34.121791
- [4] Ranganathan, A. The Levenberg-Marquardt Algorithm, *Academia.edu*, 2004

- [5] Konstantinos G. D. Overview of the RANSAC Algorithm, 2005
- [6] Hojjatoleslami, S.A. and Kittler, J. Region growing: a new approach *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(7):1079–1084, 1998; DOI: 10.1109/83.701170
- [7] Rusu, R. B., Marton, Z. C., and Blodow, N. Towards 3D Object Maps for Autonomous Household Robots *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 10:3191–3198, 2007; DOI:10.1109/IROS.2007.4399309
- [8] Liu, J. and Bai, D., and Chen, L. 3-D Point Cloud Registration Algorithm Based on Greedy Projection Triangulation *Intelligent Imaging and Analysis*, 8(10):1776, 2018; DOI: 10.3390/app8101776
- [9] Marschner, S. and Shirley, P. Fundamentals of Computer Graphics (3rd. ed.). *CRC Press*, 2016. 804 s. ISBN: 978-1-4822-2941-7
- [10] Huttenlocher, D.P., Klanderman, G.A., Rucklidge, W.J. Comparing images using the Hausdorff distance *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(9):850–863, 1993; DOI: 10.1109/34.232073
- [11] PCL - The Point Cloud Library [online] [cit. 2023-4-18]. Dostupné z <https://pointclouds.org/documentation/>
- [12] VTK - The Visualization Toolkit [online] [cit. 2023-4-18]. Dostupné z <https://vtk.org/doc/nightly/html/>
- [13] Qt - Cross-platform Software Design and Development Tools [online] [cit. 2023-4-18]. Dostupné z <https://doc.qt.io/all-topics.html>

Možnosti sledovania tela vo VR

Simona Richterová, Eugen Antal

Ústav informatiky a matematiky FEI STU v Bratislave

xrichterova@stuba.sk

Virtuálna realita (VR) sa stáva stále populárnejšou technológiou v oblasti zábavy, ale aj v odbore vedy, medicíny a psychológie. Pri výskumoch a experimentoch v spomenutých oboroch, hlavne teda psychológie, hrá často dôležitú úlohu prevtelenie sa do virtuálneho avatara a stotožnenie sa s ním. Na dosiahnutie tohto cieľa je potrebné zabezpečiť, aby virtuálny avatar kopíroval pohyby fyzického tela čo najpresnejšie. VR technológia je v súčasnom stave nedokonalá a ponúka široký priestor na zlepšenie. Hardvérové nedostatky virtuálnej reality je preto možné do istej miery nahradiť softvérovými riešeniami. Jedným z najväčších nedostatkov VR je obmedzený počet informácií, ktoré vedú zariadenia zosnímať z reálneho sveta, ako napríklad informácie o pohybe tela. Táto práca analyzuje momentálny stav dostupných riešení a technológií, a jej cieľom je navrhnúť a vytvoriť aplikáciu prezentujúcu rôzne spôsoby sledovania tela s využitím inverznej kinematiky vo virtuálnom prostredí.

1 Úvod

Táto práca sa zameriava na integráciu ovládania celého tela (tzv. full body trackingu) vo virtuálnom prostredí s využitím senzorov na snímanie pozície rôznych častí tela. Cieľom je preskúmať možnosti využitia inverznej kinematiky (IK) v prípade, že nie je k dispozícii dostatočný počet senzorov. Postupným znižovaním senzorov je nutné využívať presnejšie modely inverznej kinematiky. Úlohou tejto práce je preto porovnať kvalitu ovládania celého tela v závislosti od počtu použitých senzorov, použiť knižnice inverznej kinematiky a od rôznych typov avatarov. Naším cieľom je dosiahnuť, čo najrealistickejšie pohyby, aby sa človek vedel čo najviac stotožniť so svojim avatarom.

Výstupom bude aplikácia, ktorá bude prezentovať rôzne možnosti sledovania tela závisiace od viacerých faktorov. Úlohou aplikácie bude porovnať jednotlivé možnosti z hľadiska presnosti, ale aj spôsobu implementácie. Zároveň tým pripravíme ukážku implementácie jednotlivých možností tak, aby boli jednoducho replikovateľné v prípade ďalšieho použitia. Scény budú vsadené do prostredia, ktoré nebude zbytočne komplikované, ale zároveň bude dostatočne prirodzené na účely nášho skúmania.

V tomto príspevku si predstavíme proces analýzy, návrhu, vývoja a implementácie aplikácie, ktorá demonštruje možnosti sledovania tela a jeho pohybov vo virtuálnej realite. Pred samotnou analýzou si uvedieme základné pojmy problematiky

a popíšeme využitie inverznej kinematiky v tejto oblasti. Ďalej analyzujeme súčasný stav vrátane aktuálne dostupných technológií a vyhodnotíme naštudované poznatky, na základe ktorých vytvoríme návrh. Na začiatku návrhu si stanovíme ciele a budeme pokračovať tým, že navrhujeme konkrétne scény, ktoré budú prezentovať jednotlivé riešenia bodytrackingu. Po špecifikácii návrhu popíšeme proces vývoja a implementácie a na záver uvedieme vyhodnotenie riešenia.

2 Stelesnenie a inverzná kinematika

Možnosť vo virtuálnej realite nahradiť skutočné telo človeka virtuálnym telom v životnej veľkosti poznáme pod pojmom stelesnenie. Keď vidíme vlastné virtuálne telá z pohľadu prvej osoby alebo odrazené vo virtuálnych zrkadlách, tak to všetko vyvoláva silnú ilúziu vlastníctva a ovládania virtuálneho tela. Ako označenie stotožnenia, alebo miery stelesnenia sa s avatarom vo virtuálnom prostredí sa používa pojem Sense of Embodiment (ďalej len SOE).

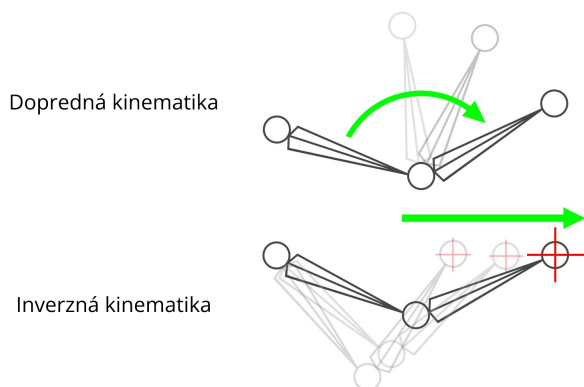
Využitie imerznej virtuálnej reality umožnilo preformulovať otázku, či je možné zažívať rovnaké pocity voči virtuálnemu telu vo vnútri imerzného virtuálneho prostredia ako voči biologickému telu, a ak áno, do akej miery. [1]

Modulácia emocionálnych reakcií na virtuálne podnety je základným cieľom mnohých imerzných interaktívnych aplikácií. V štúdií Dominika Galla a spoluautorov využívajú ilúziu stelesnenia a ukazujú, že vlastníctvo virtuálneho tela poskytuje prostriedky na moduláciu emocionálnych reakcií. Výsledok nasvedčuje tomu, že umelo vytvorené telá môžu zvýšiť účinnosť imerzných aplikácií so zameraním na psychoterapiu alebo počítačom sprostredkované sociálne interakcie. [2]

Na dosiahnutie vysokej miery stelesnenia vo virtuálnej realite je potrebné vytvorenie virtuálneho avatara čo najpodobnejšieho originálnemu ľudskému telu a jeho čo najdôveryhodnejšia synchronizácia s ním. Vizuálna stránka virtuálneho avatara v dnešnej dobe nepredstavuje problém oproti jeho synchronizácii s ľudským telom. Na samotnú synchronizáciu sa využívajú senzory zaznamenávajúce pozíciu skutočného tela, ďalej softvér, ktorý vie tieto vstupy spracovať, a metóda inverznej kinematiky.

Animovaná postava sa modeluje pomocou kostry zo segmentov spojených kĺbmi. Kinematické rovnice postavy definujú vzťah medzi uhlami kĺbov postavy a jej pózou alebo konfiguráciou. Metóda doprednej kinematickej animácie využíva kinematické rovnice na určenie pózy vzhľadom na uhly kĺbov. Metóda inverznej kinematiky vypočíta uhly kĺbov pre požadovanú pózu postavy. Názorné porovnanie týchto metód je

vidieť na obrázku 1.



Obr. 1: Dopredná a inverzná kinematika

Inverzná kinematika sa využíva vtedy, keď používateľ nemá k dispozícii dostatočný počet senzorov na zmapovanie celej kostry a zároveň je toto zmapovanie požadované. Umožňuje avatarom reprodukovat' ľudské pohyby s obmedzeným počtom senzorových bodov. [1]

3 Existujúce riešenia

Analyzovali sme niektoré existujúce riešenia, ktoré ponúkali funkčný model sledovania tela vo virtuálnej realite. Hlavnou prácou, od ktorej sme odvíjali aj naše riešenie bola diplomová práca Ing. Martina Hajdina zameraná na rovnakú problematiku. Vo svojej práci ponúkol funkčné riešenie sledovania tela pomocou šiestich HTC Vive Trackerov a balíčka Animation Rigging, ktorý ponúka Unity.

Komunikácia medzi zariadeniami a Unity bola zabezpečená pomocou doplnku OpenVR, ktorý poskytuje spoločnosť Valve. Výsledné riešenie bolo vytvorené pre Mixamo avatarov a pozostávalo z dvoch scén. Jednej určenej na kalibráciu a testovanie pomocou zrkadiel a druhá určená na komplexnejšie testovanie pohybov pomocou mini hry Hole in The Wall. [3]

Inou prácou, ktorá ponúkala podobné riešenie, bola práca pod názvom Realizácia návrhov VR experimentov pre účely sociálnych vied. V tejto práci rovnako využili doplnok OpenVR, 6 sledovacích bodov, Animation Rigging balíček určený na implementáciu IK. Zmenou oproti predošlému riešeniu bol typ avatara, ktorým sa tentokrát stali Unity Multipurpose Avatar(UMA), ktorý ponúkajú väčšiu flexibilitu v prispôbení.[4]

V práci z roku 2019 pod vedením P. Casermana, sa zamerali na otestovanie a porovnanie metód inverznej kinematiky. Vykonali niekoľko testov, ktoré porovnávali metódy IK z hľadiska presnosti a času potrebného na vyriešenie problému. Metódy IK testovali na funkčnom modeli opäť s využitím základnej HTC zostavy a 3 dodatočných HTC Vive Trackerov umiestnených na nohách a krížoch. Experiment vykonali na MakeHuman avataroch, ktorých kostru rozdelili do štyroch kinematických reťazcov podľa končatín, na ktoré aplikovali metódy IK. Výsledky takisto ukázali, že rekonštrukcia

pohybu dolnej časti tela bola veľmi presná, avšak v prípade hornej časti tela sa vyskytli určité nedostatky. [5]

Na vytvorenie systému pre ovládanie 3D modelov pomocou inverznej kinematiky sa zamerali aj v práci na Masarykovej Univerzite v roku 2015. Analyzovali niekoľko 2D algoritmov, ktoré vyžadujú viac kontrolných bodov, ale sú výpočtovo menej zložité. Na základe ich analýzy autor vytvoril nový vlastný postup ako knižnicu pre Unity. Autor taktiež popísal iné dostupné balíky vytvorené pre Unity. Celkové riešenie bolo vytvorené pre 4 snímané body. [6]

V článku Daniela Rotha a spoluautorov porovnávajú sadu markerov celého tela s redukovanou sadou markerov. Oboje podporované inverznou kinematikou. Vyvinuli riešenie IK a vyhodnotili použitie systému pre VR aplikácie v ukážkovej štúdii na vyvolanie akrofóbie. Vyvinuté riešenie používa päť značiek pripevnených na ruky, nohy a hlavu. Na sledovanie pohybu značiek použili systém OptiTrack a na streamovanie údajov do Unity3D použili rozhranie NatNet. Výpočet IK sa vykonával pomocou nástroja Mecanim Animation Tool. Výsledky ukázali, že celkovú záťaž pre používateľov možno znížiť použitím zjednodušeného prístupu založeného na IK s obmedzeným počtom markerov. Systémy vyžadujúce nosenie obleku alebo vesty spôsobujú nepohodlie, teda sú považované za viac invazívne, a predlžujú čas prípravy. [7]

4 Dostupní avatari

Existujú viaceré knižnice ponúkajúce priamo vytvorené modely avatarov alebo systémy na ich generovanie. Najdôležitejším faktorom pri výbere avatara je v našom prípade jeho dostupnosť. Niektoré typy sme spomenuli v predchádzajúcej sekcii. Dokopy sme však analyzovali viaceré druhy avatarov, konkrétne avatarov Mixamo, UMA, MakeHuman, Ready Player Me a Avaturn.

Mixamo je online databáza postáv, ktoré nie sú upravovateľné. UMA je kompletný systém vytvárania a prispôbenia postáv určený pre Unity. Podobným systémom na vytváranie je MakeHuman, ktorý je dostupný vo forme samostatnej aplikácie. Avaturn je nástroj na tvorbu realistických avatarov pomocou fotografie tváre a Ready Player Me je platforma určená na vytváranie herných avatarov pomocou fotografie alebo úplne od základov.

5 Existujúce riešenia IK

Inverzná kinematika je kritickým aspektom sledovania tela vo virtuálnej realite, hlavne v prípadoch, keď užívateľ nemá k dispozícii dostatočný počet senzorov a jeho cieľom je aj napriek tomu funkcionálnu sledovania tela implementovať. IK umožňuje, aby sa virtuálna reprezentácia pohybov a gest používateľa odrážala vo virtuálnom svete, najpresnejšie ako je možné vzhľadom na daný počet senzorov. Je dôležité poznamenať, že ide o riešenia vhodné na prevedenie v reálnom čase, pri ktorých je veľmi podstatná výpočtová náročnosť daného riešenia.

Sledovací systém Manus Polygon je jedno z bezplatných riešení IK. Systém je dostupný ako samostatná aplikácia, ktorá

sa stará o IK a kalibráciu, následne je výsledok streamovaný do Unity. Riešenie ponúka zachytávanie pohybov tela pomocou 6-8 sledovacích bodov.

Final IK je riešenie dostupné priamo v Unity Asset Store za sumu 90€. Od Manus Polygon sa odlišuje v tom, že pracuje čisto iba s dátovými bodmi v Unity a samotné získanie údajov o polohe musí používateľ zabezpečiť vlastným spôsobom. Minimálny počet senzorov je 3, ale je možnosť pridať až päť dodatočných snímačov.

Balík Animation Rigging je súbor nástrojov poskytovaný spoločnosťou Unity, ktorý umožňuje vytvárať animácie aplikovaním takzvaných Constraints komponentov a inverznej kinematiky na kosť postavy. Je vytvorený ako všeobecné riešenie IK aplikovateľné aj na iné objekty ako postavy. Pre efektívne spojenie s VR je potrebná dodatočná úprava pomocou skriptu. Výhodou je opäť široká kompatibilita a množstvo sledovacích bodov nie je limitované.

Najdôležitejšie poznatky sme zhrnuli do prehľadovej tabuľky zobrazujúcu výšku ceny riešenia a počet senzorov.

Tab. 1: Prehľad riešení IK

Riešenie	Cena	Počet senzorov
Animation Rigging	Bezplatný	1 a viac
Final IK	Bezplatný	6-8
Manus Polygon	90 €	3-8

6 Kalibrácia výšky

Kalibrácia proporcií tela avatara zahŕňa úpravu výšky, dĺžky rúk a ďalších rozmerov tela na základe počtu senzorov. Tým sa zabezpečí, aby avatar presne reflektoval fyzické pohyby používateľa vo virtuálnom prostredí. Minimálny počet senzorov pre každého avatara je 3 a to náhlavná súprava a 2 ovládače.

Základným prvkom je kalibrácia výšky avatara, na ktorú môžeme využiť polohu náhlavnej súpravy. Tým určíme skutočnú výšku používateľa. Potom môžeme nastaviť mierku avatara tak, aby zodpovedala výške používateľa. Spôsob kalibrácie ostatných častí tela závisí nie len od použitého modelu avatara, ale aj od počtu použitých senzorov či riešenia IK.

V štúdiu Ayush Bhargava a ostatných použili mierku podľa skutočného tela a rodovo prispôbeného avatara. Kosť avatarov sa môžu líšiť v závislosti od pohlavia, a preto to môže byť jeden zo spôsobov ako dosiahnuť lepšiu formu kalibrácie.

7 Možnosti sledovania tela

Dostupný hardvér určený na sledovanie tela môžeme rozdeliť do viacerých skupín podľa toho, na ktorú časť tela sa zameriava a teda sledovania tela, tváre a sledovanie rúk a prstov. Aktuálne nie je dostupné zariadenie, ktoré by bolo schopné sledovať všetky tieto časti súčasne.

Analyzovali sme aktuálne dostupné zariadenia zo všetkých spomenutých kategórií a podrobne naštudovali ich špecifikáciu.

Do skupiny zameranej na sledovanie tela patria hlavne obleky, samostatné senzory, prípadne ich kombinácie. Obleky všeobecne ponúkajú viacero snímacích bodov, no bývajú aj drahšie a menej dostupné. Vo sfére virtuálnej reality sa najviac vyžívajú jednotlivé senzory ako napríklad HTC Vive Trackery, ktoré sú na trhu dostupné už dlhšie, a na prepojenie využívajú základové stanice.

Na sledovanie rúk a prstov sú na trhu k dispozícii mnohé zariadenia ako rukavice, ktoré sú najpresnejšie, alebo kamery, či už externé alebo vstavané do náhlavných súprav. Čiastočné sledovanie prstov v dnešnej ponúkajú aj samotné ovládače.

Sledovanie tváre býva zabezpečené napríklad VIVE Facial Trackerom, externým senzorom. Zopár vybraných zariadení, ako Meta Quest Pro, disponuje vstavanými vnútornými kamerami, ktoré sledujú výrazy tváre vrátane pohybu očí.

8 Návrh

Táto práca je zameraná predovšetkým na integráciu ovládania celého tela vo virtuálnom prostredí s využitím senzorov na snímanie pozície rôznych častí tela a takisto inverznej kinematiky.

Výstupom bude aplikácia s viacerými scénami, ktoré budú obsahovať ukážky implementovaných riešení. V scénach využijeme jednotné prostredie, aby sme zabezpečili zreteľné oddelenie scény od riešenia inverznej kinematiky a zabezpečili tak bezproblémové nasadenie do viacerých prostredí.

Pri návrhu budeme vychádzať z naštudovaných poznatkov spísaných v predchádzajúcich častiach, ako aj z výsledkov diplomovej práce M. Hajdina. Návrh aplikácie by mal zohľadniť nadobudnuté zistenia s ohľadom na to, aby finálna aplikácia implementovaná podľa tohto návrhu bola relevantným materiálom využiteľným pri porovnaní možností sledovania tela vo virtuálnej realite.

Pri vytváraní scén bude kladený dôraz na riešenie inverznej kinematiky a komponenty s ňou spojené, ako napríklad rôzne typy avatarov a kalibrácia postavy. Nebudeme sa zameriavať na okolie scény a jej detaily. Preto na účely implementácie a testovania vytvoríme veľmi jednoduché prostredie, ktoré budeme využívať vo všetkých scénach.

Našou úlohou je porovnať kvalitu ovládania celého tela v závislosti od spôsobu sledovania tela, počtu použitých senzorov, použitej knižnice IK a od rôznych typov avatarov. Cieľom je dosiahnuť, čo najrealistickejšie pohyby, aby sa participant vedel čo najviac stotožniť so svojim avatarom. Pozorovateľ bude môcť ohodnotiť stotožnenie sa so svojim avatarom vizuálnou formou pomocou zrkadiel.

V sekcii 4 sme popísali päť dostupných typov avatarov vo forme knižnic alebo systémov na ich generovanie. Pre každý typ vytvoríme ukážkového avatara a v každej vytvorenej scéne bude možné zvoliť si jedného z nich. Účelom bude demonštrovať kompatibilitu riešenia s týmito avatarami.

Postupným znižovaním senzorov je nutné využívať presnejšie modely inverznej kinematiky. Z tohto dôvodu po otestovaní jednotlivých riešení, vyberieme jedno ako najvhodnejšie nie len z aspektu jednoduchosti implementácie, jej compatibility,

cenovej náročnosti, ale hlavne z pohľadu presnosti riešenia vzhľadom na daný počet senzorov. Na zostrojenie potrebných mechaník využijeme riešenia, knižnice, zariadenia a rôzne moduly popísané v predchádzajúcich častiach. Samotné riešenie bude vyvinuté v prostredí Unity a optimalizované na HTC Vive zariadenia virtuálnej reality, vrátane HTC Vive Trackerov, pomocou OpenXR pluginu.

Pri návrhu scén budeme čerpať z už overených experimentov a inšpirujeme sa prvkami, ktoré sa v nich používajú. V nasledujúcich podkapitolách popíšeme jednotlivé časti návrhu.

8.1 Inverzná kinematika

Individuálne scény budú demonštrovať použitie jednotlivých riešení inverznej kinematiky. Rozhodli sme sa využiť nasledujúce riešenia, z ktorých je jedno platené a dve sú dostupné zadarmo. Animation Rigging zahŕňa všetky funkcionality balíčku Fast IK, ktorý z toho dôvodu nepoužijeme.

- Animation Rigging,
- Manus Polygon,
- Final IK.

8.2 Senzory

Aplikáciu bude implementovaná na použitie s HTC Vive Trackermi. Konkrétne ju vytvoríme pre počty 3, 4, 6 a 8 senzorov. Manus Polygon vie jediný pracovať iba v konfigurácii 6 a 8 senzorov. Konfigurácia s 3 senzormi bude v prevedení náhlavná súprava a 2 ovládače, každý v jednej ruke. Pri štvorbodovej konfigurácii pridáme do zostavy snímač na boky. Konfigurácia 6 bodov bude navyše obsahovať 2 senzory, každý pre jednu nohu, a konfigurácia v počte 8 pridá 2 senzory v oblasti medzi ramenami a lakťami.

Pre balíčky Animation Rigging a Final IK vytvoríme ukážku všetkých štyroch konfigurácií, čo je dokopy 10 kombinácií senzorov a inverznej kinematiky. Každý tejto kombinácii dedikujeme samostatnú scénu.

8.3 Prostredie

Na ukážku jednotlivých riešení vytvoríme jednoduchú miestnosť. Naším cieľom nie je zameriavať sa na detaily, no zároveň potrebujeme dosiahnuť isté vizuálne prostredie, ktoré bude na participanta vplývať prirodzene. Na tento účel použijeme balíček Office Room Furniture. Na obrázku 2 môžete vidieť návrh miestnosti. Do miestnosti umiestnime zrkadlá, ktoré budú slúžiť na vizuálne testovanie.

8.4 Avatari

V sekcii 4 sme popísali päť dostupných typov avatarov. Z každého typu vytvoríme dvoch rodovo ukážkových avatarov, teda dokopy 5 žien a 5 mužov. Účelom tohto postupu je presnejšia kalibrácia tela. V každej scéne poskytneme participantovi možnosť zvoliť si pohlavie a typ avatara, čím budeme testovať ich kompatibilitu s výsledným riešením.



Obr. 2: Návrh miestnosti

Vytvorení avatari budú mať priemernú postavu a jednoduché oblečenie.

8.5 Aplikácia

Samotnú aplikáciu by sme chceli implementovať tak, aby jej prvotná obrazovka obsahovala menu, kde si participant vyberie počet senzorov a knižnicu IK. Následne bude presmerovaný do scény, kde si zvolí avatara. Po zvolení avatara ho bude môcť nakalibrovať a danú kombináciu otestovať pomocou zrkadiel.

9 Implementácia

Aplikácii sme vyvíjali v Unity verzii 2021.3.18f1 pre zariadenie HTC Vive Pro spolu s HTC Vive senzormi. Na zabezpečenie podpory vstupov sme použili OpenXR, podporujúci rôzne zariadenia virtuálnej a zmiešanej reality. OpenXR v základe nepodporuje vstup pre HTC Vive Trackery, čo sme vyriešili tak, že sme do interakčných profilov pridali vlastný profil pre tieto senzory. Profil sme prevzali z Unity vývojárskej komunity. Interakcia v aplikácii bola zabezpečená pomocou balíčku XR Interaction Toolkit a nástrojov, ktoré poskytujú. Ďalej si popíšeme prevedenie jednotlivých častí.

9.1 Prostredie

Na obrázku 3 je vidno náhľad na miestnosť tak, ako sme ju navrhli a implementovali v aplikácii. Rozhodli sme sa použiť viacero natočených zrkadiel pre pohľad z rôznych uhlov.

9.2 Menu

Prvá scéna, ktorá sa používateľovi zobrazí, je jednoduché menu, kde si zvolí knižnicu IK a počet senzorov. Na pravej strane sa zobrazuje virtuálny panák s ukážkou umiestnenia senzorov na tele, pretože toto rozmiestnenie sa môže líšiť. Po potvrdení nastavení sa užívateľovi načíta zvolená scéna. Ovládanie menu a

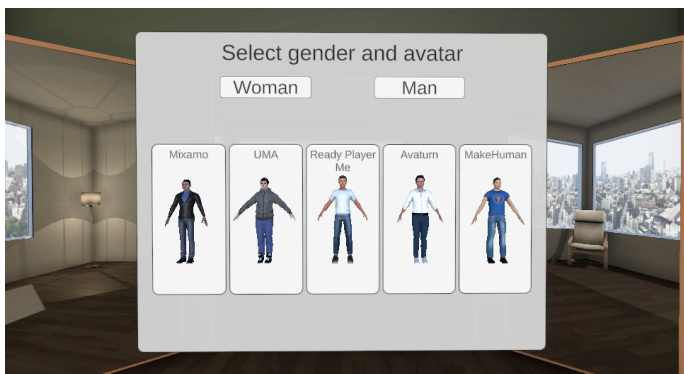


Obr. 3: Ukážka miestnosti

používateľského rozhrania sme realizovali pomocou laserových ukazovateľov implementovaného v XR Interaction Toolkit.

9.3 Final IK scény

Balík Final IK poskytuje skripty na implementáciu pre virtuálnu realitu vrátane ovládača na kalibráciu. Skript *VR IK* je potrebné pridať humanoidnému avatarovi a jeho hlavným účelom je poskytnúť referenciu na kosti avatara a referenciu na HTC Vive Trackery. Podstata skriptu spočíva v tom, že tieto body synchronizuje. V prípade avatarov Ready Player Me a Avaturn bolo potrebné priradiť referencie na kosti manuálne, pretože sú tieto avatari k dispozícii vo formáte glb. Možnosť určiť avatara ako humanoidného neponúkajú ani s pomocou balíčku glTFast, ktorý slúži na použitie assetov tohto formátu v Unity. Final IK ďalej poskytuje kalibračný skript *VR IK Calibration Controller*.

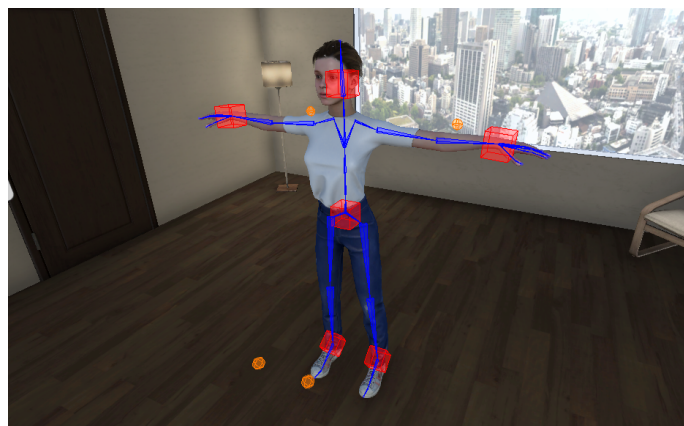


Obr. 4: Voľba avatara

9.4 Animation Rigging scény

Práca s balíkom Animation Rigging bola náročnejšia, pretože bolo potrebné každému avatarovi určiť a prispôsobiť kinema-

tické reťazce a ďalšie ovládacie prvky ako napríklad prelínanie animácií v chrbtici. Taktiež bolo potrebné manuálne implementovať animácie v prípade konfigurácie s 3 a 4 sledovacími bodmi. V týchto prípadoch totiž nie je zabezpečené sledovanie nôh a je potrebné implementovať základné animácie kráčania. Pri použití balíčka Animation Rigging nastali komplikácie s kalibráciou postavy, pretože kosti v základe kontroluje animačný ovládač a prepisuje akékoľvek úpravy, ktoré by sme chceli vykonať. Preto sme implementovali kalibráciu postáv podľa výšky používateľa, ktorá je odvodená od výšky umiestnenia náhlavnej súpravy. Jeden z ďalších problémov, bolo prispôbenie chrbtice, ktorá sa má odvodzovať od snímačov na bokoch a náhlavnej súpravy. Kostra avatarov je vždy stavaná tak, aby koreňom jej štruktúry boli boky, no pri použití VR je častokrát dôležitejšie umiestnenie hlavy, pretože ako jediný vizuálny výstup musí byť najpresnejší. Tým pádom sa ťažko hľadá kompromis medzi tým, ktorý bod by mal byť v tomto prípade nadradený. Takisto je problémom to, že v porovnaní s hlavou sa umiestnenie senzora na bokoch môže líšiť od človeka k človeku. V tomto prípade sa ako riešenie ponúka dôkladná kalibrácia. Nástroje na ňu však už balíček Animation Rigging neponúka. Na obrázku 5 môžete avatara, jeho kosťu znázornenú modrou farbou, červené kocky predstavujú 6 sledovacích bodov a oranžovou sú pomocné body určujúce smer ohýbania kolien a lakťov.



Obr. 5: Animation Rigging avatar

9.5 Manus Polygon scéna

Manus Polygon je samostatná aplikácia v ktorej prebieha kalibrácia postavy a aj výpočet inverznej kinematiky. Výsledok sa streamuje do Unity, a preto je Manus Polygon scéna viac univerzálna než ostatné, keďže je v jednej scéne implementované sledovanie pre 6 a 8 senzorov súčasne. Táto implementácia bola realizovaná pomocou skriptov, ktoré ponúka samotný Manus Polygon. Je v nich potrebné nastaviť referencie na kosti, čo sa dá v prípade humanoidných avatarov, ako Mixamo, vykonať automaticky. Priradenie referencií pre avatarov Ready Player Me a Avaturn je opäť potrebné vykonať manuálne.

Kalibrácia postavy v aplikácii Manus Polygon je veľmi dôkladná, čo má za výsledok veľmi presné sledovanie postavy.



Obr. 6: Ukážka sledovania tela pomocou Manus Polygon

10 Testovanie a vyhodnotenie

Testovanie prebehlo na 7 používateľoch. Každý s nich otestoval niekoľko knižníc IK v kombinácii s rôznymi počtami senzorov a druhmi avatarov. Vyhodnotenie prebiehalo prevažne ústne počas a po testovaní, pretože sme tak získali čo najviac podrobností. K testovaniu bolo použité zariadenie HTC Vive Pro a HTC Vive Trackery. Používatelia ako najlepšie systémy ohodnotili Manus Polygon v konfigurácii 6 aj 8. Pri konfigurácii s 8 senzormi bola potrebná podrobnejšia kalibrácia, ktorá však pri nesprávnom nastavení mala opačný efekt, a preto sa celkové výsledky dorovnali. Ako jeden z najlepších systémov ohodnotili aj Final IK s 3 senzormi aj napriek tomu, že v tomto prípade nie je k dispozícii sledovanie nôh. Odôvodnením bola absencia nepatrných trhavých pohybov nôh a ich prípadnej nepresnej polohy spôsobených nedokonalosťou hardvéru. Animation Rigging ohodnotili ako najmenej presný vo všetkých ohľadoch. Pri porovnaní avatarov sa väčšina zhodla na tom, že avatari MakeHuman a Avaturn bolí horší, kvôli pohybom, ktoré sa ukázali napríklad na nohách v podrepe alebo pri otáčaní rúk. Mixamo avatarov hodnotili priemerne a ako najlepších zvolili Ready Player Me a UMA avatarov.

11 Záver

Pred samotným návrhom aplikácie bolo potrebné oboznámiť sa komponentami potrebnými na zabezpečenie nášho cieľa ako sú druhy avatarov, kalibrácia postáv, existujúce riešenia inverznej kinematiky a hardvérové možnosti sledovania tela. Analyzovali sme rôzne existujúce riešenia, experimenty a použité technologické prvky, na základe ktorých sme navrhli riešenie aplikácie.

Aplikácia bola vytvorená pomocou herného enginu Unity a optimalizované pre zariadenia HTC Vive Pro a HTC Vive Trackery. Aplikácia pozostáva zo základnej scény, v ktorej sa nachádza menu. V menu si hráč môže vybrať jednu z desiatich

kombinácii knižnice IK a počtu senzorov. V každej scéne si následne môže zvoliť jedného z piatich druhov avatarov, ktorého je možnosť nakalibrovať a vizuálne otestovať pomocou zrkadiel.

Jedným z hlavných cieľov bolo preskúmať možnosti využitia inverznej kinematiky v prípade, že nie je k dispozícii dostatočný počet senzorov. Porovnali sme kvalitu ovládania celého tela v závislosti od počtu použitých senzorov, použitej knižnice inverznej kinematiky a od rôznych typov avatarov. Výsledky ukázali, že pri použití Manus Polygon so šiestimi a ôsmimi senzormi bola kvalita vyššia oproti ostatným systémom, no zároveň veľmi kladne ohodnotili aj knižnicu Final IK v konfigurácii s 3 senzormi.

Podakovanie

Touto cestou by som sa rada podakovala Ing. Eugenovi Antalovi, PhD. za jeho odbornú pomoc, pripomienky, a cenné rady a taktiež všetkým, ktorí mi pomohli pri testovaní aplikácie.

Literatúra

- [1] K. Kiltner a R. Groten a M. Slater The Sense of Embodiment in Virtual Reality *Presence Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21, 2012.
- [2] D. Gall et al. Embodiment in Virtual Reality Intensifies Emotional Responses to Virtual Stimuli *Frontiers in Psychology*, vol. 12, 2021.
- [3] M. Hajdin a E. Antal Full body tracking vo virtuálnom prostredí *Slovenská technická univerzita v Bratislave*, 2021. Dipl. pr.
- [4] P. Šebeš et al. Realizácia návrhov VR experimentov pre účely sociálnych vied *Slovenská technická univerzita v Bratislave*, 2021. Tímový projekt.
- [5] P. Caserman a P. Achenbach a S. Gobel Analysis of Inverse Kinematics Solutions for Full-Body Reconstruction in Virtual Reality 2019.
- [6] M. Grman a J. Chmelík Použitie inverznej kinematiky pre ovládanie 3D modelov *Masarykova Univerzita v Brne*, 2015. Dipl. pr.
- [7] D. Roth et al. A Simplified Inverse Kinematic Approach for Embodied VR Applications 2016.

Komunikácia vo virtuálnom prostredí

Bc. Patrik Šebeš

Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave

Vedúci práce: Ing. Eugen Antal, PhD.

xsebes@stuba.sk

Abstrakt – Cieľom práce je vytvorenie aplikácie, kde budú môcť dvaja alebo viacerí používatelia komunikovať v prostredí virtuálnej reality. Tento článok sa venuje komunikácii vo virtuálnom prostredí, návrhom a implementáciou aplikácie pre takýto účel.

1 Úvod

Ľudia prirodzene komunikujú medzi sebou a vďaka technickému pokroku sa obmedzenia komunikácie strácajú. Dnes môžeme komunikovať s človekom na opačnej strane Zeme, za predpokladu technickej vybavenosti oboch komunikujúcich. Komunikácia sa čoraz viac presúva zo známeho a prirodzeného 3D priestoru do 2D priestoru obrazoviek. Virtuálna realita umožňuje navrátiť komunikáciu do aj keď len zdanlivého 3D priestoru a dokonca ju aj obohatiť. S čoraz viac dostupnejšími a mobilnejšími zariadeniami pre virtuálnu realitu bude tento trend narastať.

V tomto článku sa budem venovať komunikácii vo virtuálnom prostredí respektíve virtuálnej realite. Budem tiež popisovať návrh a implementáciu aplikácie ktorá umožní takúto komunikáciu.

2 Návrh riešenia

Dôležitým krokom pri tvorbe aplikácie je správny návrh vzhľadom na požadovanú funkcionálnu a parametrickú. Cieľom práce je implementácia aplikácie, ktorá umožní dvom a viacerým používateľom komunikovať vo virtuálnom prostredí. Komunikácia má prebiehať pomocou pohybu avatarov, zvuku a textu. Používateľ by si mal byť schopný zvoliť model avatara aký mu najviac vyhovuje z vopred preddefinovaných avatarov.

Je potrebné navrhnuť a implementovať klientskú front-end aplikáciu ktorá umožní používateľovi zvoliť si nastavenia ako prezývku, model avatara, mikrofón a umožní používateľovi ovládať svoj avatar vo virtuálnom prostredí. Taktiež je potrebné navrhnuť a implementovať spôsob akým budú klienti medzi sebou komunikovať. Tejto problematike sa budem ďalej venovať v nasledujúcich kapitolách. Pri návrhu je potrebné myslieť aj na prípadné rozširovanie aplikácie do budúcnosti.

2.1 Funkcionálne požiadavky

Aplikácia musí spĺňať aspoň nasledovné požiadavky.

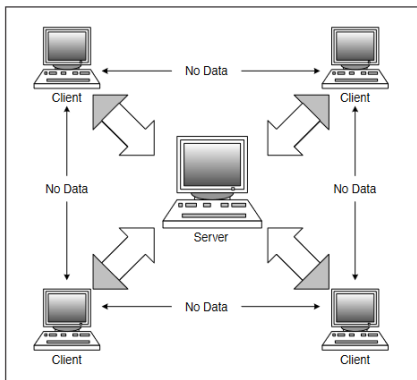
- Voľba používateľského mena / prezývky
- Možnosť zvoliť si mikrofón z dostupných zariadení
- Vypnutie a zapnutie mikrofónu
- Výber modelu avatara z aspoň troch možností
- Výber virtuálneho prostredia z aspoň dvoch možností
- Možnosť komunikovať pomocou textu
- Možnosť komunikovať pomocou zvuku
- Ovládať zvoleného 3D avatara pomocou 3 snímačov
- Synchronizácia pohybov avatarov v reálnom čase

2.2 Sieťová komunikácia

Aplikácia musí vedieť zabezpečiť komunikáciu medzi jednotlivými účastníkmi. Je potrebné zvoliť či pôjde o klient-server architektúru alebo peer-to-peer architektúru. Výber bude mať výrazný dopad na bezpečnosť, plynulosť, manažment, hardvérové a softvérové nároky samotnej aplikácie.

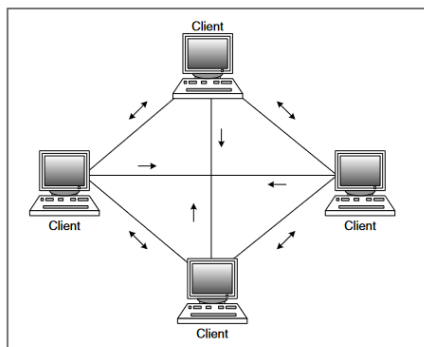
Architektúra klient-server funguje na princípe centrálného bodu, servera, ktorému klienti odosielať informácie a server odosiela informácie klientom. Medzi klientmi nedochádza priamo ku žiadnej komunikácii. Hlavnou výhodou je bezpečnosť a manažment. Nevýhodou sú najmä hardvérové požiadavky na dedikovaný server. Je dôležité poznamenať že serverom môže byť aj jeden z klientov a zastávať tak rolu klienta aj servera.[1]

Podstatnou voľbou je tiež režim autority. Je možné použiť režim autority kde je autoritatívny klient alebo autoritatívny server. V prípade autoritatívneho klienta zaručuje výpočet klient a na server posiela len výstup, ktorý server rozpošle ostatným klientom. Výhodou je nižšie zaťaženie servera a menšia komplexita. Nevýhodou je možnosť manipulovať procesom výpočtu na strane klienta. V prípade autoritatívneho servera klient len pošle vstup na server, server prevedie výpočet a klientom pošle výstup. Režim autority je možné aplikovať zvlášť na každý logický celok. Ku príkladu synchronizácia pozície môže byť server autoritatívna a synchronizácia rotácie môže byť klientsky autoritatívna operácia.[1]



Obr. 1: Architektúra klient-server [1]

Pri architektúre peer-to-peer dochádza medzi používateľmi k priamej výmene dát bez potreby centrálného bodu. Výhodou je decentralizácia. Nevýhodou je komplexita, bezpečnosť a škálovateľnosť.[1]



Obr. 2: Architektúra peer-to-peer [1]

2.3 Metódy komunikácie vo virtuálnom prostredí

Z technického hľadiska existuje viacero riešení ako zachytávať pohyb človeka a prenášať ho do virtuálneho priestoru. V tejto práci sa budem zaoberať len headsetmi pre virtuálnu realitu, pričom predpokladám že používateľ bude jedným z nich disponovať. Jedným z takýchto headsetov je aj HTC Vive.

Existuje viacero možností ako môže používateľ komunikovať vo virtuálnom prostredí s iným používateľom. Jedná sa najmä o nasledovné spôsoby.

- Pohyb
- Zvuk
- Text
- Video

Pohyb používateľa je najčastejšie zachytávaný troma snímačmi pohybu (ovládač pravej ruky, ovládač ľavej ruky, headset). Dodatočne je možné pripojiť a používať aj ďalšie snímače. Spôsob zachytávania pohybu snímačmi sa líši od hardvérovej implementácie konkrétneho VR vybavenia. Vývojári aplikácie pre virtuálnu realitu je k dispozícii API od vývojára, pomocou ktorého vie zistiť aktuálnu polohu a rotáciu senzorov.



Obr. 3: HTC Vive

Samotná pozícia a rotácia senzorov ešte nemá veľký komunikačný význam a preto je vhodné projektovať tieto pozície a rotácie senzorov na 3D model. Aby bol 3D model ovládateľný tak musí obsahovať kosť. Pomocou pohybov a rotácií kostí je potom možné ovládať pozície a rotácie jednotlivých partií modelu ako keby sa jednalo o reálne kosti.

Ak by sme chceli priamo hýbať kosťami rúk alebo kosťou hlavy 3D modelu na základe získanej pozície a rotácie senzorov, tak by dochádzalo k pohybu len koncov rúk prípadne hlavy, nehýbali by sa ramená prípadne krk. Pre pohyb celkov je nutné použiť inverznú kinematiku, čím sa zabezpečí dopočítanie pohybov ostatných kostí a zabezpečí sa prirodzený pohyb.



Obr. 4: Kosti 3D modelu avatara

Zaznamenávanie a prehrávanie zvuku je štandardné riešenie pomocou mikrofónu a reproduktora. Mikrofón a reproduktor je často integrovaný priamo v headsete, prípadne môže používateľ používať aj externé sluchadlá a mikrofón.

Oproti štandardnej komunikácii je možné použiť vo virtuálnom prostredí aj komunikáciu pomocou textu. Jednou zo štandardných možností ako vyriešiť problematiku

komunikácie pomocou textu je zobraziť používateľovi virtuálnu klávesnicu a pomocou lasérového ukazovadla mu umožniť písať na nej. Každému používateľovi je potom zobrazené textové okno kde je zaznamenaná správa od každého používateľa.

Každému používateľovi je vhodné zobrátiť aj jeho stav ako napríklad aktuálny počet snímkov za sekundu, stav pripojenia, ako mu aj umožniť vykonávať niektoré základné operácie priamo v prostredí virtuálnej reality pomocou menu. Používateľ má tak prehľad o svojom stave a môže ľahšie diagnostikovať prípadné problémy.

3 Implementácia

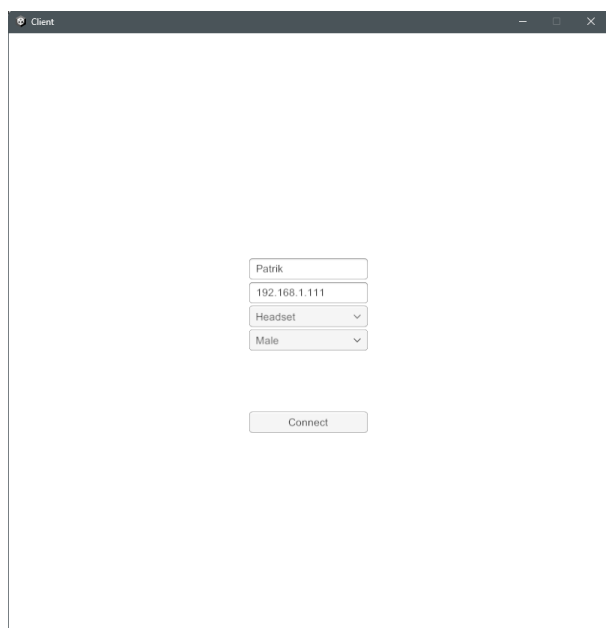
V tejto kapitole sa budem venovať implementácií klientskej aplikácie a server aplikácie.

3.1 Klient

Aplikáciu klienta som implementoval pomocou nástroja Unity, ktorý poskytuje množstvo nástrojov pre vývoj hier ale aj iných front-endových aplikácií. Výhodou Unity je že ponúka rozsiahlu podporu pre virtuálnu realitu, rozsiahlu a dobre spracovanú dokumentáciu.

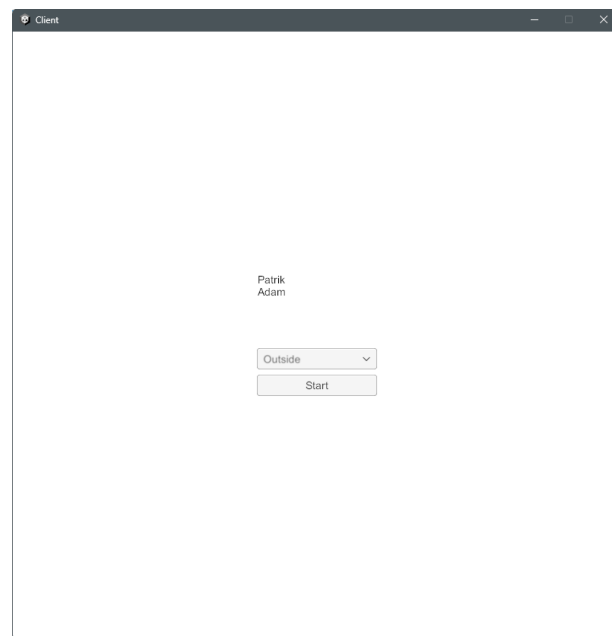
Najprv som samostatne implementoval ovládanie respektíve mapovanie pohybu senzorov VR headsetu na pohyby avatara vo virtuálnom prostredí s použitím štandardu OpenVR. Na implementovanie inverznej kinematiky som použil Unity knižnice a komponenty Animation Rigging.

Ďalším bodom bola implementácia grafického rozhrania používateľa, ktoré som implementoval za pomoci Unity UI komponentov. Používateľ v hlavnom menu zadá potrebné údaje ako je prezývka, IP adresa servera, mikrofón, avatar a následne sa po kliknutí na tlačidlo connect pripojí na server. Zatiaľ sa ešte virtuálna realita nepoužíva.



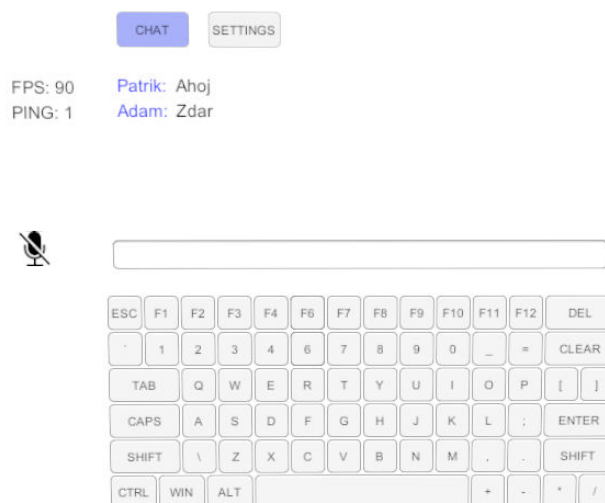
Obr. 5: Ukážka aplikácie – menu

Po pripojení je umiestnený do lobby. V lobby je možné vidieť všetkých pripojených účastníkov. Je možné taktiež zvoliť scénu prostredia a po kliknutí na tlačidlo start dôjde k spusteniu pričom sa účastníci objavia vo virtuálnom priestore a môžu ovládať svojho avatara, komunikovať s inými účastníkmi.



Obr. 6: Ukážka aplikácie – lobby

Komunikáciu pomocou textu som implementoval tak, aby sa po stlačení tlačidla akcie na ovládači objavilo okno s menu, ktorého súčasťou je aj okno s chatom. V menu je tiež možné vypnúť a zapnúť mikrofón, zistiť aktuálny stav klienta a nastaviť parametre ako aktuálne používaný mikrofón. Mikrofón je po pripojení vypnutý a je ho nutné v menu zapnúť.



Obr. 7: Ukážka aplikácie – virtuálne menu a chat

Ako ďalší bod som implementoval prostredie. Pre lepšiu rozmanitosť som sa rozhodol že jedna zo scén bude vonkajšia a jedna vnútorná. Pri vonkajšej scéne som použil Unity nástroje pre tvorbu prostredia a stromov. Pri vnútornom prostredí som použil už existujúce modely, ktoré som importoval do Unity.



Obr. 8: Vonkajšie prostredie



Obr. 9: Vnútorné prostredie

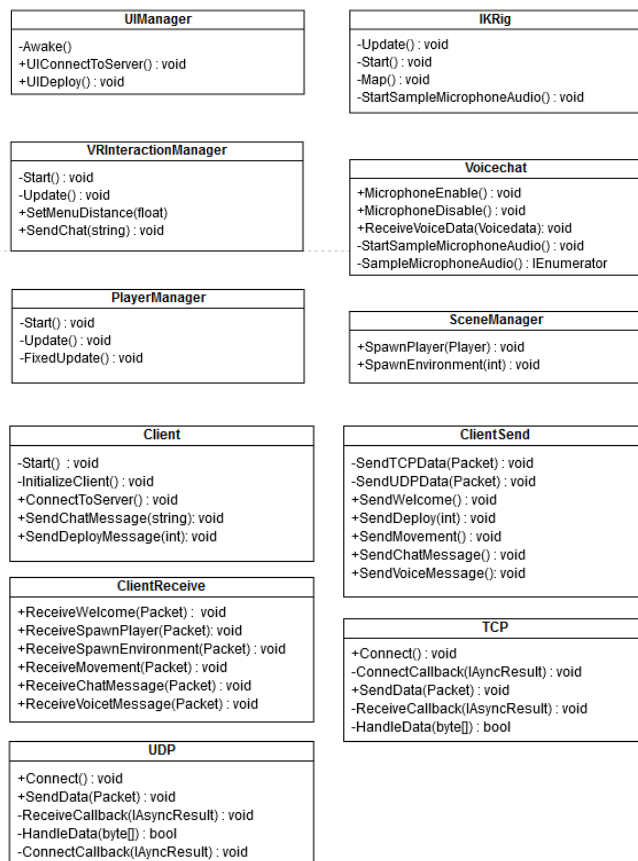
Pre komunikáciu medzi klientmi som si zvolil architektúru klient-server. Klient so serverom komunikuje pomocou protokolu TCP/IP. Na komunikáciu používajú medzi sebou viacero druhov správ, ktoré si vyžadujú odlišný prístup. V prípade správ ktoré sú dôležité a ich doručenie je kritické som použil protokol TCP a v prípade správ reálneho času, kde je možné pripustiť stratu dát som použil protokol UDP. Nasledujúca tabuľka zobrazuje správy aj s použitým protokolom.

Tab. 1: Správy medzi klientom a serverom

Správa	Protokol
Inicializačná správa	TCP

Správa o zahájení komunikácie	TCP
Správa o vybratom prostredí	TCP
Správa o vzniknutí postavy	TCP
Synchronizácia pohybu	UDP
Synchronizácia rotácie	UDP
Textová správa	TCP
Hlasová správa	UDP

V diagrame uvediem ešte niektoré dôležité triedy a ich funkcie, pre lepšiu prehľadnosť nebudem uvádzať premenné. V sekcii server uvediem diagram pre server.

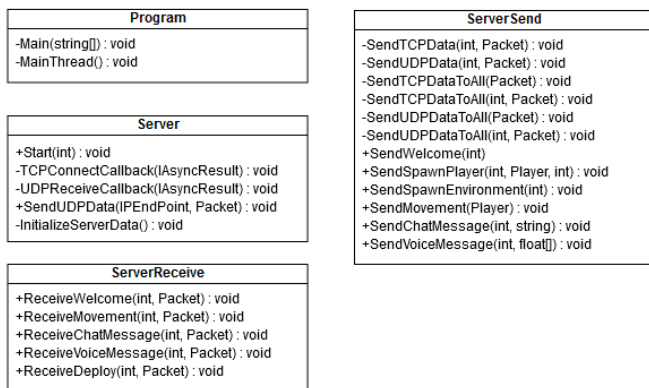


Obr. 10: Class diagram - klient

3.2 Server

Pre back-end boli k dispozícii už existujúce sieťové riešenia pre Unity ale ja som sa rozhodol pre implementáciu vlastného klient-server riešenia s použitím knižnice System.Net vo forme konzolovej aplikácie.

Dáta sa posielajú ako množina bajtov, pričom trieda Packet sa stará o zápis a čítanie jednoduchých dátových typov do paketu. Pri zasielaní paketu sa ako prvá hodnota do dát zapíše celé číslo s identifikačným číslom správy. Pri obdržaní paketu sa potom ako prvé prečíta toto identifikačné číslo a na základe toho sa správa pošle ďalej aj s dátami do príslušnej obslužnej funkcie, ktorá správu spracuje.



Obr. 11: Class diagram - server

Podakovanie

Touto cestou by som sa rád podakoval Ing. Eugenovi Antalovi, PhD. za jeho cenné rady a pripomienky pri vypracovaní témy.

Literatúra

- [1] BARRON, Todd and STAFF, LostLogic, 2002. Multiplayer Game Programming. Game Development Ser. ISBN 978-0-7615-3298-9.
- [2] Network programming. [Online]. Dostupné na <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.net> [Cit. 19. apríl 2023]
- [3] Unity Documentation. [Online]. Dostupné na <https://docs.unity.com> [Cit. 19. apríl 2023]

3.3 Overenie funkčnosti

Aplikáciu som implementoval agilne a po každom celku alebo pridanej funkcionalite som ju vždy celú otestoval.

Funkčnosť aplikácie som otestoval tak, že som na dva počítače pripojil VR headset. Používal som headsety HTC Vive a Oculus Quest 2. Na jednom z počítačov som spustil server aplikáciu a na oboch počítačoch som sa pripojil z klientskej aplikácie na tento server. Dôležité bolo taktiež pridať server aplikáciu do zoznamu výnimiek pre firewall na zariadení na ktorom je server aplikácia aktívna nakoľko by dochádzalo k blokovaniu sieťovej komunikácie.



Obr. 12: Ukážka aplikácie - interakcia používateľov

4 Záver

Návrhom a implementáciou tejto komunikačnej aplikácie som získal mnoho nových poznatkov. Podarilo sa mi navrhnúť a implementovať funkčný prototyp aplikácie pre komunikáciu vo virtuálnej realite a otestovať ju. Do budúcnosti je možné aplikáciu ďalej rozširovať a pridávať funkcionalitu.

Edukačná pomôcka pre výučbu vybraných klasických šifrier

Marek Klimo, Eugen Antal

Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave

xklimom@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zaoberá vytvorením edukačnej pomôcky pre výučbu vybraných klasických šifrier na predmete Klasické šifry. Cieľom práce bolo rozšíriť moduly v edukačnom portáli zaoberajúcom sa historickými šiframi s názvom HCPortal - Portal of Historical Ciphers. Rozšírenie sa týka prevažne doplňujúcich informácií a rozdelenia šifrier do sekcií. Okrem toho sa venuje aj príprave interaktívnych vybraných šifrier a poukazuje na ich aplikačné využitie. Dodatočne sa v práci navrhla sekcia pre virtuálne múzeum dedikovaná pre japonské a čínske šifry.

1 Úvod

Keď sa povie klasická šifra, mnohým ľuďom to evokuje Cézarovu šifru a iné, v našich končinách používané šifry. Do kategórie klasických šifrier zaradujeme šifry, ktoré boli používané v minulosti a z moderného hľadiska charakterizované primitívnym rozlúštením a taktiež nedostatočnou bezpečnosťou pre uchovanie a ochranu informácií a dát. Takéto šifry poznáme zo starovekého Grécka, avšak podobné obdoby sa vyskytli zároveň aj v krajinách Číny a Japonska. Najstaršia známa šifra je pravdepodobne Skytale. Avšak v bližšej histórii (19. až 20. storočie) môžeme taktiež pozorovať, či už kódovacie knižky, alebo aj šifrovacie stroje. Šifrovanie v oblasti Japonska a Číny je zaujímavou a veľmi špecifickou témou, keďže kryptografi narážali na iné problémy so šifrovaním a ich riešeniami, než sme my zvyknutí. Koniec klasických šifrier pripisujeme príchodu moderných šifrovacích systémov DES a RSA v 70. rokoch 20. storočia.

V tejto práci sa uskutočnili dve rozšírenia portálu. Prvým je popis vybraných klasických šifrier a ich fungovania, s dôrazom na dve exotické interaktívne šifry. Druhým rozšírením je spôsob propagácie šifrier prostredníctvom Virtuálneho (VR) múzea, ktoré je súčasťou portálu historických šifrier. Toto VR múzeum poskytuje špeciálnu virtuálnu prehliadku, kde návštevníci môžu využiť audio-vizuálne a vizuálne zdroje na štúdium týchto zaujímavých kryptografických systémov z oblasti Číny a Japonska.

Napriek tomu, že mnohé publikácie o týchto šifrách zostávajú nepreskúmané, projekt sa snaží získať čo najviac informácií z dostupných zdrojov v rôznych jazykoch.

2 Predmet Klasické šifry

Predmet Klasické šifry (KSIF) sa vyučuje na bakalárskom stupni v 3. ročníku počas zimného semestra aplikovanej informatiky. Tento predmet sa zaoberá oboznámením študentov so šiframi od ich počiatku, históriou a významom jednotlivých šifrier, steganografiu, transpozíčné a substitučné šifry, šifrovacie stroje pričom približuje aj ich lúštenie a príklady použitia v praxi. Taktiež sa snaží oboznámiť študentov nielen so zahraničnými, ale aj s československými a slovenskými šiframi použitých pred a počas druhej svetovej vojny.

Portál historických šifrier je bežiaci projekt na FEI STU, ktorý sa zaoberá historickou kryptografiou. Okrem nadšencov šifrier ju využívajú aj študenti na predmete Klasické šifry.

2.1 Historical Ciphers Portal

Historical Ciphers Portal (HCPortal) obsahuje viacero nástrojov a webových aplikácií na propagáciu a výučbu klasických šifrier [1]. Dôležitou súčasťou projektu sú aj databázy kryptogramov a šifrovacích kľúčov. Obsah portálu môžeme rozdeliť na nasledovné hlavné časti:

Tab. 1. Rozdelenie sekcií HCPortal-u

Modul č.	Názov modulu	Obsah modulu
1	Education	Obsahuje ukážku niektorých klasických šifrier a príslušných kryptoanalytických techník. Každá technika je sprevádzaná vizualizáciou.
2	Nomenclator	Modul Nomenklatura pozostáva z online nástrojov určených na vytváranie, používanie a zdieľanie nomenklatúrnych šifrových kľúčov
3	Virtual museum	Virtuálne múzeum historických šifrier je postavené na rámci virtuálnej reality podporovanej modernými webovými prehliadačmi. Cieľom je podporiť záujem verejnosti o

		šifry pomocou moderných technológií.
4	ManuLab	ManuLab (ManuLab Qt, Manulab API, ManuLab Online) je softvérový produkt na štatistickú analýzu.
5	Glossary	Slovník obsahuje definície pojmov súvisiacich s historickou kryptológiou vrátane kódov a nomenklatúrnej terminológie.
6	Tools and webpages	Nástroje a webové stránky obsahujú užitočné odkazy na externé projekty.

V tejto práci sa zameriavame na rozšírenie dvoch modulov: Education a Virtual museum. Naším cieľom je rozšíriť ich informačný obsah pre jednoduchšie vyučovanie na predmete Klasické šifry.

3 Rozšírenie HCPortal education modulu

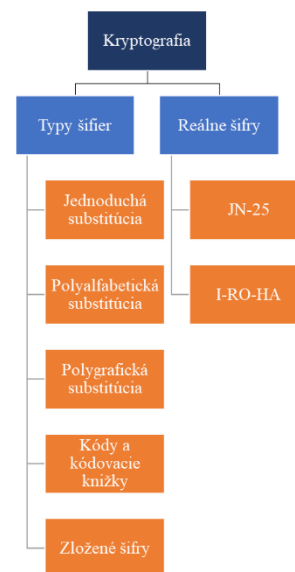
Tento modul aktuálne obsahuje implementáciu útokov na vybrané typy klasických šifier. Z pohľadu výučby však je žiadúce rozšíriť túto časť aj o iné oblasti kryptológie. Naším cieľom je rozšírenie tohto modulu o prehľad základných kategórií klasických šifier. Rovnako je žiadúce doplnenie reálnych inštancií klasických šifier, ktoré boli v minulosti používané. V tejto časti by bolo vhodné implementovať konkrétne šifry s veľkým dôrazom na čo najpresnejšie napodobnenie. Touto cestou by mohli študenti a iní záujemcovia vyskúšať šifrovanie/dešifrovanie priamo na webovom portáli.

Typy klasických šifier boli rozdelené do nasledovných kategórií pre šifry:

- jednoduché substitúcie
- polyalfabetické substitúcie
- polygrafické substitúcie
- kódy a kódovacie knihy
- zložené šifry

V každej sekcii sa nachádza všeobecný popis daného typu a zároveň sú popísané tri konkrétne šifry, ich účel, význam, zašifrovanie a aj dešifrovanie, ako je zobrazené na Obr. 1. K vybraným šifram bol vybratý aj zoznam obrázkov, ktoré ukazujú historické použitie týchto šifier.

Pre edukačný modul sa zakomponovali taktiež aj interaktívne šifry, kde môže používateľ pracovať s vlastnými textami a kľúčmi. Tieto šifry sú v časti *Real ciphers* reprezentované šiframi JN-25 a I-RO-HA šifrou.



Obr. 1 Rozdelenie sekcie kryptografia

JN-25 je substitučno-aditívna šifra vytvorená Japonskom v 30. rokoch 20. storočia. Podobné systémy boli používané aj na území Slovenska počas 2. svetovej vojny v rokoch 1939 - 1945, napríklad ZAL88 alebo LUDMILA [2].

JN-25 šifra je vytvorená ako interaktívna šifra, ako je zobrazené na Obr. 2 a Obr. 3 v prílohe, kde používateľ si môže prečítať o šifre, jej použití Japonskom počas druhej svetovej vojny, dozvedieť sa o spoločných snahách spojencov prelomiť túto šifru. Používateľ si môže podľa postupu na Obr. 4 na webovej stránke ako prvé určiť, aký jazyk chce použiť. Na výber je anglický a japonský. Pre obidve nastavenia bol vybraný rovnaký plaintext, aby používateľ rozumel, ako fungovala pôvodná šifra. Kódovacia knižka sa avšak zmení, aby sa prispôbila danému jazyku. Plaintext a zároveň aj kódovacia knižka môže byť upravená, pričom do kódovacej knižky môže používateľ pridať, odobrať alebo upraviť riadok podľa vlastných predstáv. Taktiež je možné náhodne vygenerovať hodnoty pre jednotlivé riadky, či už pre samotnú substitúciu alebo pre aditívnu hodnotu. Používateľ si po nastavení týchto hodnôt môže skúsiť zašifrovať danú správu, pričom je mu zobrazený postup šifrovania jednotlivých znakov/hlások/slov krok za krokom [3].



Obr. 4 Nastavenia vstupných hodnôt pre zašifrovanie alebo dešifrovanie textu.

I-ro-ha šifra je taktiež reprezentovaná ako interaktívna šifra zobrazená na Obr. 5. Ide o variantu Polybiovoho štvorca založeného na Hiragane/Katakane o veľkosti 49 znakov. Polybiovo štvorec predstavuje tabuľku, kde sa daný znak substituuje za jemu pridelenú x,y pozíciu v tabuľke. Používateľ sa na stránke ako prvé dozvie informácie o šifre, kedy vznikla, ako funguje, a zároveň aj jej nedostatky.

Najväčší nedostatok tejto šifry je, že neberie do úvahy diakritiku znakov, pričom sa môže zmeniť význam slova pri dešifrovaní. Tento nedostatok šifry ju robil v praxi neefektívnou, keďže na jednej pozícii sa môžu nachádzať až 3 znaky.

4 Rozšírenie HCPortal virtuálneho múzea

Ďalším plánom práce bolo rozšírenie sekcie pre virtuálne múzeum dedikované pre japonské a čínske šifry. Táto sekcia je vytvorená ako 3D prostredie, kde sa môže používateľ voľne pohybovať po priestore a čítať alebo pozeráť informácie k jednotlivým systémom. Pohyb je možný s VR okuliarmi aj bez nich, pričom podporované typy VR okuliarov sú zobrazené na Obr. 6.

Headset	Platform	Positional Tracking	Controllers	Controller Positional Tracking
HTC Vive	PC	✓	✓	✓
[Oculus Rift]	PC	✓	✓	✓
Google Daydream	Android	✗	✓	✗
Samsung GearVR	Android	✗	✓	✗
Windows Mixed Reality	PC	✓	✓	✓
[Oculus Go]	Standalone	✗	✓	✗
Vive Focus	Standalone	✗	✓	✗
[Oculus Quest]	Standalone	✓	✓	✓
[Oculus Quest 2]	Standalone	✓	✓	✓

Obr. 6 Podporované VR okuliare pre VR múzeum [4]

Múzeum bolo vypracované s A-frame framework. A-Frame je webový rámec na vytváranie zážitkov virtuálnej reality (VR). Rámec a-Frame je založený na HTML, takže je jednoduché začať. A-Frame však nie je len graf 3D scény alebo značkový jazyk; jadro tvorí výkonný rámec entít a komponentov, ktorý poskytuje deklaratívnu, rozšíriteľnú a skladateľnú štruktúru three.js.

Rámec A-Frame, ktorý bol pôvodne vytvorený v rámci Mozilly a teraz ho udržiavajú spolupracovníci A-Frame v rámci Supermedium, bol vyvinutý ako jednoduchý a zároveň výkonný spôsob vývoja obsahu VR. Ako nezávislý open source projekt sa A-Frame rozrástol na jednu z najväčších VR komunit.

A-Frame podporuje väčšinu náhlavných súprav VR, ako sú Vive, Rift, Windows Mixed Reality, Daydream, GearVR, Cardboard, Oculus Go, a dokonca sa dá použiť aj na rozšírenú realitu. Hoci A-Frame podporuje celé spektrum, jeho cieľom je definovať plne pohlcujúce interaktívne VR zážitky, ktoré presahujú základný 360° obsah a plne využívajú sledovanie polohy a ovládače [4].

Pôvodné múzeum používalo verziu 1.1.0, pričom nová verzia múzea by používala verziu 1.3.0 alebo 1.4.0. Práca avšak ostala na verzii 1.1.0 z dôvodu zrušenia podpory viacerých knižníc pre novšie verzie a kompatibilitu kódu. Aktuálna verzia prehliadky virtuálneho múzea venovanej čínskym a japonským šifram je dostupná na Obr. 7, 8 a 9 v prílohe.

Používateľ okrem rôznych popisov má dostupné aj PDF tabule, kde môže listovať rôzne PDF súbory, ktoré sú spojené s týmito šiframi, či už s ich použitím, alebo ich

dešifrovaním. Taktiež je umožnená aj audio-vizuálna stopa, kde sa používateľ dozvie viac o dešifrovaní vybraných šifíer.



Obr. 7 Ukážka miestnosti a PDF dokumentov venovaných japonským a čínskym šifram vo virtuálnom múzeu.



Obr. 8 Ukážka miestnosti a časovej osi venovanej japonským a čínskym šifram vo virtuálnom múzeu.

Po obsahovej stránke sme sa rozhodli virtuálnu miestnosť rozšíriť o multimediálne prvky vizuálneho a audio-vizuálneho typu. Tieto prvky sú špecifické zameraním na mimoeurópsku kryptografiu, konkrétne japonským a čínskym šifram. Táto oblasť kryptografie je málo preskúmaná nielen v slovenskom jazyku, ale aj v iných európskych jazykoch. Oblasť skúmania sa zameriava na východoázijské jazyky, konkrétne jazyky s logografickým písmom. Pre viac informácií sme sa skontaktovali s odborníkom Satoshi Tomokiyo, ktorý vedie webový portál Cryptiana.

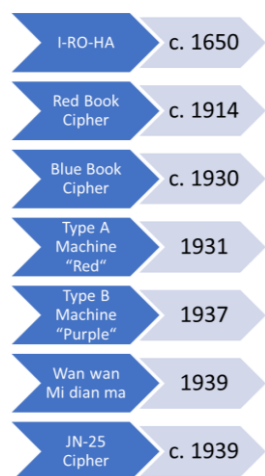
Zvláštnym prípadom je Kórea, keďže v minulosti používali aj čínske, aj japonské šifry, pričom ich písmo nie je logografického pôvodu. V tomto prípade ide o historický zásah, kedy Kórea bola pod nadvládou Qing dynastie a neskôr Japonského cisárstva a nemohli teda vytvoriť vlastné šifrovacie systémy.

Vo virtuálnej miestnosti sa nachádzajú 3D objekty lokalizované po miestnosti, konkrétne sa na nich nachádzajú PDF články popisujúce dešifrovanie JN-25B v 1941, správu o dešifrovaní šifrovacieho stroja typ B, dešifrovanie modrej knižky a aj medzivojnová výpomoc Poľska Japonku v oblasti kryptografii. PDF články sú dostupné v anglickom jazyku pod verejnou doménou. Návštevník tak má k dispozícii rôzne dešifrovacie postupy pre šifry a šifrovacie stroje z obdobia pred druhou svetovou vojnou a počas druhej svetovej vojny na jednom mieste. Dozvie sa napríklad, že Japonci si boli príliš sebavedomí svojimi šiframi pred druhou svetovou vojnou, avšak Holanďania mali ich šifry prelomené už v roku 1934 [5].

Šifry boli zoradené chronologicky od najstaršej (I-RO-HA) po najmladšiu (JN-25), zobrazené na Obr. 10. Medzinárodné publikácie týkajúce sa takýchto šifier nie sú v strednej Európe dostatočne preskúmané a zoskupené na jednom mieste. Našou úlohou bolo nájsť takéto menej známe šifry, naštudovať si ich, spraviť prehľad a následne zosumarizovať ich opis a funkcionality z rôznych zdrojov. Vybraný obsah sme následne chronologicky zoskupili a vytvorili sme časovú os vo virtuálnej miestnosti, kde sme ich časovo priradili. V rámci miestnosti môže návštevník nájsť opisy šifier (JN-25, I-RO-HA), kódovacích knižiek (RED, BLUE, Wan wan mi dian ma), šifrovacích strojov (typ A, typ B), a zároveň aj dešifrovanie počas prvej Sino-Japonskej vojny. Obsah je navyše obohatený o vizuálne ukážky niektorých dostupných šifier [5,6].

Návštevník tu môže nájsť konkrétny príklad popísanej šifry, napríklad JN-25 (1939), ktorá bola významná japonská námorná šifra používaná počas druhej svetovej vojny, predovšetkým na komunikáciu medzi japonským cisárskym námorníctvom a jeho flotilou. Šifra JN-25 bola vynájdená koncom 30. rokov 20. storočia a pozostávala z kódovej knihy a aditívnej zložky. Kódová kniha obsahovala päťmiestne čísla predstavujúce slová, frázy alebo znaky, zatiaľ čo aditívna zložka pozostávala zo série náhodných čísel. Na zašifrovanie správy sa najprv zakódoval otvorený text pomocou kódovej knihy a potom sa použila aditívna zložka spôsobom modulo-3. JN-25 prešiel viacerými revíziami, aby sa zachovala bezpečnosť počas celej vojny. Niektoré variácie boli spálené japonskou armádou na konci druhej svetovej vojny a nie všetky sa dochovali [6,7].

Návštevník sa taktiež dočíta aj o čínskej kódovacej knižke Wan wan Mi dian ma (1939). Čínsky systém Wan wan Mi dian ma (1939), ktorý vyvinul Zhang Yanxiang, pridal ku kódovým číslam vrstvu supersšifrovania, čím zvýšil bezpečnosť kódového systému Ming Mi. Namiesto vytvorenia nových kódových kníh preskupil päť štvormiestnych kódov do štyroch päťmiestnych skupín, čo sťažovalo dešifrovanie pôvodných znakov aj v prípade ich opakovania. Tento proces zahŕňal kódovanie, preskupovanie, obrátenie (alebo použitie permutačných vzorov) a preskupenie späť do 4-miestnych skupín. Metóda zabezpečila, že aj opakujúce sa znaky budú mať pri prenose za následok rôzne skupiny [7].



Obr. 10 Chronologické usporiadanie japonských a čínskych šifier

5 Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť edukačnú pomôcku na predmete Klasické šifry, ktorý sa vyučuje na FEI STU. V práci sme sa zaoberali vybranými klasickými šiframi v edukačnom module pre HCPortal, a taktiež sme sa zaoberali mimoeurópskymi šiframi lokalizovanými v Japonsku a Číne. Tieto šifry nie sú v strednej Európe dostatočne preskúmané, a preto sme sa rozhodli vytvoriť prehľad, ktorý zahŕňal štúdium literatúry či konzultáciu s japonským odborníkom, vytvorili popis niektorých šifier a zároveň sme zakomponovali interaktívne prostredie. V ňom je možné šifrovať a dešifrovať texty svojho výberu na základe podmienok stanovených danou šifrou. Na základe prehľadu sme vytvorili chronologicky usporiadaný obsah pre virtuálne múzeum, kde je možné nájsť šifry, dešifrovanie, PDF dokumenty a audiovizuálne prvky vo forme multimedií. Tento webový portál je dostupný pre všetkých študentov a nadšencov šifier.

Podakovanie

Touto cestou by som rád poďakoval Ing. Eugenovi Antalovi, PhD, za jeho pomoc, cenné rady a všetky poskytnuté materiály, ktoré mi pomohli pri riešení tejto problematiky.

Literatúra

- [1] HCPortal TEAM, 2023. HCPortal. HCPortal [online]. 2023. [cit. 17 April 2023]. Dostupné z: <https://www.hcportal.eu/>.
- [2] O. Grošek, M. Vojvoda, P. Zajac : Klasické šifry. STU 2007.
- [3] Mack, John. (2014). Code Breaking in the Pacific. 10.1007/978-3-319-08278-3.
- [4] A-Frame – make WebVR. A-frame [online], [cit. 16 April 2023]. Dostupné z: <https://aframe.io/>.
- [5] Rijneveld, Joost. "How the Dutch broke the Japanese Blue Code in the late 1930s." (2013).
- [6] Smith, Michael. (2000). The emperor's codes : Bletchley Park and the breaking of Japan's secret ciphers. London ; New York : Bantam Press.
- [7] TOMOKIYO, Satoshi, 2021. Cryptiana. <http://cryptiana.web.fc2.com/> [online]. 12 December 2021. [cit. 16 April 2023]. Dostupné z: <http://cryptiana.web.fc2.com/>.

Príloha

1. Introduction

2. Input setup

3. Step-by-step description of the attack

Input setup

Plaintext *

部隊到着1730

Plaintext must not be empty. If the plaintext includes a character not included in the key (codebook), it will be ignored during the encryption process.

Add Row
Generate values
Generate additives

5	42772	16657	Edit	Delete
6	82990	62962	Edit	Delete
7	55192	94846	Edit	Delete
8	62338	79102	Edit	Delete
9	52369	67291	Edit	Delete
0	99553	68110	Edit	Delete
部隊	64393	94630	Edit	Delete
到着	86833	74044	Edit	Delete
今日	20230	50038	Edit	Delete
行き	95596	12064	Edit	Delete

Encrypt the text using JN-25
Decrypt the enciphered output

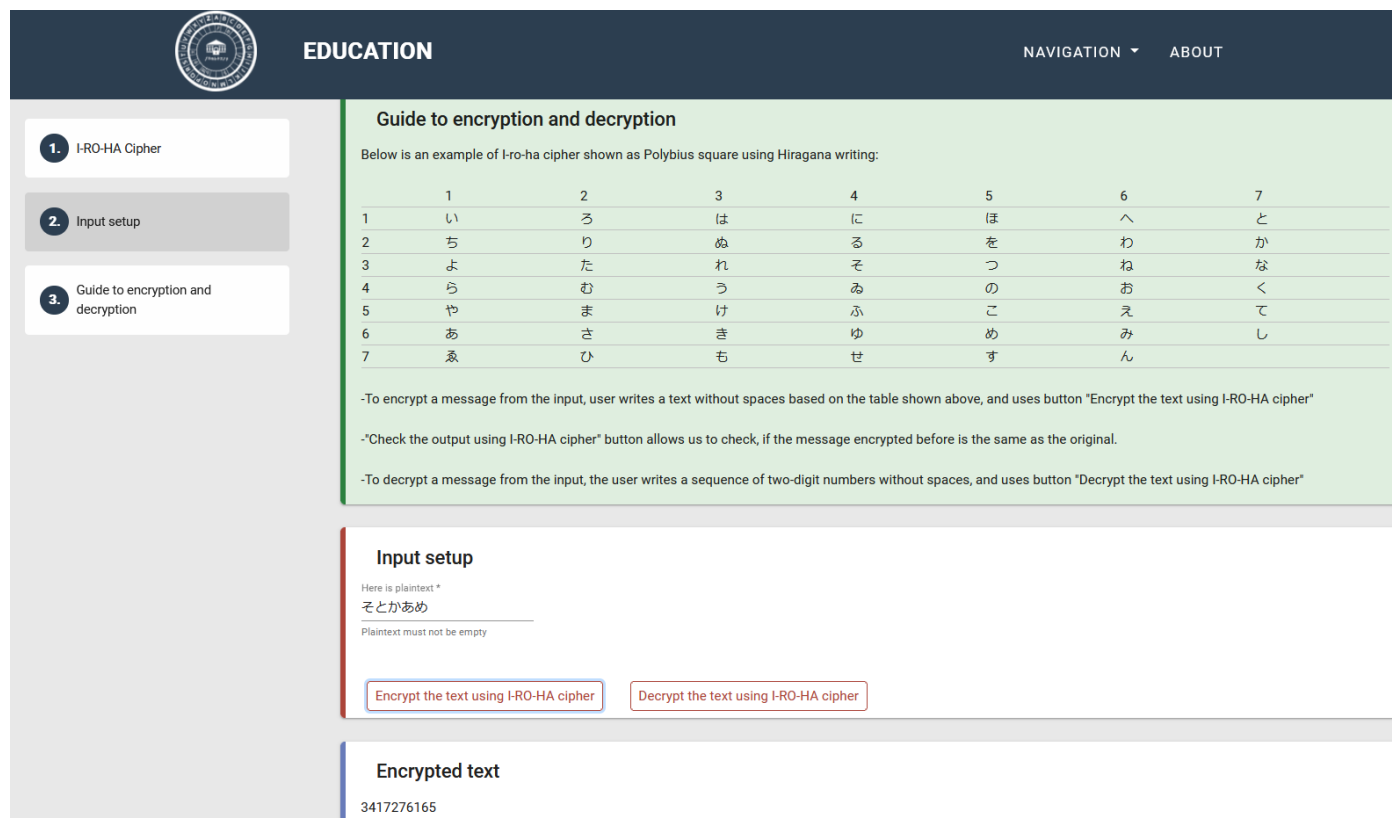
Encrypted text

590236087719399500388588667663

Obr. 2 Ukážka interaktívneho prostredia šifry JN-25.

Substitution	Added superencipher	Modulo	Result
部隊 ->	$64393 + 94630 =$	$159023 \text{ modulo } 100\,000 =$	59023
到着 ->	$86833 + 74044 =$	$160877 \text{ modulo } 100\,000 =$	60877
1 ->	$88750 + 30649 =$	$119399 \text{ modulo } 100\,000 =$	19399
7 ->	$55192 + 94846 =$	$150038 \text{ modulo } 100\,000 =$	50038
3 ->	$29341 + 56545 =$	$85886 \text{ modulo } 100\,000 =$	85886
0 ->	$99553 + 68110 =$	$167663 \text{ modulo } 100\,000 =$	67663

Obr. 3 Ukážka zašifrovania krok-za-krokom pre daný vstupný text na šifre JN-25.



Obr. 5 Ukážka interaktívneho prostredia šifry I-RO-HA.



Obr. 9 Ukážka chronologicky usporiadaných šifier vo Virtuálnom múzeu pre HCPortal

Sekcia 2

Mechatronika, Robotika a kybernetika

Riadenie laboratórneho systému vzduchovej levitácie

Richard Schwarz

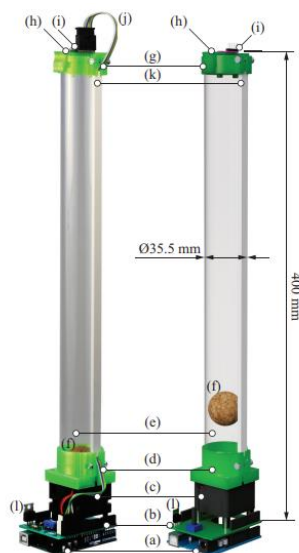
Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave

xschwarzr@stuba.sk

Abstrakt – Cieľom článku je overenie metód modelovania a návrhu riadenia na reálnom laboratórnom zariadení vzduchovej levitácie (Floatshield). Článok prezentuje aplikáciu metód identifikácie parametrov linearizovaného matematického modelu zariadenia FloatShield, využitie týchto parametrov na navrhnutie stavového regulátora s integračnou zložkou pomocou metódy rozmiestňovania pólov a následné otestovanie tohoto regulátora v simulácii na linearizovanom modeli a aj na reálnom zariadení.

1 Úvod

Zariadenie Floatshield je typu SISO single-input single-output, ktorého vstupná veličina je PWM signálom riadené napätie vstupujúce do BLDC motora, ktorý poháňa ventilátor a tým riadi rýchlosť vetra v trubici. Rýchlosť vetra v trubici sa spolu s aerodynamickými vlastnosťami levitujúceho objektu - lopty podieľa na sile, ktorá pri hmotnosti lopty vyrovná pôsobenie gravitačného zrýchlenia. Výstupom zariadenia je poloha, respektíve výška lopty, ktorá je meraná infračerveným TOF senzorom. [1]



Obr. 1. Zariadenie FloatShield [1]

Samotné zariadenie je postavené na zariadení Arduino Mega 2560 s PCB doskou na ktorej je pripevnený ventilátor s PVC trubicou a senzorom na meranie výšky lopty. Na spustenie je potrebný Simulink Support Package for Arduino Hardware a Simulink bloky vytvorené na komunikáciu Simulinku so zariadením Floatshield, ktoré sú dostupné na Githubu. [3]

V tejto práci budeme skúmať a aplikovať alternatívne metódy identifikácie parametrov matematického modelu zariadenia pomocou uzavretej regulačnej slučky s PI regulátorom, úpravy blokovej schémy na odvodenie prenosovej funkcie danej slučky a jej následnú identifikáciu prostredníctvom System Identification Toolboxu. Pre identifikovaný model následne navrhne regulátor pre reguláciu výšky lopty. Použitá je jedna z mnohých možných alternatívnych metód regulácie. Ide o stavový spätnoväzobný regulátor s integračnou zložkou a deterministickým dynamickým rekonštruktorom stavov navrhnutý metódou rozmiestňovania pólov.

2 Lineárny matematický model zariadenia FloatShield

Na základe opisu dynamického systému v časti 1 sa dajú sformulovať diferenciálne rovnice v tvare stavového opisu s tromi stavovými veličinami, [1]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2 \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{1}{2m} C_d \rho A (x_3(t) - x_2(t)) |x_3(t) - x_2(t)| - g \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{Ku(t) - x_3(t)}{\tau_1} \end{aligned} \quad (1)$$

x_1 je poloha lopty vo valci, x_2 je jej rýchlosť a x_3 je rýchlosť vzduchu vo valci. Konkrétne hodnoty parametrov sú v tabuľke 1.

Tab. 1. Fyzikálne veličiny, [1]

č.	Parameter	Hodnota
1	m Hmotnosť lopty	$3.83 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
2	A Priečok lopty	$5.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
3	C_d Koef. odporu vzduchu	0.74
4	ρ Hustota vzduchu	1.23 kgm^{-3}
5	g Gravitačné zrýchlenie	9.81 ms^{-2}

Druhá rovnica, ktorá popisuje rýchlosť lopty x_2 je nelineárna. Na to, aby sa dal efektívne navrhnuť regulátor je potrebné túto rovnicu linearizovať v pracovnom bode. Zvolený pracovný bod predstavuje rovnovážny bod, kde je sila, vytvorená prúdom vzduchu od ventilátora v rovnováhe s gravitačnou silou. To znamená, že sa nemusí nachádzať v jednej konkrétnej výške y , respektíve polohe lopty vo valci, ale

dôjde k nemu vtedy, keď lopta nemení rýchlosť, lebo sily, ktoré na ňu pôsobia sú v rovnováhe. Linearizáciou vznikne linearizovaná sústava diferenciálnych rovníc, ktorú je možné zapísať do formy matic stavového systému.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2 \\ \dot{x}_2 &\cong -\frac{1}{\tau_2}\Delta x_2 + \frac{1}{\tau_2}\Delta x_3 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{\tau_1}x_2 + \frac{K}{\tau_1}u \end{aligned} \quad (2)[1]$$

τ_1 a τ_2 sú časové konštanty systému a K je jeho zosilnenie. Všetky tri parametre je potrebné identifikovať.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_2} & \frac{1}{\tau_2} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_1} & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K}{\tau_1} \end{bmatrix} \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0] & D &= [0] \end{aligned} \quad (4)[1]$$

Stavový model (2) možno opísať v maticovom tvare, vyjadruje správanie linearizovaného systému.

Uvedený linearizovaný systém je možné vyjadriť aj pomocou prenosovej funkcie.

$$G = \frac{K}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5)$$

Ide o prenosovú funkciu tretieho rádu s jedným pólom v 0, čiže dynamický systém, ktorý opisuje, je na hranici stability. Dôvod prečo obsahuje integrátor $\frac{1}{s}$ navyše je ten, že výstup tejto funkcie je poloha lopty x_1 , ktorá je integrál jej rýchlosti x_2 , čo je opísané v prvej rovnici v (1) aj v (2).

2.1 Identifikácia parametrov.

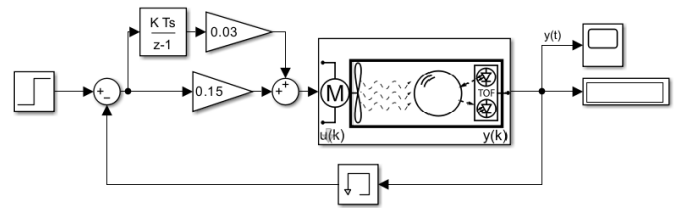
Kvôli integračnému charakteru dynamického systému nie je možné jednoducho model zariadenia FloatShield identifikovať jednoducho z prechodovej charakteristiky samotného zariadenia. V takomto prípade by sa loptička buď neodlepila od spodnej mriežky nad ventilátorom, alebo ak by bola prekonaná gravitačná sila, tak by stúpala až po strop valca.

Preto treba dynamiku systému merať v uzavretej slučke. Na tento účel bol zvolený PI regulátor s prenosovou funkciou Gr .

$$Gr = \frac{(Ps + I)}{s} \quad (6)$$

Parametre $I=0,03$ a $P=0,15$ boli zvolené odhadom na základe predchádzajúcich pokusov tak, aby mal regulačný

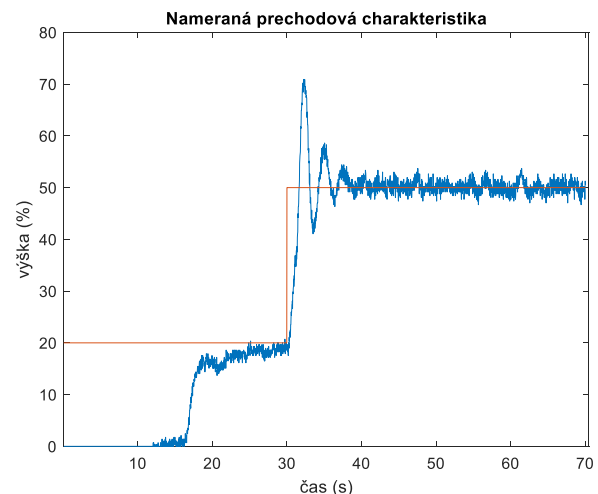
pochod rozumný priebeh. Teda aby nebol príliš rýchly ani pomalý a aby nemal príliš veľké prerégulovanie.



Obr. 2. Zapojenie zariadenia Floatshield s PI regulátorom

Pri bloku reprezentujúcom zariadenie Floatshield, ktorý bol použitý, je výstup z infračerveného senzoru zariadenia, teda poloha loptičky reprezentovaný v percentách od 0% do 100% výšky vzduchového tunela v ktorom sa nachádza. Teda aj žiadaná hodnota sa musí pohybovať v intervale 0-100.

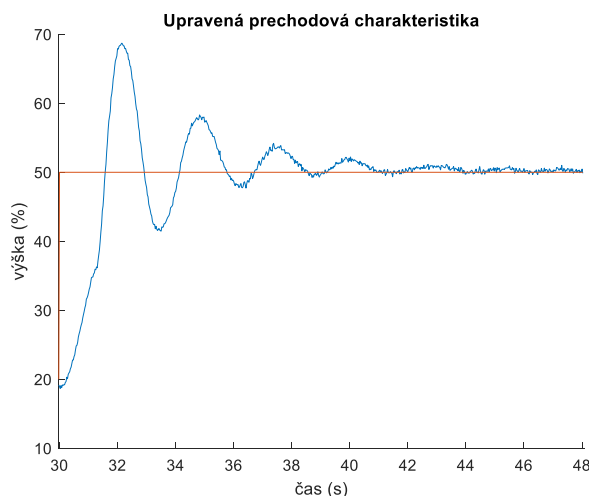
Skok, ktorý sa bude merať, potom nebude jednotkový, ale bude na vyššiu hodnotu. Konkrétne uvažujeme skokovú zmenu z ustálenej hodnoty 20 na 50. Skok úmyselne nie je realizovaný z 0, lebo v tejto pozícii hmotnosť loptičky nie je podporovaná prúdením vzduchu, ale leží priamo na kryte ventilátoru. Ten by sa musel najskôr roztočiť dostatočne na to, aby ju prúd vzduchu dokázal zdvihnúť, čo by malo vplyv na prechodový dej. Okrem toho, kvôli relatívne malému parametru I , regulátoru istú dobu trvá, kým integračná zložka narastie do takej miery, aby bol akčný zásah schopný loptu zdvihnúť, čo je viditeľné aj na obrázku 3, kde sa nameraná výška lopty „pohybuje“ po dne valca až do približne 15. sekundy. V prvých sekundách prevádzky prebieha aj kalibrácia zariadenia, čiže motor FloatShieldu sa roztočí na maximum, aby odmeral výstup z IR senzora korešpondujúci hodnote 0 a hodnote 100.



Obr. 3. Priebeh riadenej veličiny pri použití PI regulátore

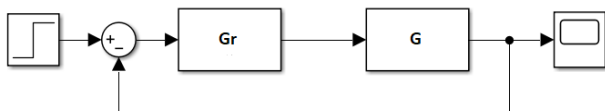
Toto meranie bolo opakované pätnásťkrát a namerané prechodové charakteristiky boli sprimerované. Tým sa čiastočne odstráni šum z merania aj turbulentného prúdenia vzduchu okolo loptičky a zároveň sa tým odstráni aj vplyv prostredia, alebo aj prípadné iné neočakávané anomálie, ktoré by mohli skresliť identifikáciu. Následne sa z dát odstráni

prvých 30s a oblasť kde je systém už ustálený. Výsledná upravená prechodová charakteristika je na obrázku 4.



Obr. 4. Upravený priebeh riadenej veličiny použitý na identifikáciu systému.

Nameraná prechodová charakteristika nepatrí hľadanej prenosovej funkcii systému, ale prenosovej funkcii uzavretého regulačného obvodu (URO), kde je hľadaný systém iba jedna z jeho častí a okrem nej obsahuje aj PI regulátor a spätnú väzbu.



Obr. 5. Schéma uzavretého regulačného obvodu

Prenosová funkcia URO sa vytvorí na základe vzorca pre výpočet prenosovej funkcie obvodu so zápornou spätnou väzbou. Napriek tomu, že v PI regulátore bol použitý diskretný integrátor, jeho perióda vzorkovania je dostatočne malá na to, aby sa s ním dalo počítať ako keby bol spojitý. Žiadny spojité blok na tomto zariadení totiž nie je možné implementovať.

$$G_{uro} = \frac{Gr \cdot G}{1 + Gr \cdot G} = \frac{\frac{K(Ps + I)}{s^2(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}}{1 + \frac{K(Ps + I)}{s^2(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}} \quad (7)$$

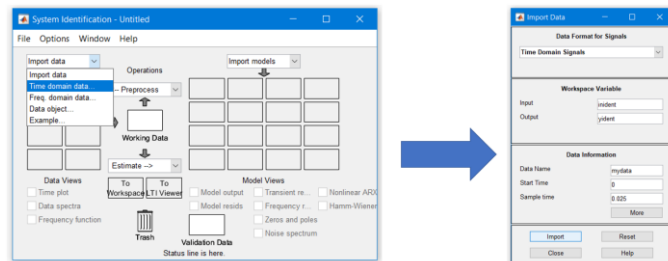
$$= \frac{K(Ps + I)}{\tau_1 \tau_2 s^4 + (\tau_1 + \tau_2)s^3 + s^2 + K(Ps + I)}$$

Z odvodennej prenosovej funkcie URO, respektíve z jej tvaru vyplýva, že prenosová funkcia do ktorej hľadáme parametre je štvrtého rádu a má 4 póly a jednu nulu.

2.2 System Identification Toolbox

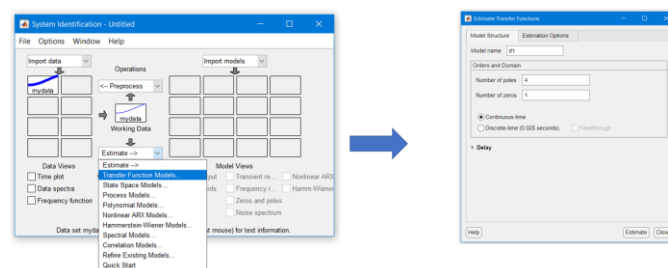
Na odhad parametrov prenosovej funkcie URO z nameranej výstupnej prechodovej charakteristiky a nameraného vstupu bol použitý System Identification Toolbox v Matlabe.

Do toolboxu, ktorý sa spustí buď príkazom ident, alebo cez príslušnú aplikáciu Matabu sa importujú upravené dáta ako „Time domain data“. Následne sa v okne, ktoré sa otvorí, vyberú vektory obsahujúce vstupné a výstupné dáta a perióda vzorkovania. Počiatočný čas sa nechá 0, lebo dáta už boli upravené. Tlačidlom import sa dáta importujú do Toolboxu.



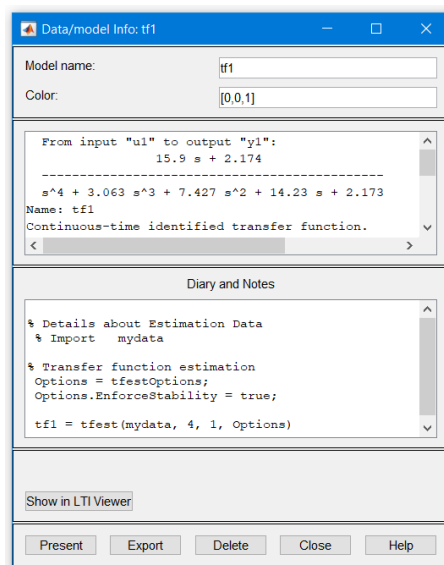
Obr. 6. Výber vstupných dát.

V ďalšom kroku sa vyberie prenosová funkcia. V novom okne sa špecifikuje tvar prenosovej funkcie. Z odvodennej prenosovej funkcie URO vyplýva, že hľadaná prenosová funkcia má 4 póly a jednu nulu.



Obr. 7. Výber prenosovej funkcie.

Výsledok identifikácie sa objaví v novom okne. Z tejto získanej prenosovej funkcie URO je možné odvodiť prenosovú funkciu Floatshieldu.



Obr. 8. Identifikovaná prenosová funkcia.

2.3 Odvodenie parametrov systému z prenosovej funkcie URO

Z identifikačného toolboxu sme získali prenosovú funkciu:

$$G_{uro} = \frac{15,9s + 2,174}{s^4 + 3,063s^3 + 7,427s^2 + 14,23s + 2,173}$$

Táto funkcia má rovnaký tvar ako prenosová funkcia odvodená v predchádzajúcej časti:

$$G_{uro} = \frac{KPs + KI}{\tau_1\tau_2s^4 + (\tau_1 + \tau_2)s^3 + s^2 + KPs + KI}$$

Do tejto prenosovej funkcie ale ešte nemôžeme priamo dosadiť identifikované číselné hodnoty za neznáme, lebo identifikovaná hodnota koeficientu 7,427 v menovateli pri s^2 sa nezhoduje s jediným známym koeficientom 1 pri s^2 v odvodennej prenosovej funkcii. Upravíme preto identifikovanú prenosovú funkciu predelím čitateľa aj menovatela práve týmto koeficientom 7,427. Vznikne nasledovná prenosová funkcia:

$$G_{uro} = \frac{\frac{15,9}{7,427}s + \frac{2,174}{7,427}}{\frac{1}{7,427}s^4 + \frac{3,063}{7,427}s^3 + s^2 + \frac{14,23}{7,427}s + \frac{2,173}{7,427}}$$

Z tejto prenosovej funkcie sa na základe odvodennej prenosovej funkcie dajú priamo vypočítať časové konštanty τ_1 a τ_2 a aj zosilnenie K .

Časové konštanty τ_1 a τ_2 sa vypočítajú cez koeficienty v menovateli pri s^4 a s^3 , kde je známy ich súčet a súčin a vypočítajú sa sústavou rovníc.

$$R1: \tau_1 \cdot \tau_2 = \frac{1}{7,427}$$

$$R2: \tau_1 + \tau_2 = \frac{3,063}{7,427}$$

$$\tau_1, \tau_2 = |0,2062 \mp 0,304i| = 0,3673$$

Časové konštanty vyšli komplexne združené, no tie na rozdiel od pólov komplexne združené byť nemôžu. Ich hodnotu teda uvažujeme rovnú ich modulu, teda ich absolútnej hodnote.

Zosilnenie K sa vypočíta z koeficientov v menovateli pri s . P je koeficient proporcionálnej zložky z PI regulátora, ktorej hodnota je známa.

$$KP = \frac{14,23}{7,427}$$

$$K = \frac{14,23}{7,427} \cdot \frac{1}{0,15} \approx 11$$

Výsledná prenosová funkcia lineárneho modelu Floatshieldu je teda:

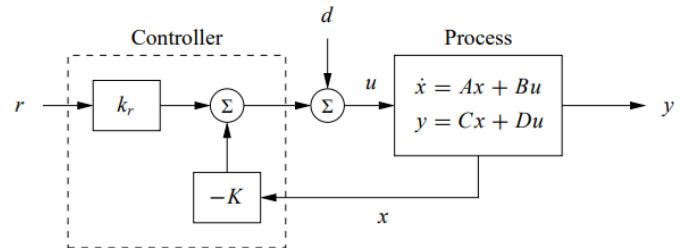
$$G = \frac{11}{s(0,3673s + 1)(0,3673s + 1)} = \frac{11}{\frac{1}{7,427}s^3 + \frac{3,063}{7,427}s^2 + s} \quad (8)$$

3 Stavový regulátor

Princíp stavového riadenia podobne ako pri iných regulátoroch spočíva vo využití spätnej väzby. Od regulátorov,

ako PID sa líši tým, že namiesto výstupu sa v spätnej väzbe vracia vektor x stavových premenných, z ktorých sa pomocou vektora spätnoväzobných zosilnení K vytvorí jedna hodnota, ktorá spolu so žiadanou hodnotou w vytvára akčný zásah, ktorý riadi systém.

$$u = -Kx + w \quad (9)$$



Obr. 9. Schéma stavovej spätnej väzby. (na obrázku je žiadaná veličina označená ako r) [2]

3.1 Dynamický pozorovateľ stavov

Priamo merať všetky stavové veličiny väčšinou nie je možné alebo praktické. V prípade zariadenia, ktoré je predmetom tejto práce sa meria iba poloha loptičky. Ostatné stavy sa dopyčujú pomocou dynamického pozorovateľa stavov. Spojitý stavový pozorovateľ je stavový model riadeného systému, ktorý je upravený tak, aby okrem akčného zásahu bral do úvahy aj chybu odhadu výstupnej veličiny. Táto chyba sa označuje symbolom $\tilde{x} = (y - C\hat{x})$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (10)$$

$\hat{x}$ v tejto rovnici predstavuje vektor odhadovaných stavov; prenasobený vektorom C vytvorí odhadovaný výstup systému, ktorý je už skalár, [2]. V tomto konkrétnom prípade je vektor $C = [1 \ 0 \ 0]$ a prvý stav je zároveň aj odhad polohy lopty. Pridaním $L(y - C\hat{x})$ sa vytvorí ďalšia spätná väzba, ktorá je proporčná k veľkosti chyby odhadu cez zosilnenie L , ktoré je v prípade SISO systému vektor. Vyjadruje ju rovnica:

$$\tilde{\dot{x}} = (A - LC)\tilde{x} \quad (11)[2]$$

Ak je vektor L zvolený tak, aby matica $(A - LC)$ mala negatívne póly, tak chyba merania $\tilde{x}$ bude konvergovať k nule. Rýchlosť tejto konverencie je závislá práve od týchto pólov pozorovateľa, ktoré by mali byť ďalej od imaginárnej osi ako póly obvodu samotného regulátora, aby bol pozorovateľ rýchlejší.

3.2 Integračná zložka regulátora

Lineárny matematický model systému FloatShield bol vytvorený s istou neurčitosťou a tým pádom nie je vhodné navrhovať predkompensátor. Namiesto toho sa do stavového regulátora pridá ešte jedna spätná väzba s integrálnou zložkou,

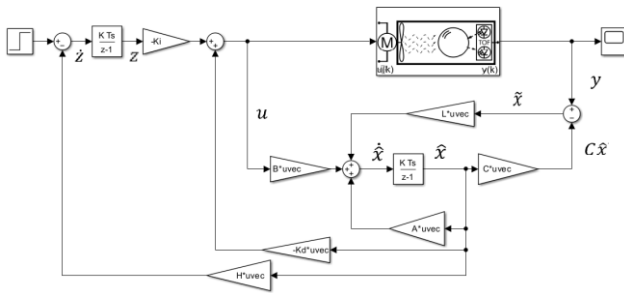
ktorá trvalú regulačnú odchýlku odstráni podobne ako pri klasickom PI regulátore tým, že bude rásť dovtedy kým tá odchýlka bude nenulová. Stavový systém sa rozšíri ešte o jeden stav, ktorý predstavuje regulačnú odchýlku.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ax + Bu \\ y - w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ax + Bu \\ Cx + w \end{pmatrix} \quad (12)[2]$$

Stav z je integrál regulačnej odchýlky. V ustálenom stave platí, že $\dot{z} = 0$, lebo $y = w$. Spätná väzba stavového PI regulátora sa navrhne ako pri klasickom stavovom regulátore s tým, že na veľkosť akčného zásahu má okrem stavov vo vektore x vplyv aj stav z .

$$u = -Kx - Ki z \quad (13)$$

Uvedená štruktúra sa nazýva dynamický kompenzátor, lebo má vlastnú vnútornú dynamiku, ktorá je súčasťou dynamiky regulátora.



Obr. 10. Schéma regulačného obvodu so spojitým pozorovateľom stavu a stavovým PI regulátorom

3.3 Rozšírenie stavových matíc

Matice systému sa rozšíria, lebo musia obsiahnuť aj nový stav z . V pozorovateli zostanú pôvodné matice, lebo stav z nie je potrebné odhadovať. Rozšírené matice sa použijú iba na výpočet vektora parametrov regulátora K , ktorý na poslednom mieste obsahuje aj koeficient Ki pre integrálnu zložku, ktorá sa z neho oddelí a v schéme sa umiestni na vlastné miesto.

$$A_{roz} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad B_{roz} = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} \quad C_{roz} = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$A_{roz} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{0.3673} & \frac{1}{0.3673} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{0.3673} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B_{roz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 11 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{roz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4 Metóda rozmiestňovania pólov (pole placement)

Rozmiestňovanie pólov je metóda, pri ktorej sa priamo určujú hodnoty pólov URO. Dosiahne sa to tak, že vektor (spätnoväzobná matica) K sa zvolí tak, aby vlastné hodnoty matice uzavretého obvodu $A_{cl} = (A - BK)$ boli rovné zvoleným pólom. Pre spojité aj pre diskrétné systémy je na výpočet K v Matlabe vhodná funkcia *acker*. Tou istou funkciou sa vypočíta aj vektor L .

$$P = \begin{bmatrix} -1.3 + 0.1i \\ -1.3 - 0.1i \\ -1.5 + 0.1i \\ -1.5 - 0.1i \end{bmatrix}$$

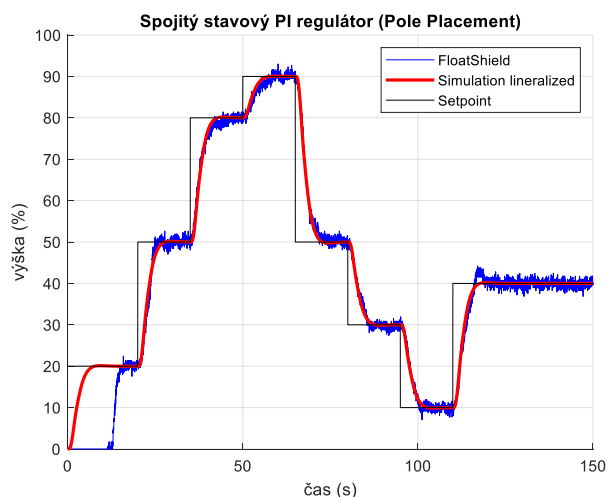
Experimentálne boli zvolené dva rôzne komplexne združené póly nachádzajúce sa blízko pri sebe tak, aby bol regulátor primerane rýchly, respektíve dostatočne pomalý aby aktuátor v zariadení FloatShield reálne stíhal reagovať na hodnotu a rýchlosť zmeny akčného zásahu a komplexná zložka je zámerne malá aby výstup pri skoku na žiadanú hodnotu nebol kmitavý.

$$P_{Poz} = \begin{bmatrix} -20 + i \\ -20 - i \\ -20 \end{bmatrix}$$

Póly pozorovateľa boli zvolené tak, aby boli 10-20 krát väčšie ako póly regulátora. Príliš rýchly pozorovateľ spôsobuje na reálnom zariadení nestabilitu systému rovnako ako príliš pomalý.

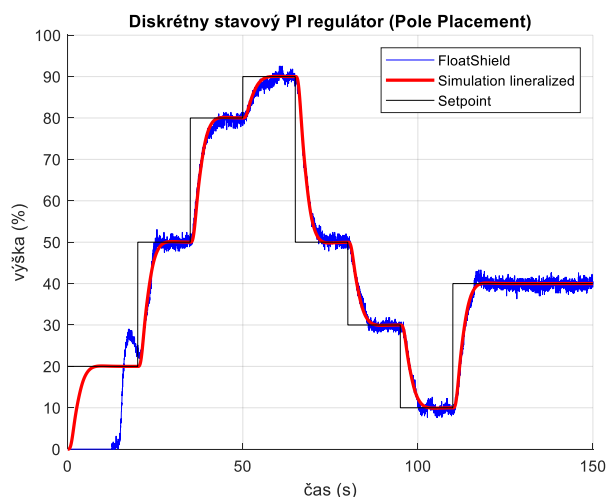
3.5 Výsledky zo simulácie a reálneho zariadenia

Simulácia aj reálny experiment sme urobili na sérii rovnakých kladných a záporných skokov. Simulačná schéma je identická so schémou na obr. 11, ale namiesto bloku zariadenia FloatShield je použitá prenosová funkcia reprezentujúca jeho linearizovaný model.



Obr. 11. Porovnanie regulácie spojitým stavovým regulátorom v simulácii a na reálnom zariadení

Okrem spojitého regulátora bol metódou rozmiestňovania pólov navrhnutý a otestovaný aj diskretný regulátor s rovnakými parametrami.



Obr. 12. Porovnanie regulácie diskretným stavovým regulátorom v simulácii a na reálnom zariadení

môže, ale nemusí dosiahnuť lepšie výsledky ako deterministický pozorovateľ.

Rozsah tohoto článku je obmedzený iba na metódu rozmiestňovania pólov, no zariadenie bolo overené aj s týmito metódami riadenia, ktoré boli na zariadení úspešne implementované. Riadenie FloatShieldu pomocou Simulinku je po úvodných krokoch opísaných v návode rovnako užívateľsky jednoduché ako bežná simulácia. Tým pádom je zariadenie vhodné na vyučovanie aj napriek tomu, že identifikácia parametrov je časovo náročná a množstvo blokov v Simulinku, ktoré sa dajú na zariadenie implementovať je obmedzené.

Literatúra

- [1] TAKÁCS, G, et al. 2020. FloatShield: An open source air levitation device for control engineering education. In: *IFAC-PapersOnLine*, 53.2: 17288-17295.
- [2] ÅSTRÖM, K. J. - MURRAY, R. M. 2021. *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton university press.
- [3] <https://github.com/gergelytakacs/AutomationShield/blob/master/simulink/FloatLibrary.slx>

4 Záver

Oba regulátory dosiahli uspokojivé výsledky, ktoré sa približne zhodovali so simuláciou. Integrovačnou zložkou sa u oboch z nich podarilo odstrániť regulačnú odchýlku.

Okrem metódy rozmiestňovania pólov je možné navrhnuť stavový regulátor aj ako formu optimálneho riadenia metódou LQ, pri ktorej sa dynamika regulátora namiesto priameho zadania pólov riadi pomocou váhových matic, ktorými je možné vplývať na jednotlivé stavy a aj na akčný zásah individuálne. Ako pozorovateľa stavov je možné použiť Kalmanov filter, ktorý v závislosti od toho ako bol nastavený

Riadenie rakety využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou

Oliver Halaš¹

¹Ústav Robotiky a kybernetiky, FEI STU v Bratislave

²Ústav Robotiky a kybernetiky

xhalaso@stuba.sk

Abstrakt – Riadenie rakety pomocou neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou (NEAT) je predmetom tejto práce. Cieľom bolo využiť NEAT v scenári proti-raketovej obrany, konkrétne v systéme ABM. Boli navrhnuté dva scenáre. V prvom scenári sa útočná raketa pohybovala lineárne bez prekážok, kde sa NEAT dokázal natréňovať tak, aby úspešne zasiahla útočnú raketu. V druhom scenári sa medzi anti-raketu a útočnú raketu umiestnili prekážky. Aj na tento scenár sa NEAT dokázal natréňovať a overil sa tak jeho úspech pri riešení zložitejších úloh. Táto práca ukazuje, že použitie NEAT je funkčné a efektívne aj v zložitejších scenároch, ako je proti-raketová obrana

1 Úvod

Cieľom tejto práce je navrhnúť algoritmy riadenia pre raketu zem-vzduch, ktorá má zasiahnuť letiaci cieľ využitím neuro-evolúcie s rozširujúcou topológiou (ang. Neuroevolution of augmenting topologies - NEAT). Raketa sa pohybuje v 3D priestore, vníma cieľ a snaží sa ho zasiahnuť. Riadenie je realizované umelou neurónovou sieťou a učenie siete je uskutočňované evolučným algoritmom. Táto problematika je dôležitá z hľadiska zlepšenia presnosti strelby, znižovania kolaterálnych škôd a zefektívnenia protivzdušnej obrany.

V práci sa venujeme štúdiu air-defence system (ADS) a jeho rôznym fázam, ako aj základným prvkov anti-rakety. Potom sa budeme venovať algoritmom NEAT, jeho popisu, jedinečným vlastnostiam, porovnaniu s konvenčnou neuro-evolúciou a dôvodom prečo je vhodné použiť NEAT na riešenie tohto problému.

Realizácia projektu bude zahŕňať vývoj simulačného prostredia v Unity game engine, implementáciu 6 stupňov voľnosti pre raketu a anti-raketu a využitie UnitySharpNEAT pre tréning neurónových sietí [1].

2 Proti-raketový obranný systém

Riadená raketa (ang. missile) je vojenský projektíl navrhnutý tak, aby zasiahlo cieľ na zemi, vo vzduchu alebo na mori s vysokou presnosťou a účinnosťou. Riadené rakety sú vybavené systémom riadenia, ktorý zahŕňa navigáciu, riadenie pohybu a sledovanie cieľa, čo umožňuje rakete prispôbiť svoj let podľa

potreby [2]. Riadené rakety môžu byť klasifikované podľa ich dosahu, rýchlosti, typu pohonu a účelu použitia.

Anti-riadená raketa (ang. anti-missile) je druh obranného systému, ktorý je navrhnutý na zničenie alebo odchylenie útočných riadených rakiet pred tým, ako zasiahnu svoj cieľ. Anti-riadené rakety pracujú na základe detekcie, sledovania a zasiahnutia útočných rakiet pomocou rôznych technológií, ako sú radary, infračervené senzory a elektromagnetické systémy. Obranné systémy zahŕňajú pozemné a námorné zariadenia, ako aj systémy založené vo vzduchu a vo vesmíre. U anti-rakety je dôležité aby jej rýchlosť bola väčšia ako útočnej rakety aby ju dokázala eliminovať v požadovanej fáze letu. [3].

Obe technológie, riadené rakety a anti-riadené rakety, sú výsledkom pokroku vo výskume a vývoji v oblasti aerodynamiky, navigácie, senzorov, riadenia a pohonu. Tieto systémy sú dôležité zložky súčasných vojenských stratégií a ich vývoj pokračuje s cieľom zlepšiť ich schopnosti a zabezpečiť efektívnejšiu obranu proti novým hrozbám [4].

Systém proti-raketovej obrany (ang. Missile defense system - MDS) je systém, ktorý je navrhnutý na ochranu územia pred raketami, ktoré sú vyslané konvenčnými zbraňami. Tento systém sa skladá z radaru, komunikačných systémov, kontrolných centier a odpaľovacích zariadení, ktoré sú navrhnuté na zachytenie a zničenie rakiet [5]. Existujú rôzne druhy systémov proti-raketovej obrany, ktoré sa používajú na zachytenie rôznych druhov rakiet v rôznych fázach letu. Napríklad, existujú systémy, ktoré sú navrhnuté na zachytenie rakiet v počiatočnej fáze letu, keď sa raketa ešte len odpaľuje od nosného raketového motora. Existujú aj systémy, ktoré sú navrhnuté na zachytenie rakiet v konečnej fáze letu, keď sa raketa približuje k cieľu. [6]

V závislosti od konkrétneho systému, sa používajú rôzne metódy na zachytenie a zničenie rakiet. Napríklad, niektoré systémy používajú kinetické strely, ktoré narazia do rakety a zničia ju silou nárazu [7]. Iné systémy používajú laserové zbrane na zničenie rakety [8].

Systém proti-raketovej obrany typu Anti-balistic missile (ABM) je špecifická podskupina proti-raketových obranných systémov (MDS) zameraná na zničenie balistických rakiet [6]. Balistické rakety sú rakety, ktoré majú predvídateľnú dráhu letu po vypustení a sú často používané na dlhé vzdialenosti, niekedy aj pre jadrové zbrane [5]. ABM systémy sú navrhnuté tak, aby detegovali, sledovali a zničili tieto balistické rakety v počiatočnom štádiu letu ešte predtým, ako by mohli dosiahnuť

svoj cieľ.

Hlavný rozdiel medzi systémom proti-raketovej obrany (MDS) a anti-balistic missile (ABM) spočíva v ich zámere. Kým MDS je širší pojem, ktorý zahŕňa rôzne druhy systémov na obranu proti rôznym typom riadených rakiet, vrátane krátkého, stredného a dlhého dosahu, ABM sa špecificky zameriava na obranu proti balistickým raketám [6]. Tým pádom ABM systémy sú jedným z typov MDS systémov, ktoré zahŕňajú technológie špecificky navrhnuté na riešenie hrozieb balistických rakiet.

Funkcia systému zahŕňa nasledujúce kroky Obr.??:

1. Vystrelenie nepriateľskej rakety: Systém musí byť schopný detegovať a identifikovať nepriateľskú raketu v počiatočnom štádiu letu.
2. Detekcia rakety radarom: Systém používa radary na detekciu a sledovanie nepriateľskej rakety.
3. Predbežná trajektória: Systém vytvára predbežnú trajektóriu nepriateľskej rakety pomocou informácií získaných radarom.
4. Vystrelenie anti-rakety: Systém vystrelí anti-raketu, ktorá sa bude snažiť stretnúť nepriateľskú raketu.
5. Priblíženie anti-rakety k nepriateľskej rakete: Anti-raketa sa približuje k nepriateľskej rakete, aby ju mohla neutralizovať. [5, 6, 9]

Existuje niekoľko rôznych metód na neutralizáciu rakety, vrátane výbuchu, ktorý rozbiť raketu na kusy alebo použitím mračna šrapnelu, ktoré rozptýli raketu tak, že sa stáva neškodnou. Dostatočná vzdialenosť priblíženia anti-rakety k cieľu by sa líšila v závislosti od konkrétnej metódy neutralizácie a typu rakety. Existuje niekoľko rôznych druhov anti-rakiet, ktoré sa používajú na neutralizáciu nepriateľských rakiet. Jeden druh sú kinetické anti-riadené rakety, ktoré sa približia k nepriateľskej rakete a zasiahnu ju kinetickou energiou - teda priamym nárazom, bez potreby ďalšej detonácie.

2.1 Fázy Anti-riadenej rakety

Fázy Anti-riadenej rakety zahŕňajú tri hlavné etapy: fáza výstrelu (Boost), stredná fáza (Midcourse) a fáza konečného útoku (Terminal).

- Fáza výstrelu (Boost) je prvá fáza letu anti-riadenej rakety, ktorá sa začína vypustením rakety a nasmerovaním na útočnú raketu.
- Stredná fáza (Midcourse) nasleduje po fáze výstrelu a predstavuje väčšinu letu anti-riadenej rakety. V tejto fáze sú proti-raketové systémy zamerané na sledovanie rakety pomocou radarov a satelitov, aby získali informácie o jej dráhe a identifikovali optimálne miesto pre zásah.
- Fáza konečného útoku (Terminal) je posledná fáza letu anti-rakety. V tejto fáze sa anti-riadená raketa prispôbiť pozícií cieľa a útočí na nepriateľskú raketu priamym stretnutím. Tento bod je kritický pre anti-riadené rakety, pretože musia neutralizovať útočnú raketu v tejto fáze letu. Neutralizácia

je potom realizovaná pri kinetických streľách, priamym kinetickým nárazom do útočnej rakety, ktorá sa nachádza v strednej fáze letu.

V konečnej fáze útoku je kľúčové rýchle a adaptívne reagovanie, pretože zostáva len málo času na zničenie útočnej rakety pred dosiahnutím jej cieľa. [6]

3 NEAT

Neuro-evolúcia je evolučný algoritmus, používaný v oblasti strojového učenia na tréning neurónových sietí. Skladá sa z kombinácie neurónovej siete a genetického algoritmu. Genetický algoritmus využíva princípy evolúcie a genetiky, na hľadanie optimálneho riešenia v podobe váh a biasov, pre jednotlivé neuróny v neurónovej sieti [10]. Táto metóda umožňuje efektívne nájsť optimálne hodnoty váh a biasov pre neurónovú sieť, čo vedie k lepšiemu výsledku tréningu [10]. Neuro-evolúcia je často používaná v aplikáciách, ako sú roboti, hry a problémy v oblasti triedenia dát [11].

Poznáme dve základné metódy, a to konvenčnú neuro-evolúciu a neuro-evolúciu s rozširujúcou topológiou siete. Konvenčná neuro-evolúcia (CNE) používa fixnú topológiu neurónovej siete, pre evolúciu parametrov siete [12]. Narozdiel od toho neuro-evolúcia s rozširujúcou topológiou siete (NEAT) generuje aj topológiu siete súčasne s váhami a biasmi [13].

Obidve metódy sa používajú pre rôzne úlohy. Konvenčná neuro-evolúcia sa často používa pre jednoduchšie úlohy alebo pre úlohy, kde je dôležitá rýchlosť výpočtu. NEAT sa často používa pre zložitejšie úlohy alebo pre úlohy, kde je dôležitá presnosť výsledku. Výhody konvenčnej neuro-evolúcie teda spočívajú v jednoduchosti a rýchlosti, pretože sa nemusí generovať topológia siete. Nevýhodou je, že môže byť ťažké nájsť optimálnu topológiu pre danú úlohu, hlavne ak sa jedná o zložitejší problém. [14]

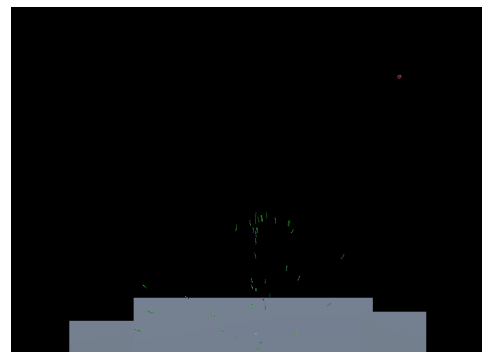
NEAT má výhodu v tom, že môže prispôbovať topológiu siete úlohe, čo môže viesť k lepším výsledkom. Nevýhodou je, že môže byť pomalší a komplexnejší ako konvenčná neuro-evolúcia. Ďalej, NEAT môže byť využitý pre úlohy, kde sú potrebné adaptívne zmeny topológie počas učenia, pre dosiahnutie vyššieho výkonu. NEAT tiež môže byť vhodný pre úlohy, kde sa počas učenia vyžaduje pridávanie alebo odstraňovanie neurónov, pre dosiahnutie vyššieho výkonu. Môže tiež byť vhodný pre úlohy, kde je potrebné vytvoriť topológiu siete, ktorá je optimalizovaná pre konkrétnu úlohu, napríklad pre úlohy klasifikácie obrázkov, kde by mohlo byť potrebné vytvoriť sieť s viacerými konvulčnými vrstvami, pre dosiahnutie lepších výsledkov [15].

V kontexte anti-raketového systému s pomocou neuro-evolúcie existuje niekoľko dôvodov, prečo je vhodné použiť NEAT namiesto konvenčnej neuro-evolúcie [14]:

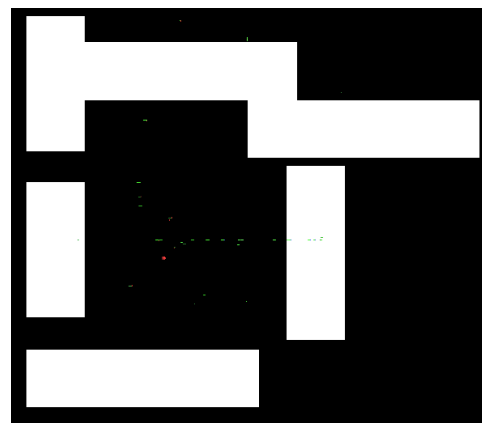
- Adaptabilita: NEAT dokáže prispôbiť topológiu neurónovej siete podľa zložitosti problému, čo umožňuje vytvoriť optimalizované riešenia pre rôzne scenáre a úlohy v riadení rakety.

- Škálovateľnosť: Vďaka svojej schopnosti vyvíjať komplexné topológie z jednoduchých štruktúr je NEAT škálovateľný pre rôzne veľkosti a typy problémov.
- Robustnosť: Druhovosť v NEAT zabezpečuje ochranu inovatívnych topológií pomocou rozdelenia do druhov sietí (ang. species), čo umožňuje evolúciu rôznorodých riešení. Táto robustnosť môže byť výhodná v dynamickom prostredí riadenia rakety, kde sa môžu meniť podmienky alebo ciele.
- Efektivita: NEAT sa snaží nájsť riešenia s minimálnym počtom neurónov a spojení, čo vedie k menším a rýchlejšim neurónovým sieťam, čo je ideálne pre real-time aplikácie, ako je riadenie rakety.

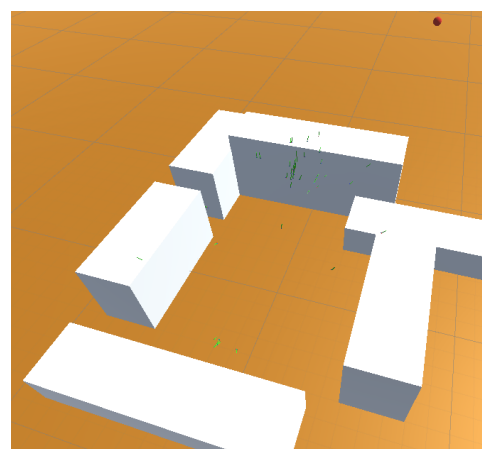
V prípade tréningu proti-raketového systému s pomocou neuro-evolúcie, by sa mohol javiť ako vhodnejší NEAT[13]. Dôvodom je to, že úloha proti-raketovej obrany je veľmi komplexná a adaptívna, vyžaduje rýchle reakcie na neznáme situácie a môže sa meniť v čase[14]. NEAT by bolo vhodné použiť, pretože umožňuje optimalizáciu topológie siete počas učenia.



Obr. 1: Scénár 1. bez prekážky pohľad spredu



Obr. 2: Scénár 1. pohľad zhora



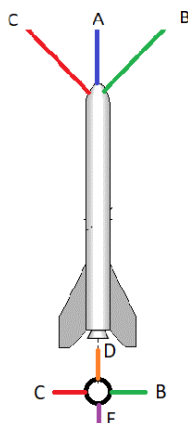
Obr. 3: Scénár 1. v 3D

4 Realizácia

Pri realizácii praktickej časti nášho výskumu sme využili herný engine, ktorý nesie názov Unity. Tento softvér sme zvolili z toho dôvodu, že sme potrebovali vytvoriť flexibilné simulačné prostredie, ktoré je schopné zvládať zmeny a prispôbovanie sa našim požiadavkám a je optimalizované pre výpočet viacerých objektov v pohybe 6 stupňoch voľnosti (DOF-6). Keďže sme potrebovali modifikovať scenáre alebo vlastnosti fyzikálnych parametrov, bolo nevyhnutné mať k dispozícii agilné a prispôsobiteľné prostredie. Keďže Unity nie je priamo navrhnutý pre tréning umelej inteligencie, bolo potrebné pridať rôzne funkcionality, ktoré by umožnili takýto proces. Ako základ kódu pre neuro-evolúciu sme použili voľne dostupný balík UnitySharpNEAT [1], ktorý sme rozšírili o ďalšiu funkcionality potrebnú k práci. Napríklad bolo potrebné doplniť o funkcionality na zaznamenávanie jednotlivých parametrov NEAT a hodnotu fitness funkcie, ktoré sa menili v čase, teda po každej generácii.

Praktická časť sa realizovala v troch hlavných etapách. V prvej etape práce sme sa oboznamovali so samotným herným enginom, teóriou algoritmu NEAT a jeho reprezentáciou v podobe balíka UnitySharpNEAT.

V tejto etape sme si všimli náročnosť scenára aj napriek tomu, že sa jednalo o jednoduchý lineárny pohyb cieľa, tak samotné tréningovanie zabralo násobne viac generácií na nájdenie aspoň nejakého úspešného riešenia. Scénár, ktorý sa najčastejšie používa na demonštráciu funkčnosti hocijakej neuro-evolúcie, je auto jazdiace po trati. Tu sme si všimli, že pri tomto probléme je schopná, či už konvenčná alebo rozšírená neuro-evolúcia nájsť optimálne riešenie v rádovo desiatkach generácií. Pri probléme typu proti-raketovej obrany sme sa k optimálnym riešeniam priblížili, až pri rádovo vyšších tisícok až desiat-tisícok generácií. To prisudzujeme tomu, že aj keď sa samotné



Obr. 4: Rozloženie IR senzorov na anti-rakete (5-vstupov)

```

inputSignalArray[0] = transform.position.x;
inputSignalArray[1] = transform.position.y;
inputSignalArray[2] = transform.position.z;
} Anti-Missile position

inputSignalArray[3] = targetR.transform.position.x;
inputSignalArray[4] = targetR.transform.position.y;
inputSignalArray[5] = targetR.transform.position.z;
} Missile position

inputSignalArray[6] = transform.eulerAngles.x;
inputSignalArray[7] = transform.eulerAngles.y;
inputSignalArray[8] = transform.eulerAngles.z;
} Anti-Missile angles

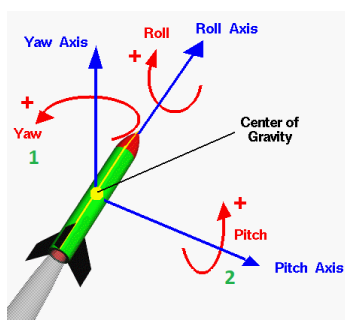
inputSignalArray[9] = targetR.eulerAngles.x;
inputSignalArray[10] = targetR.eulerAngles.y;
inputSignalArray[11] = targetR.eulerAngles.z;
} Missile angles

Vector3 dir = transform.position - targetR.transform.position;
inputSignalArray[12] = Mathf.Atan2(dir.y, dir.x);
inputSignalArray[13] = Mathf.Atan2(dir.y, dir.z);
inputSignalArray[14] = Mathf.Atan2(dir.z, dir.x);
} (directed) angle AM -> M
angle between obj1 & obj2

inputSignalArray[15] = Vector3.Distance(transform.position, targetR.transform.position);
inputSignalArray[16] = (transform.position - lastPosition).magnitude; "Velocity" AM

inputSignalArray[17] = aSensor;
inputSignalArray[18] = bSensor;
inputSignalArray[19] = cSensor;
inputSignalArray[20] = dSensor;
inputSignalArray[21] = eSensor;
} Anti-Missile Laser/IR sensors
    
```

Obr. 5: Vstupy NEAT-u



Obr. 6: Výstup NEAT - rotácia v Y a Z osi rakety (yaw,pitch) [16]

vykresľovanie auta realizuje do 3D prostredia, stále sa jedná o pohyb v 2D priestore z pohľadu riadenia. Druhý faktor je aj to, že ak sa jedná o scenár, kde auto sníma vzdialenosť medzi stenou alebo čiarou trate, tak je to pomerne jednoduchá súvislosť medzi vzdialenosťou od prekážky a zatočením kolies auta, v porovnaní s proti-raketovou obranou. Počas prvých experimentov sme si určili počet a typ vstupov a výstupov pre algoritmus NEAT. Tu sme usúdili, že rotácia okolo vlastnej osi rakety, ako tretí výstup neprináša dodatočne uspokojivé zlepšenie výsledkov za cenu násobného zvýšenia zložitosti siete na natrénovanie. Preto sme sa rozhodli pre rotácie iba v dvoch osiach, ktoré upravujú výrazným spôsobom azimut a zvýšenie rakety.

V druhej etape práce sme si určili scenár, v ktorom je proti-raketový systém schovaný vo vnútro-bloku obytných domov. Tu sme simulovali scenár, kde útočná raketa lineárne stúpa, aby nabrala výšku, a tým sa nachádza v prvej etape letu. Tu sme dali za úlohu umelej inteligencii, aby čo najskôr eliminovala hrozbu útočnej rakety, a pritom nenarazila do budov alebo inej civilnej infraštruktúry Obr.1, Obr.2, Obr. 3.

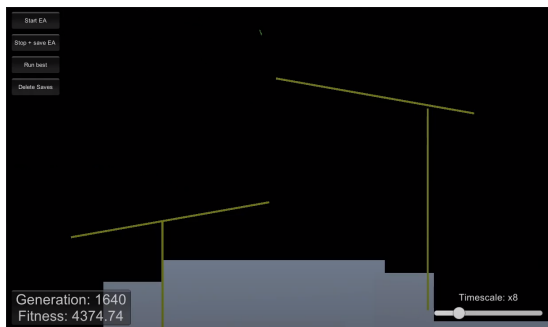
Na vstupe sme použili viacero vstupných informácií (inputov), ktoré by neuro-evolúcia mohla potrebovať na riadenie, napríklad pozíciu anti-rakety a nepriateľskej útočnej rakety alebo vzdialenosť objektu pomocou IR senzorov Obr. 4, Obr. 5. Výstup riadiaceho procesu bol reprezentovaný rotáciou rakety v osiach Y a Z (azimut, elevácia) - Obr.6.

Následne sme museli stanoviť metódu vyhodnotenia úspešnosti jednotlivých jedincov v populácii. Hodnotenie fitness funkcie sme uskutočnili rozdelením na tri zložky. Prvá zložka získavala hodnotu, na základe najväčšieho priblíženia jedinca k útočnej rakete počas celej jej trajektórie. Zostávajúce dve zložky hodnoty fitness funkcie pozostávali z odmien a pokút.

Konkrétne tretia zložka odmeňovala anti-raketu v závislosti na tom, či zasiahla svoj cieľ (útočnú raketu) alebo ju pokutovala v prípade, že narazila do inej prekážky, ktorá nebola jej cieľom. Druhá zložka slúžila ako proporcionálna odmena za kontinuálne približovanie sa anti-rakety k jej cieľu počas celého letu.

Týmto spôsobom sme zabezpečili, že hodnotenie fitness funkcie zohľadňuje nielen absolútnu úspešnosť jedinca v dosiahnutí cieľa, ale aj jeho celkový výkon a schopnosť prispôbiť sa požiadavkám zložitého prostredia. Takto navrhnutá metóda vyhodnotenia umožňuje efektívne tréningovanie a výber najlepších jedincov v populácii, čo v konečnom dôsledku vedie k vytvoreniu robustnejšieho a adaptívnejšieho modelu riadenia proti-raketového systému.

Počas tréningovania sme experimentovali s rôznymi aktivačnými funkciami a rôznymi rýchlosťami pre útočnú raketu, aby sme preskúmali, ako NEAT reaguje na zmenu parametrov tréningovania. V našom prípade sme experimentovali s bipolárnym sigmoidom a násobkami hyperbolického tangensu ($\tanh(x)$, $\tanh(3x)$ a $\tanh(5x)$). Tento prístup nám umožnil overiť teóriu rýchlosti anti-rakiet. Aby bola anti-raketa schopná úspešne zasiahnuť útočnú raketu, je nevyhnutné, aby mala vyššiu rýchlosť ako útočná raketa. Vďaka tomu sme zistili, že výber vhodných parametrov a aktivačných funkcií môže výrazne ovplyvniť efektívnosť tréningovania a konečnú úspešnosť modelu pri



Obr. 7: Scenár 2. s prekážkami, pohľad spredu

zasahovaní útočných rakiet.

V tretej fáze sme modifikovali scenár tým, že sme zvýšili zložitosť úlohy pre NEAT prostredníctvom pridania prekážok, ktorým sa naša anti-raketa mala vyhnúť, a zároveň si zachovať cieľ úspešne zasiahnúť útočnú raketu Obr. 7. Toto rozšírenie scenára nám umožnilo skúmať schopnosť NEAT-u, adaptovať sa na komplexnejšie podmienky a testovať efektívnosť tréningu umelej inteligencie v simulovanom prostredí. Počas tohto upraveného scenára sme analyzovali, ako efektívne sa NEAT dokáže prispôbiť zmenám v prostredí, a či je schopný nájsť optimálne riešenie pre zasiahnutie útočnej rakety, pričom zohľadňuje prítomnosť prekážok. Táto analýza bola dôležitá pre posúdenie robustnosti a flexibility navrhnutého modelu riadenia proti-raketového systému v rôznych situáciách.

5 Záver

Výsledky našej práce svedčia o úspešnom natrénovaní anti-rakety na zasiahnutie útočnej rakety v oboch scenároch. V prípade druhého scenára sme zistili, že NEAT bol schopný nájsť riešenia aj pre zložitejšie situácie.

Zhrnutím je, že naše výskumné úsilie v oblasti neuro-evolúcie a využitie herného enginu Unity pre tréning umelej inteligencie proti-raketového systému sa ukázalo, ako efektívny prístup. Výsledky naznačujú, že NEAT môže byť účinne použitý pre adaptívne riadenie v komplexných prostrediach, ako sú vnútro-bloky obytných bytoviek, a v budúcnosti, by mohol byť aplikovaný v reálnych proti-raketových obranných systémoch. Táto práca teda predstavuje základ pre ďalší vývoj a optimalizáciu riadiacich algoritmov založených na neuro-evolúcii, pre efektívnu ochranu proti raketovým útokom v rôznorodých a náročných situáciách.

Aj keď výsledky našej práce sú pozitívne a sľubné, stále existuje priestor pre ďalší výskum a zlepšenie. Mohli by sme napríklad skúmať iné neuro-evolučné algoritmy alebo adaptovať jednotlivé parametre NEAT-u podľa kompletnosti sietí. Okrem toho by bolo zaujímavé preskúmať, ako sa náš model správa pri rôznych útočných stratégiách a v reálnych podmienkach, aby sme lepšie pochopili jeho obmedzenia a prispôbili ho tak, aby bol ešte efektívnejší a robustnejší. Napokon, pre implementáciu do reálnych proti-raketových obranných systémov, by bolo dôležité preskúmať bezpečnostné aspekty, ako aj zabezpečiť spoluprácu s ostatnými systémami a senzormi v rámci obranného

komplexu. Tieto aspekty by mohli byť súčasťou budúcej práce a mohli by prispieť k vytvoreniu ešte efektívnejšieho a spoľahlivejšieho proti-raketového systému, založeného na umelej inteligencii.

Pod'akovanie

Chcel by som sa touto cestou poďakovať prof. Ing. Ivan Sekaj, PhD. za pomoc a usmernenie pri riešení tejto práce.

Literatúra

- [1] F. Wolf. UnitySharpNEAT: A Unity3D plugin for neuro-evolution using the NEAT algorithm. *GitHub Repository*. Retrieved from <https://github.com/flo-wolf/UnitySharpNEAT>, n.d.
- [2] G.M. Siouris. *Missile Guidance and Control Systems*. Springer, 2004. ISBN 978-1-4757-3681-7.
- [3] J. Cirincione, J.B. Wolfsthal, and M. Rajkumar. *Deadly Arsenals: Nuclear, Biological, and Chemical Threats*. Carnegie Endowment for International Peace, 2005. ISBN 978-0-87003-216-5.
- [4] M. Almkhatar. *Guided Missiles and Countermeasures: Evolving Technologies and Defense Strategies*. Military Science Publishers, 2019. ISBN 978-1-63217-056-2.
- [5] S.A. Hildreth. *Missile Defense: The Current Debate*. Congressional Research Service, ISBN 978-1-4379-2052-4, 2009.
- [6] K.A. Payne. *Missile Defense in the 21st Century: Protection Against Limited Threats Including Lessons from the Gulf War*. Institute for Foreign Policy Analysis, ISBN 978-0-89206-464-9, 2012.
- [7] T.A. Postol. *Countermeasures: A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System*. Union of Concerned Scientists. Retrieved from <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/legacy/assets/documents/nw> 2003.
- [8] R. Dawkins and S. Lambakis. *Directed Energy Weapons: Promise and Prospects*. Center for Strategic and Budgetary Assessments, ISBN 978-1-94251-299-4, 2017.
- [9] BBC News. *Israel: Iron Dome missile defence system in action*. BBC News, November 17, 2012. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-20385306>.
- [10] K. O. Stanley and R. Miikkulainen. *Evolving neural networks through augmenting topologies*. *Evolutionary Computation*, 10(2):99–127, 2002.

- [11] D. Floreano and C. Mattiussi. Bio-inspired artificial intelligence: Theories, methods, and technologies. *MIT Press*, 2008.
- [12] X. Yao. Evolving artificial neural networks. *Proceedings of the IEEE*, 87(9):1423–1447, 1999.
- [13] K. O. Stanley and R. Miikkulainen. Competitive coevolution through evolutionary complexification. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 21:63–100, 2004.
- [14] 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.
- [15] J. Schmidhuber. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61:85–117, 2015.
- [16] NASA Glenn Research Center. Rocket Rotations. Retrieved from <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rotations.html>. Accessed on April 11, 2023.

Arrhythmia detection from single-channel ECG using deep learning methods

Martin Berki

Faculty of Electrical Engineering and Information Technology of STU in Bratislava
Institute of Robotics and Cybernetics

xberki@stuba.sk

Abstract - This study aims to classify pathological records using a single channel ECG, focusing on precordial leads V1, V3, and V6. Employing a dataset with over 2 million labeled 12-lead ECG records, including six types of arrhythmias, we utilize two deep neural network architectures: model with residual connections (ResNet), which demonstrated promising performance in classifying arrhythmias from 12-lead ECG, and a convolutional-recurrent (CNN-LSTM) hybrid architecture, with significantly reduced model complexity. Both methods achieved sensitivity levels above 90 %, indicating successful detection of the majority of pathological cases, even with imbalanced data. The comparison between the architectures highlights the benefits of combining convolutional and LSTM layers for applications with limited computational resources.

1 Introduction

Irregularities in cardiac rhythm represent serious medical problem often associated with heart failure, sudden death or stroke [1]. Reliable arrhythmia detection often requires well-trained cardiology experts, with years of clinical experience and still in many cases it can pose a challenge. In order to provide accurate diagnostics of cardiac rhythm pathologies, methods such as electrocardiography (ECG) play significant role, due to their non-invasive character and high accessibility.

ECG signal is standardly obtained by placing numerous electrodes on specific places of human body, although there are several other ECG signal acquisition techniques, for example smart watches. In standard ECG examination performed in clinical environment, 12 ECG leads are used. This configuration of electrodes provides robust information of electrical activity of heart, allowing cardiologists to diagnose cardiac pathologies based on correlated informations from specific leads [1].

Despite the proficiency of the 12-lead ECG acquisition methodology, certain arrhythmias may not be detected during clinical examination due to the brevity of the ECG examination, which usually takes 10 seconds [2, 3]. To compensate this deficiency, usage of holter device may be beneficial, since ECG examination using holter device generally extends from 24 to 72 hours[4]. This alteration of ECG acquisition methodology yields considerable benefits in terms of the volume of data acquired, however it entails a trade-off in the diversity of information, as a consequence of the reduced number of leads employed.

2 Objective of the study

The primary objective of this study is to evaluate the capacity of contemporary machine learning techniques to extract valuable information from a single ECG signal channel for the purpose of arrhythmia detection. Rationale for using single ECG signal channel is to replicate basic single-channel ECG holter configuration.

The sensitivity of a specific signal channel to a particular pathology may vary in comparison to another channel and mispositioning an ECG lead in the precordial area may result in significantly abnormal ECG patterns, potentially leading to inaccurate diagnoses [5, 6]. These considerations should be taken into account when positioning a single ECG electrode on the human body. In the context of single-channel ECG holter monitoring, the proper placement of the signal lead is of paramount importance in capturing a signal that clearly exhibits the presence of arrhythmia.

The outcomes of this study aim to offer an assessment of the challenge at hand, with the results achieved through the application of machine learning techniques.

In this study, our focus will be limited to chest leads, with their appropriate placement depicted in Figure 1. Specifically, we will concentrate on leads V1, V3 and V6, due to their distinct positioning on the human chest.

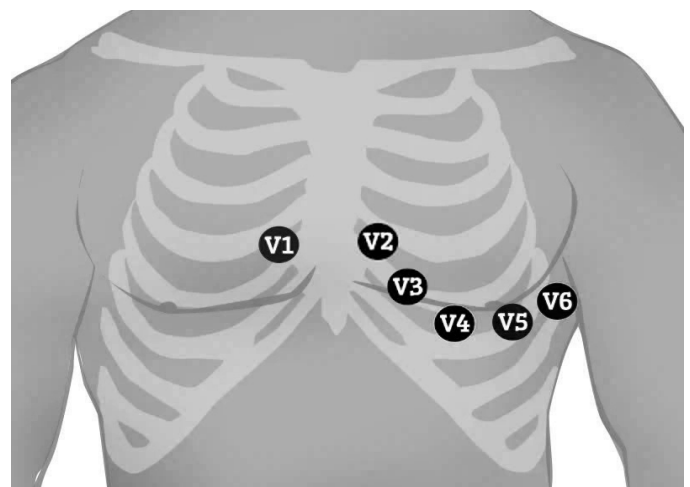


Figure 1: ECG lead placements guide on the human chest [7].

3 Data acquisition

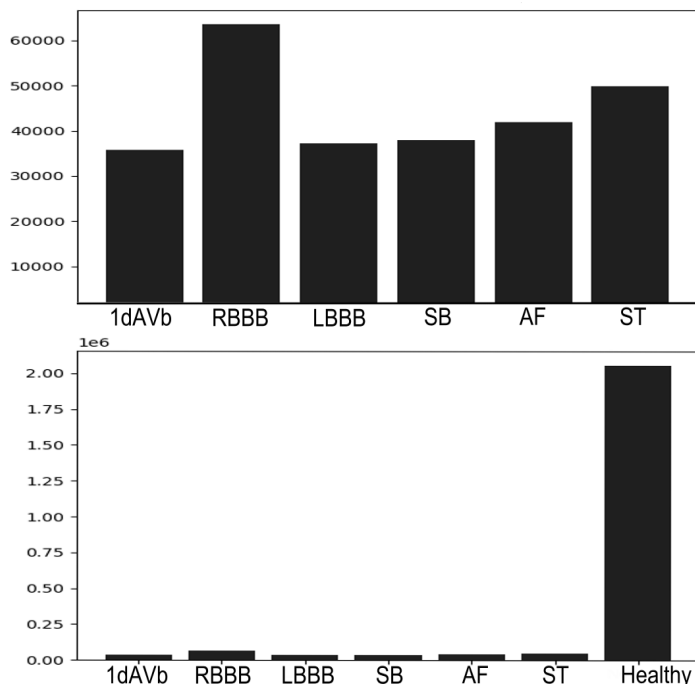


Figure 2: Histogram of pathologies and healthy records.

Dataset for the purposes of this study was kindly provided by Ribeiro A. et al. [8] Dataset contains more than 2 million labeled 12-lead ECG exams analyzed by the Telehealth Network of Minas Gerais and collected under the scope of the CODE (Clinical Outcomes in Digital Electrocardiology) study. In addition to non-pathological records, the dataset contains the following pathologies:

- First-degree atrioventricular block (1dAVb)
- Right bundle branch block (RBBB)
- Left bundle branch block (LBBB)
- Sinus bradycardia (SB)
- Sinus tachycardia (ST)
- Atrial fibrillation (AF)

In figure 2 we can observe that total number of non-pathological records significantly surpasses total number of pathological records. This fact can have negative impact on model performance and should be taken into account while selecting training parameters. Further, dataset also contains records of age and sex of each individual patient, where 60 % of all records are females and 40 % of patients are in age interval of 41-60 years. Additionally, the dataset encompasses multiple examinations which consist of multiple records. These records are always from identical patient. In our case, we will use only one and always first record from these examinations. This procedure will result in a reduction of our dataset by approximately one hundred thousand records.

4 Methods

Within the scope of this study, we will utilize two deep neural network architectures for classification between pathological and non-pathological records: a variant of the ResNet architecture and a Convolutional-LSTM hybrid network. As previously described, we will use only one record from each exam. To compensate significant imbalance of our dataset, we will use relatively large batch size, for each model individually. We also utilize intensive shuffling, where we reshuffle dataset after each epoch. For validation dataset we randomly select approximately 50 thousand of non-pathological records plus approximately one thousand records from each pathology, what should correspond to pathology proportion in training set. For the test set, we will employ a distinct subset of data, adhering to the same criteria utilized in the case of the validation set. The remaining approximately 2.15 million records will be designated as the training set. For each model, the binary cross-entropy loss function will be employed due to the binary classification task at hand, in conjunction with the Adam optimizer. Throughout the training process, we will observe the validation loss and employ a learning rate reduction strategy based on plateau detection. Specifically, the learning rate will be decreased when the model does not exhibit significant improvement within an interval of seven epochs. The initial learning rate is established at 0.001 and will be reduced by a factor of 0.1 following each plateau detection. Additionally, an early stopping mechanism is employed, halting the training process if there is no improvement observed for 10 consecutive epochs.

The classification process will be conducted separately for leads V1, V3, and V6. Figure 3 illustrates samples from both pathological and non-pathological records for leads V1 and V6.

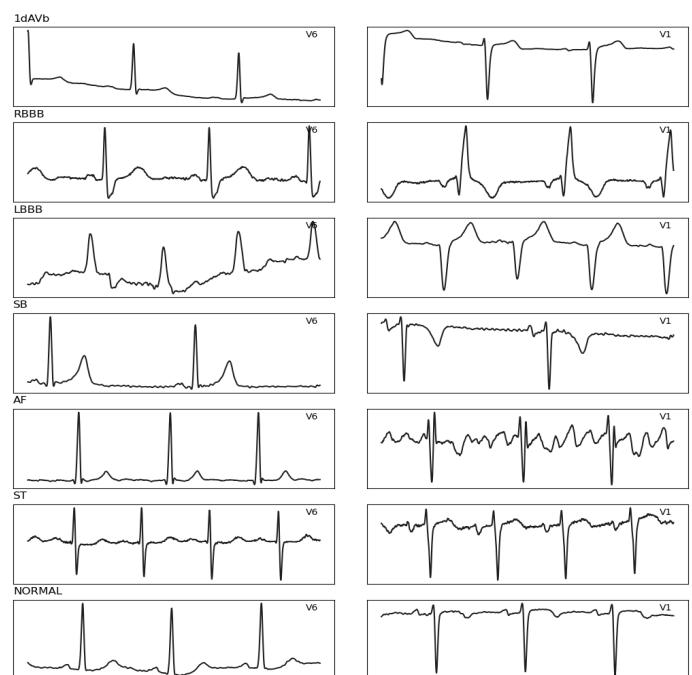


Figure 3: Visualization of dataset samples, featuring leads V1 and V6.

4.1 Binary classification using ResNet

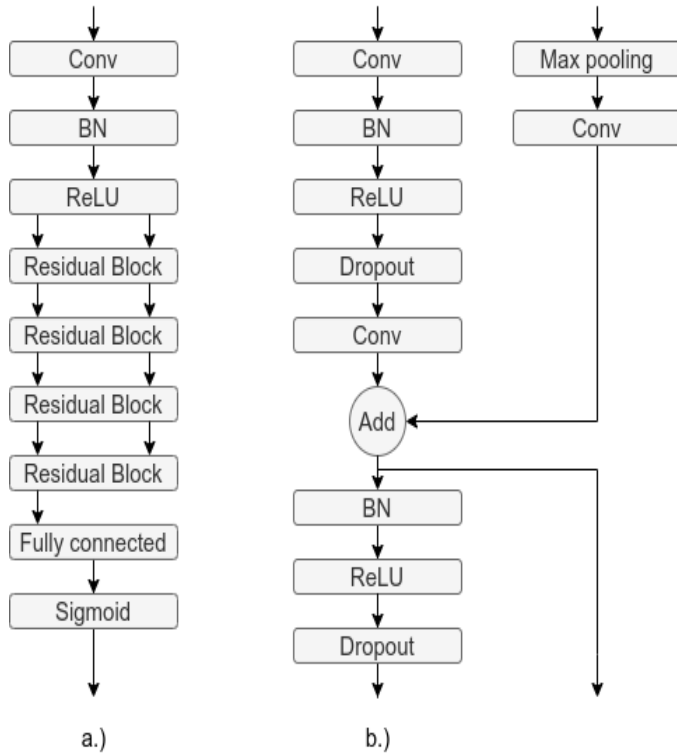


Figure 4: Employed ResNet model (a) and the architecture of the residual block (b).

The deep residual learning framework, originally introduced by He et al. in 2015 [9] addresses the degradation problem, where the performance of a deep neural networks degrades rapidly even as more layers are added. The researchers introduce residual learning, which allows the network to learn residual functions with reference to the layer inputs, rather than learning unreferenced functions. This implementation utilizes residual networks (ResNets) that incorporate residual blocks, employing shortcut connections added to network layers to integrate the referenced function into the computation of subsequent layers.

As a preliminary method, we adopt the ResNet architecture variant proposed by Ribeiro et al.[10]. The objective is to adapt this model by providing it with a single ECG lead as input and evaluating its performance in the binary classification task of distinguishing between pathological and non-pathological records. This model was initially employed for the automatic diagnosis of 12-lead ECG through multiclass classification and demonstrated promising performance, achieving F1 scores exceeding 80 % and specificity surpassing 99 % on 12-lead ECG records, utilizing the same dataset as our study.

The input signal, with a length of 2048 samples and a sampling frequency of 300 Hz, initially passes through a convolutional layer consisting of 64 convolutional filters, each with a size of 17. Subsequently, batch normalization and ReLU activation are applied. The transformed signal is then demultiplexed into two separate signals, which both enter a stack of four residual blocks. Each residual block subsamples the

input signal by a factor of 4, commencing with 1024 samples at the output of the first residual block. The residual block begins with a convolutional layer in the main branch and a max pooling layer in the secondary branch, arranged in parallel. The number of convolutional filters in the main branch of each residual block increases from 128 to 320 in increments of 64. Batch normalization without centering and scaling follows this stage.

During training, dropout with a drop weight probability of 0.2 is utilized after batch normalization. A convolution operation with parameters corresponding to the respective residual block is reapplied, and the signal is directed to the summation block. The summation block also receives the signal from the secondary residual branch, which has been transformed by a max pooling layer and a 1x1 convolutional layer to match the dimensions of the main branch. After the summation block, the main branch undergoes batch normalization, ReLU activation, and dropout, while the secondary branch proceeds directly to the secondary input of the subsequent residual block. At the end of the stack of residual blocks, the output of the main branch is flattened and passed to a dense layer, ultimately activated through a sigmoid function.

This model comprises over 6 million trainable parameters and approximately 4,000 non-trainable parameters. To compensate for the imbalanced dataset, a batch size of 256 is selected during the training process.

4.2 Binary classification using CNN-LSTM

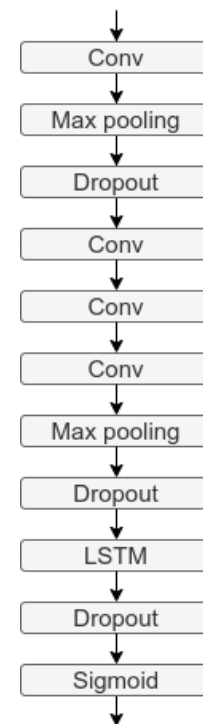


Figure 5: Illustration of the TinySleepNet architecture.

For our second experiment, we will employ a hybrid architecture combining convolutional and recurrent elements. Recurrent neural networks are well-suited for processing sequential data. The Long Short-Term Memory (LSTM) architecture is a type of recurrent network which has exhibited a remarkable ability to identify and capture long-term dependencies present within the sequential data. [11] In this case, we adopt the TinySleepNet architecture introduced by Supratak and Guo in 2020 [12]. This model was designed for automatic sleep stage scoring using raw single-channel EEG data, a task similar to the one at hand. The model was evaluated on seven public sleep datasets obtained from the Montreal Archive of Sleep Studies (MASS) and Sleep-EDF. It was compared with existing methods, such as IITNet, SeqSleepNet+, SleepEEGNet, and DeepSleepNet. The study demonstrates that TinySleepNet performs comparably to these existing methods, achieving an overall accuracy and macro F1-score of over 82 % and 75 %, respectively, across all datasets.

Compared to other methods, TinySleepNet significantly reduces the number of model parameters and computational resources by utilizing a single CNN branch with small filters and a unidirectional LSTM. This makes the model less prone to overfitting the training data and an attractive option for remote sleep monitoring in home environments. Overall, TinySleepNet exhibits promising results in scoring sleep stages without compromising performance on any specific sleep stage. This model has only approximately 530,000 trainable parameters and 1,024 non-trainable parameters, which is a substantial difference compared to the ResNet architecture we used, having over 6 million trainable parameters.

TinySleepNet is composed of multiple convolutional layers, each featuring 128 filters and a filter size of 8. Following each convolution, batch normalization and ReLU activation are applied. This architecture employs a relatively aggressive dropout with a weight drop probability of 0.5. The series of convolutional layers is responsible for representation learning, while the addition of 128 LSTM cells enables the model to learn from sequences of these representations.

5 Results

Within the context of our binary classification problem, four distinct prediction outcomes can be observed.

- **True positive (TP):** Subject is correctly labeled as pathological
- **True negative (TN):** Subject is correctly labeled as healthy
- **False positive (FP):** Subject is incorrectly labeled as pathological (false alarm)
- **False negative (FN):** Subject is incorrectly labeled as healthy (worst case)

When interpreting the results of our predictions, we will consider the following performance metrics: accuracy, sensitivity, specificity, precision, and F1-score.

- **Accuracy** is calculated as $(TP + TN)/(TP + TN + FP + FN)$ and can be defined as the proportion of accurately classified data instances relative to the overall number of data instances within the dataset. While this metric is quite straightforward, it may yield imprecise results when applied to imbalanced data.
- **Sensitivity** is calculated as $TP/(TP + FN)$ and answers following question: Of all the individuals who are pathological, how many do we correctly predict? (This is the most important metric)
- **Specificity** is calculated as $TN/(TN + FP)$ and answers following question: Of all the individuals who are healthy, how many do we correctly predict?
- **Precision** is calculated as $TP/(TP + FP)$ and answers following question: How many of the individuals we labeled as pathological are actually pathological?
- **F1-Score** is calculated as $2 \cdot (sensitivity \cdot precision)/(sensitivity + precision)$ and represents the harmonic mean of sensitivity and precision.

Typically, when the sigmoid output is above 0.5, it is considered a positive prediction. However, due to the imbalance in our dataset, the confidence interval for pathological records may not reach this level in most cases. In our case, negative predictions tend to have a confidence interval between 10^{-5} to 10^{-3} , while positive predictions usually have a confidence interval ranging from 0.1 to 0.4. Consequently, we will classify every prediction with a confidence level above 0.1 as positive.

5.1 ResNet

Table 1: Performance results of ResNet architecture

Lead	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F1
V1	0.93	0.92	0.93	0.61	0.74
V3	0.91	0.96	0.91	0.56	0.71
V6	0.92	0.96	0.91	0.58	0.72

5.2 TinySleepNet

Table 2: Performance results of TinySleepNet architecture

Lead	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F1
V1	0.91	0.95	0.91	0.57	0.71
V3	0.92	0.95	0.92	0.59	0.73
V6	0.92	0.95	0.92	0.60	0.73

5.3 Interpretation of results

Training results presented in Table 1 and Table 2 indicate that a sensitivity above 90 % was achieved for each lead on both architectures within the test set.

The ResNet architecture, trained on lead V3 and V6, demonstrated the best results with a sensitivity of 0.96. Interestingly, the TinySleepNet architecture managed to attain highly comparable sensitivity levels despite its significantly less complex architecture. Specifically, TinySleepNet achieved a sensitivity level of 0.95 on each lead. These sensitivity levels indicate that, despite the heavily imbalanced dataset, we were successful in detecting the majority of pathological cases.

Additionally, we achieved specificity levels above 90 % on every lead for both architectures.

Precision levels, which are approximately in the 56 to 61 percent range, suggest that even in cases of low pathology suspicion, records were labeled as pathological. While these levels fall below our established sensitivity and specificity thresholds, it is deemed a more favorable situation, given that in medical contexts, false alarms are generally more tolerable than undetected pathologies. The precision metric was heavily influenced by our decision to classify records with a confidence level above 0.1 as positive. Elevating this parameter would result in enhanced precision and a reduction in false positive classifications; however, it would come at the expense of a higher number of undetected pathological instances, an outcome that is not desirable in this particular context.

6 Discussion

We have demonstrated that it is possible to achieve relatively reliable binary classification of pathological ECG records within this dataset, even when providing the model with only one ECG signal channel as input.

The comparison between the ResNet and TinySleepNet architectures highlights the benefits of adding an LSTM layer to a convolutional architecture in terms of reduced model complexity and lower computational requirements. This result is particularly relevant for applications where computational resources are limited, such as remote monitoring or real-time processing.

Automatic analysis of ECG signals is generally a non-trivial task. In this study, we processed raw ECG signals without any preliminary filtering or applying transforms. This approach has the advantage of retaining the full signal information, potentially allowing the neural network models to learn more subtle and complex patterns directly from the raw data. Additionally, it simplifies the preprocessing pipeline, reducing the risk of introducing errors or biases during signal processing. However, it may also present challenges in terms of dealing with noise and artifacts present in the raw signals, which could impact model performance.

The forthcoming trajectory of this research intends to investigate the complexities associated with raw data and concurrently examine the potential for multi-class classification among diverse pathologies.

Acknowledgements

My sincere appreciation goes to Ing. Slavomír Kajan, Ph.D., for sharing his considerable knowledge and professional guidance during the development of this study.

This study was supported by the Slovak Research and Development Agency of the Ministry of Education, Science Research and Sport of the Slovak Republic, grant: APVV-21-0509.

References

- [1] Eugene Braunwald, Peter Libby, Robert O Bonow, and Douglas L Mann. Foreword. In *Clinical Arrhythmology and Electrophysiology*, page vii. Elsevier, 2009.
- [2] Soonil Kwon, So-Ryoung Lee, Eue-Keun Choi, Hyo-Jeong Ahn, Hee-Seok Song, Young-Shin Lee, and Seil Oh. Validation of adhesive single-lead ECG device compared with holter monitoring among non-atrial fibrillation patients. *Sensors (Basel)*, 21(9), 2021.
- [3] Yasar Sattar and Lovely Chhabra. *Electrocardiogram*. StatPearls Publishing, 2023.
- [4] Mathias C Busch, Stefan Gross, Dietrich Alte, Jan A Kors, Henry Völzke, Till Ittermann, André Werner, Anne Krüger, Raila Busch, Marcus Dörr, and Stephan B Felix. Impact of atrial fibrillation detected by extended monitoring-a population-based cohort study. *Ann. Noninvasive Electrocardiol.*, 22(6), 2017.
- [5] Borys Surawicz, Rory Childers, Barbara J Deal, Leonard S Gettes, James J Bailey, Anton Gorgels, E William Hancock, Mark Josephson, Paul Kligfield, Jan A Kors, Peter Macfarlane, Jay W Mason, David M Mirvis, Peter Okin, Olle Pahlm, Pentti M Rautaharju, Gerard van Herpen, Galen S Wagner, Hein Wellens, American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology, American College of Cardiology Foundation, and Heart Rhythm Society. AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part III: intraventricular conduction disturbances: a scientific statement from the american heart association electrocardiography and arrhythmias committee, council on clinical cardiology; the american college of cardiology foundation; and the heart rhythm society. endorsed by the international society for computerized electrocardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.*, 53(11):976–981, 2009.
- [6] Mahin Rehman and Najeeb U Rehman. Precordial ECG lead mispositioning: Its incidence and estimated cost to healthcare. *Cureus*, 12(7):e9040, 2020.

- [7] Cables and E U Sensors. 12-lead ECG placement guide with illustrations. <https://www.cablesandsensors.eu/pages/12-lead-ecg-placement-guide-with-illustrations>. Accessed: 2023-4-15.
- [8] Antonio H. Ribeiro, Manoel Horta Ribeiro, Gabriela M. Paixão, Derick M. Oliveira, Paulo R. Gomes, Jéssica A. Canazart, Milton P. Ferreira, Carl R. Andersson, Peter W. Macfarlane, Wagner Meira Jr., Thomas B. Schön, and Antonio Luiz P. Ribeiro. CODE dataset. 11 2021.
- [9] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, and Jian Sun. Deep residual learning for image recognition. 2015.
- [10] Antônio H. Ribeiro, Manoel Horta Ribeiro, Gabriela M. M. Paixão, Derick M. Oliveira, Paulo R. Gomes, Jéssica A. Canazart, Milton P. S. Ferreira, Carl R. Andersson, Peter W. Macfarlane, Wagner Meira Jr., Thomas B. Schön, and Antonio Luiz P. Ribeiro. Automatic diagnosis of the 12-lead ECG using a deep neural network. *Nature Communications*, 11(1):1760, 2020.
- [11] Sepp Hochreiter and Jürgen Schmidhuber. Long short-term memory. *Neural computation*, 9:1735–80, 12 1997.
- [12] Akara Supratak and Yike Guo. Tinsleepnet: An efficient deep learning model for sleep stage scoring based on raw single-channel eeg. In *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society (EMBC)*, pages 641–644, 2020.

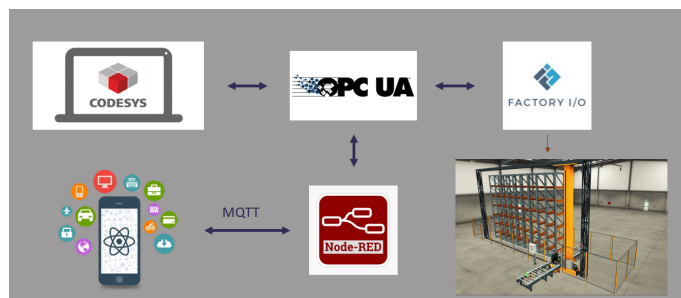
Riadenie udalostného systému s využitím multiplatformovej mobilnej aplikácie

Bc. Danijela Pavlovič¹, doc. Ing. Erik Kučera, PhD.¹

¹Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave

xpavlovic@stuba.sk, erik.kucera@stuba.sk

Abstrakt – Tento článok sa venuje digitalizácii výrobného procesu prostredníctvom moderných informačno-komunikačných technológií. Diskrétny udalostný systém je v predloženej štúdii reprezentovaný virtuálnym skladom, ktorý je riadený prostredníctvom soft PLC a mobilnou aplikáciou bežiacou na dvoch platformách - Android a iOS. Riadenie systému je rozdelené na automatické a manuálne. Mobilná aplikácia je navrhnutá, tak aby v reálnom čase umožnila vzdialenú komunikáciu medzi človekom a strojom pre manuálne riadenie a monitorovanie skladu. Navrhnuté riešenie je implementované a otestované pre virtuálne zariadenia a výsledky demonštrujú realizovateľnosť a efektívnosť tohto prístupu.



Obr. 1: Architektúra riešenia

1 Úvod

Inteligentný priemysel (známy ako Industry 4.0) sa za posledné roky rozvíja v rôznych segmentoch. Spolu s pokročilými technológiami sa každý proces v priemysle dokáže automatizovať. Automatizácia priemyslu v prepojení s inteligentným priemyslom prináša vylepšenie a stabilizáciu každého procesu [1]. OPC UA je komunikačný štandard ktorý sa v inteligentnom priemysle bežne používa na riadenie a výmenu dát medzi distribuovanými entitami. Je štandardizovaný normou IEC 62541 a poskytuje spoľahlivú, bezpečnú a interoperabilnú komunikáciu medzi rôznymi automatizačnými zariadeniami, ako sú programovateľné logické kontroléry (PLC), rozhrania človek-stroj (HMI) a systémy dohľadu nad riadením a zberom údajov (SCADA) [2].

V tomto článku uvádzame riešenie pre automatizáciu virtuálneho skladového systému, ktorý je riadený prostredníctvom soft PLC a mobilnej aplikácie. Soft PLC používame od softvéru Codesys a veľkou výhodou je, že takéto PLC beží na bežnom kancelárskom počítači a jednotlivé vstupy a výstupy sú poskytované prostredníctvom OPC UA servera. Virtuálny skladový systém sme zvolili od tvorcov softvéru Factory IO ktorý nám na prepojenie s PLC poskytuje OPC UA klienta. Na prepojenie mobilnej aplikácie so skladovým systémom používame framework Node-RED. V Node-RED máme ďalších dvoch OPC UA klientov ktorý posielajú a prijímajú údaje z mobilnej aplikácie na OPC UA server cez MQTT protokol. Architektúra celého systému je znázornená na obrázku 1.

2 Analýza problému

Pod pojmom *udalostný systém* rozumieme taký systém, ktorý je riadený udalosťami. Riadenie udalostného systému je možné chápať ako návrh softvéru, ktorý dokáže včas a vhodným spôsobom odhaliť udalosti a reagovať na ne. Napríklad spustením určitých procesov, keď nastanú špecifické udalosti [3].

Dobрым príkladom takéhoto riadenia je automatizácia v priemysle. Na automatizáciu priemyselných procesov, ako je výroba, manipulácia s materiálom a kontrola kvality v dnešnej dobe sa čoraz viac aplikujú nové koncepty spadajúce pod Inteligentný priemysel (Industry 4.0) [4].

Skladový systém hrá veľkú rolu v priemysle. Automatizácia a digitalizácia takéhoto systému prináša v priemysle nielen úsporu času ale aj menšie percento chybovosti a redukciu nákladov.

Riadenie a monitorovanie tohto procesu je kritickou súčasťou v každej továrni. S veľkým pokrokom v technológiách sa však tradičné metódy riadenia a monitorovania stali neefektívne, časovo náročné a drahé. Jedným z moderných riešení tohto problému je využitie mobilných aplikácií v priemysle, ktorý taktiež spadá pod koncept Inteligentného priemyslu.

3 Návrh a špecifikácia udalostného systému

Ako udalostný systém sme si zvolili virtuálny automatizovaný skladový systém od tvorcov softvéru Factory IO (obrázok 2). Model pozostáva z elektrického rozvádzača s tlačidlami, žiaríča (emitter), valčekového pásu, nakladacieho pásu, retroreflexných



Obr. 2: Skladový systém od softvéru Factory IO

senzorov, aktuátorov, koľajnicového stohovacieho žeriavu a skladu. Koľajnicový stohovací žeriav obsahuje vozík, vertikálnu platformu, dve vidlice a sklad.

Na platforme a na vozíku sa nachádzajú dva laserové diaľkomery, ktoré merajú horizontálnu a vertikálnu polohu platformy. Stohovací žeriav možno ovládať digitálnymi, numerickými a analógovými hodnotami podľa zvolenej konfigurácie. V našom modeli sú nastavené numerické hodnoty. Polohu žeriavu určuje premenná s názvom *TargetPosition*. Jeho začiatočná hodnota je číslo 55. Celkový počet buniek v sklade je 54. To znamená, že cieľová bunka v sklade a zároveň aj poloha žeriavu môže byť definovaná celočíselnou hodnotou medzi 1 a 54. Ak je táto hodnota nastavená na nulu, stohovací žeriav sa zastaví v aktuálnej polohe. Ak je však vyššia ako 54, žeriav sa vráti do začiatočnej polohy (číslo 55).

Cieľom je teda pomocou spomenutých dielov produkt umiestniť do skladu. Proces začína vygenerovaním produktu z generátora (emitter). Akonáhle sa produkt dostaví na pás, retroreflexný senzor ho zdetekuje a čaká sa na operátora aby stlačil tlačidlo štart. Stlačením tohto tlačidla aktivuje sa valčekový pás a produkt sa posunie k nakladaciemu pásu. Na konci nakladacieho pásu je ďalší senzor, ktorý keď deteguje produkt, zastaví oba pásy a nasleduje naloženie produktu na žeriav. Akonáhle žeriav naloží produkt do vidlice, nasleduje transport produktu do skladu. Ako sme vyššie spomenuli, žeriav ovládame numerickými hodnotami. Do premennej aktuátora *TargetPosition* pošleme hodnotu z intervalu 1 až 54 a týmto určíme polohu žeriavu a pozíciu produktu v sklade. Jednou z požiadaviek tejto konkrétnej časti riadenia, je aby bola automatická a manuálna. Pokiaľ operátor neurčí sám pozíciu produktu v sklade, program pomocou ktorého riadime udalostný systém, automaticky určí prvú voľne dostupnú pozíciu v sklade a tam produkt umiestni. Keď žeriav produkt uskladní, vráti sa späť na začiatočnú polohu. Tento proces opakujeme pokiaľ sa všetky bunky v sklade neobsadia alebo pokiaľ operátor nestlačí tlačítko stop.

3.1 Riadenie udalostného systému

Riadenie udalostného systému prebieha pomocou programovateľného logického kontroléra (PLC). Na implementáciu sme použili softvér Codesys. Codesys je automatizačný softvér

ktorý obsahuje internacionálny štandard IEC 61131-3 pre programovacie jazyky určené pre inžinierske riadiace systémy. Softvér je zložený z dvoch častí: Integrované vývojové prostredie (IDE) a runtime [6]. Integrované vývojové prostredie sme použili na implementáciu nášho udalostného systému, pričom ako hlavný programovací jazyk pre PLC sme si zvolili sekvenčný funkčný diagram. Je to z dôvodu toho, že proces skladového systému ako sme špecifikovali v predošlej kapitole sa vykonáva sekvenčne a preto sa nám tento programovací jazyk zdal ako najvýhodnejší.

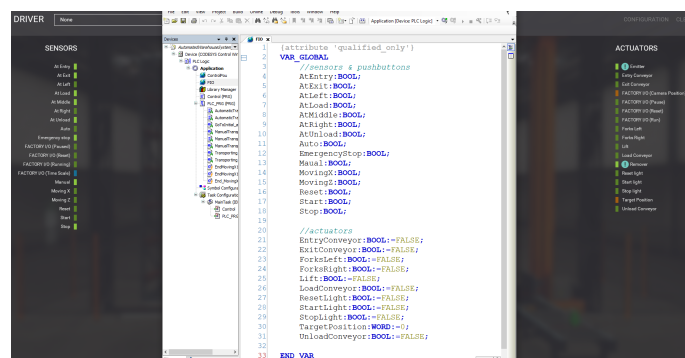
Codesys runtime nám poskytuje virtuálne (teda soft) PLC, ktoré beží na lokálnom serveri. Beh programu sa na každé 2 hodiny vypne a potrebné ho je znovu naštartovať, čo je spôsobené licenciou, ktorá je v tomto móde zadarmo.

Ako sme už spomenuli, celý proces je rozdelený na automatické a manuálne riadenie. Manuálne v tomto prípade znamená, že operátor môže naštartovať proces, ukončiť a vybrať si miesto v sklade, kam chce produkt uskladniť.

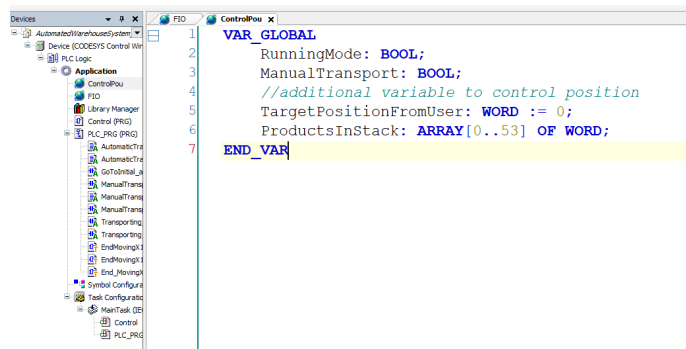
Aplikácia je zložená z objektov rôznych typov. Zdrojový kód pre program v PLC je objekt typu *programovacia organizačná zložka (POU)*. Nakoľko náš proces čiastočne závisí od operátora (operátor je ten, ktorý proces naštartuje stlačením tlačítka štart), vytvorili sme dva programy (dve POU). Control POU je pomocný program, ktorý beží neustále popri hlavnom programe na ovládanie vykonávania sekvencií hlavného programu na základe vstupu od operátora. Aby sme toto všetko mohli implementovať, prvým krokom bolo zadefinovanie a inicializácia globálnych premenných, ktoré nám umožnia riadenie oboch programov.

3.1.1 Definícia a inicializácia globálnych premenných

Na riadenie skladového systému z Factory IO, potrebujeme prístup k senzorum a aktuátorom. Prvým krokom bolo teda zadefinovanie a inicializácia globálnych premenných. Pre lepšiu prehľadnosť, vytvorili sme dva zoznamy globálnych premenných. Zoznam s názvom FIO obsahuje všetky globálne premenné, ktoré reprezentujú senzory a aktuátory v skladovom systéme (Obrázok 3). Zoznam s názvom ControlPou (Obrázok 4) obsahuje globálne premenné ktoré budeme používať na prepájanie medzi manuálnym a automatickým riadením a taktiež na vizualizáciu aktuálneho stavu procesu v mobilnej aplikácii.



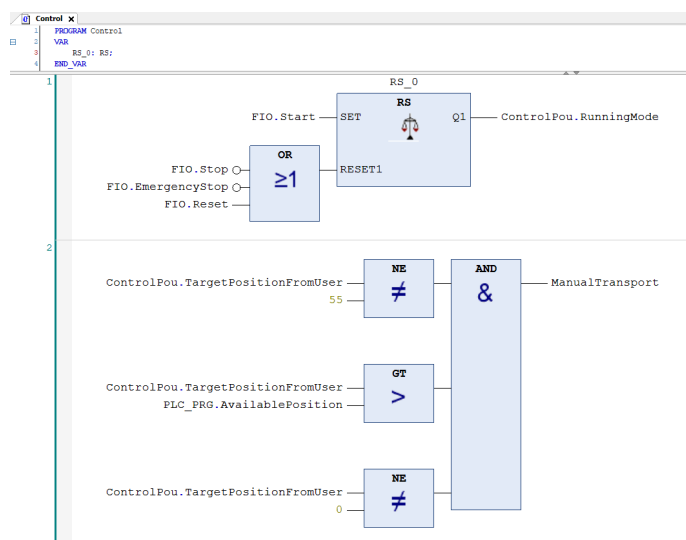
Obr. 3: Zoznam globálnych premenných pre riadenie skladového systému vo Factory IO



Obr. 4: Zoznam globálnych premenných pre prepojenie medzi manuálnym a automatickým riadením

3.1.2 Pomocný program Control

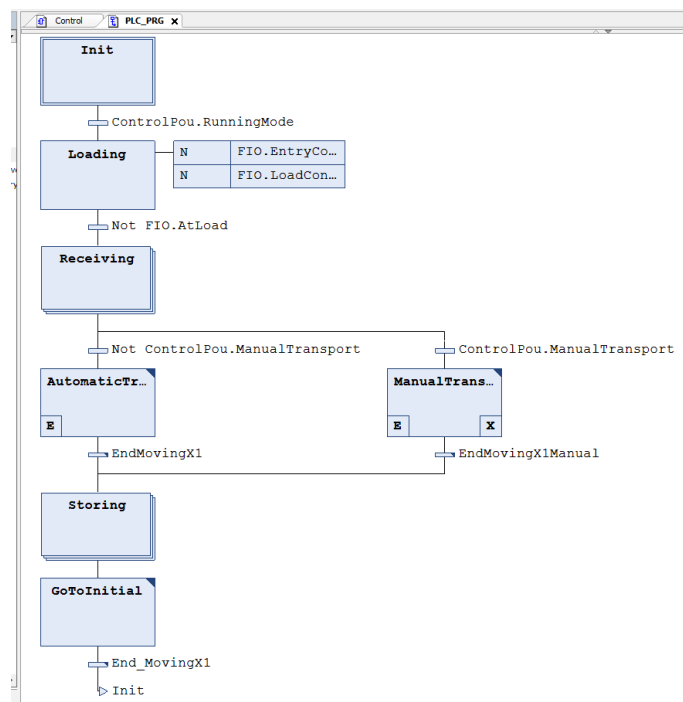
Na implementáciu pomocného programu Control (Obrázok 5) sme použili programovací jazyk Function Block Diagram (FBD) nakoľko tuto riadime dva procesy, ktoré závisia iba od vstupu od operátora. Teda procesy sa nevykonávajú sekvenčne a nezávisia jeden od druhého. V prvom bloku programu nastavujeme hodnotu globálnej premennej *RunningMode* ktorá je boolovského typu. Jej hodnota sa nastaví na základe hodnoty z tlačítka Štart, Stop, Reset a Emergency Stop. Na nastavenie hodnoty používame RS blok. Hodnota z premennej *RunningMode* štartuje a zastavuje proces v hlavnom programe. V druhom bloku programu nastavujeme hodnotu globálnej premennej *ManualTransport*, ktorá je boolovského typu. Na nastavenie hodnoty používame boolovsky operátor AND s tromi vstupmi. Pomocou tejto premennej budeme ovládať prepínanie medzi automatickým a manuálnym riadením v hlavnom programe.



Obr. 5: Pomocný program Control

3.1.3 Hlavný program

Ako sme už spomenuli, hlavný program sa vykonáva sekvenčne, a teda na implementáciu tohto programu sme použili programovací jazyk Sekvenčný funkčný diagram (SFC). Program sa skladá zo 6 blokov (Obrázok 6). Na samom začiatku máme



Obr. 6: Hlavný program

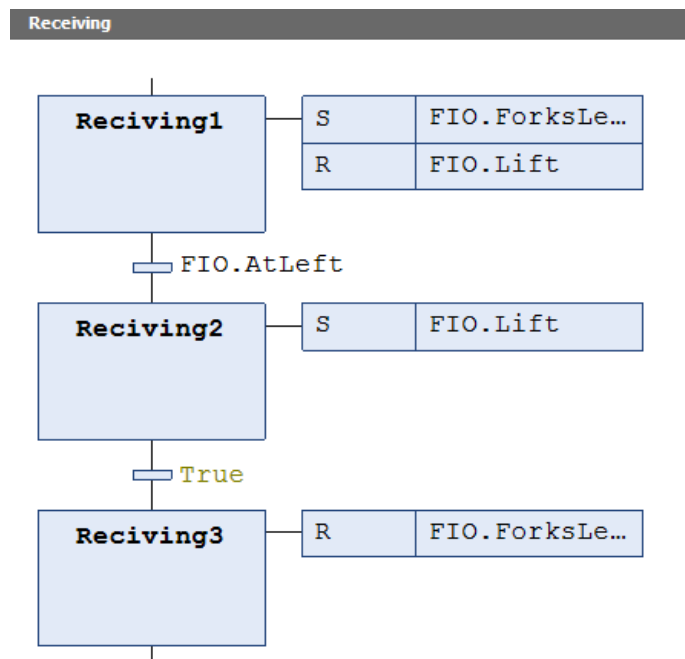
inicializačný blok *Init*, ktorý prejde do nasledovného kroku, keď hodnota globálnej premennej *RunningMode* bude True. V ďalšom kroku máme blok *Loading*, ktorý aktivuje valčekový a výrobný pás. Na aktiváciu pásov sme použili dve IEC akcie. Tieto akcie sa vykonávajú iba, keď je blok *Loading* aktívny. V tomto prípade to znamená, že sa blok deaktivuje a oba pásy sa zastavia, keď produkt príde po koniec nakladacieho pásu, kde ho senzor *AtLoad* zdetekuje. Nasledovný krok je blok *Receiving*. Tu sme použili makro a jednotlivé bloky zabalili, nakoľko sa krok pre naloženie produktu na žeriav skladá z troch častí (Obrázok 7). Najprv sa aktivuje ľavá vidlica žeriavu (aktuátor *ForksLeft*), resp. vysunie sa dopredu a nakoľko vidlica musí byť pod produktom, aktuátor *Lift*, musí byť deaktivovaný. Akonáhle senzor na žeriave *AtLeft* zdetekuje vysunutie vidlice, prechádzame do ďalšieho bloku a tam iba opäť aktivujeme aktuátor *Lift*, aby produkt zodvihol. Akonáhle je produkt zodvihnutý, prejdeme do ďalšieho bloku a resetujeme ľavý aktuátor *ForksLeft*. Ďalším krokom je transport produktu do skladu. Toto sme vyriešili pomocou alternatívnej vetvy ktorá obsahuje dva bloky *AutomaticTransporting* a *ManualTransporting*. Iba jeden z nich sa aktivuje a to v závislosti od toho, aká je hodnota globálnej premennej *ManualTransport*, ktorú nastavujeme v pomocnom programe Control.

Na vstupe do bloku *AutomaticTransporting* máme akciu *AutomaticTransport_entry* ktorú sme implementovali pomocou štruktúrovaného textu (Obrázok 8). Najprv si v slučke

skontrolujeme, či sa hodnota premennej *AvailablePosition* už nachádza v poli *ProductsInStack*. Akonáhle ju nájdeme, premennú *AvailablePosition* zvýšime o 1, skontrolujeme prvé voľne dostupné miesto v sklade (v poli *ProductsInStack*) a na tú pozíciu zapíšeme hodnotu z premennej *AvailablePosition*. Po skončení tejto akcie, nasleduje akcia *AutomaticTransport_active* v ktorej iba do aktuátora *TargetPosition* nastavíme hodnotu premennej *AvailablePosition*. Na ukončenie tohto bloku, ako podmienku pre prechod do nasledovného kroku máme funkčný blok *F_TRIG* ktorého hodnota bude *True* akonáhle sa vozík na žeriave zastaví na danej pozícii (resp. hodnota senzora pohybu *MovingX* bude *False*).

Na vstupe do bloku *ManualTransporting* máme akciu *ManualTransport_entry* v ktorej si ošetríme či hodnota premennej *TargetPositionFromUser* (hodnota ktorú si zvolil operátor) sa nenachádza v poli *ProductsInStack*, keď nie tak ju tam pridáme. Následne sa vykoná akcia *ManualTransport_active*, v ktorej iba presunieme hodnotu z globálnej premennej *TargetPositionFromUser* do aktuátora *TargetPosition*. Na výstupe z bloku máme akciu *ManualTransport_exit* kde iba vynulujeme hodnotu z globalne premennej *TargetPositionFromUser* aby sa nám resetla hodnota globálnej premennej *ManualTransport* na *False*. Opäť, na ukončenie tohto bloku ako podmienku pre prechod do nasledovného kroku použijeme funkčný blok *F_TRIG*.

Ďalším krokom je blok *Storing*, ktorý je inverzný od bloku *Receiving*. Akonáhla je produkt vložený do skladu, prejdeme do posledného bloku *GoToInitial* ktorý má na vstupe akciu *GoToInitial_active* kde iba nastavíme hodnotu aktuátora *TargetPosition* na 55, aby sa žeriav vrátil späť na začiatočnú pozíciu. Akonáhle sa vozík zastaví (hodnota senzora pohybu *MovingX* bude *False*) opäť sa aktivuje inicializačný blok *Init* a proces sa opakuje.



Obr. 7: Makro pre Receiving Step

```

1 //Loop to check if AvailablePosition is already in ProductsInStack array
2 REPEAT
3   found:=FALSE;
4   FOR i:=0 TO 53 DO
5     IF ControlPou.ProductsInStack[i] = AvailablePosition THEN
6       found:=TRUE;
7     END_IF
8   END_FOR
9   IF found THEN
10    AvailablePosition:=AvailablePosition+1; //If AvailablePosition already exists in array, increase by 1
11  END_IF
12  UNTIL NOT found
13 END_REPEAT
14 //Store AvailablePosition in ProductsInStack array
15 FOR i:=0 TO 53 DO
16   IF ControlPou.ProductsInStack[i] = 0 THEN //Check for empty slot in AllPosition array
17     ControlPou.ProductsInStack[i]:=AvailablePosition;
18   END_IF
19 END_FOR
20 EXIT;
21 END_IF
22 END_FOR
  
```

Obr. 8: Vstupná akcia pre blok *AutomaticTransport*

3.1.4 Prepojenie PLC so skladovým systémom v Factory IO

Pre nadviazanie spojenia medzi virtuálnym PLC v Codesys a skladovým systémom vo Factory IO sme použili protokol OPC UA. Virtuálne PLC beží lokálne na OPC UA serveri pomocou Codesys runtime a Factory IO v tomto prípade bude OPC UA klient. Konfigurácia tohto protokolu bola pomerne jednoduchá. Vo Factory IO sme si nastavili príslušnú URL nášho serveru, vyfiltrovali globálne premenné zo zoznamu FIO a každý senzor a aktuátor z Factory IO sme namapovali na príslušnú premennú zo zoznamu FIO.

4 Návrh a špecifikácia mobilnej aplikácie

Ako sme už spomenuli, operátor riadi a monitoruje sklad pomocou mobilnej aplikácie. To znamená že v mobilnej aplikácii potrebuje mať možnosť naštartovať proces stlačením tlačítka Štart, zastavením procesu stlačením tlačítka Stop a proces celkom ukončiť odpojením sa zo serveru. Taktiež, má možnosť monitorovať počet voľných miest v sklade ako aj počet produktov, ktoré sa v sklade nachádzajú. Poslednou požiadavkou je, aby mal možnosť si vybrať, na akú pozíciu chce produkt do skladu umiestniť.

4.1 Prepojenie mobilnej aplikácie so skladovým systémom

Na zabezpečenie riadenia a monitorovania skladu z mobilnej aplikácie, potrebujeme nadviazať pevné spojenie s celým systémom. Pre jednoduchšiu štruktúru riadenia a zobrazovania údajov používame nasledovné technológie:

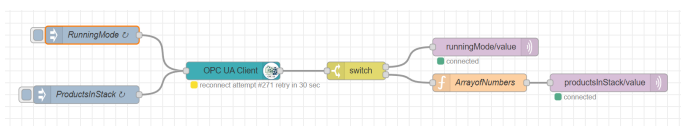
- Node-RED - obsahuje OPC UA klienta pre prijímanie a posielanie údajov na OPC UA server a klientov pre MQTT broker na výmenu dát s mobilnou aplikáciou a OPC UA klientom
- HiveMQ broker - server pre MQTT protokol

4.1.1 Implementácia komunikácie v Node-RED

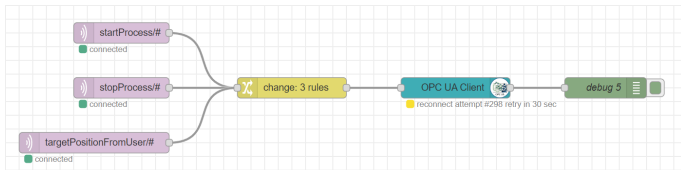
Ako sme už spomenuli, framework Node-RED používame ako prostredníka medzi PLC bežiacie na OPC UA serveri a mobilnou aplikáciou, ktorá posielala a prijíma údaje pomocou protokolu MQTT.

Vytvorili sme dvoch OPC UA klientov. Jeden pre prijímanie dát zo serveru (Obrázok 9) a druhý pre posielanie (Obrázok 10). Aby sme mohli prijímať údaje z OPC UA serveru,

operátor monitoruje aktuálne údaje a riadi skladový systém (Obrázok 11, 12).



Obr. 9: Prepojenie OPC UA klient - READ s MQTT Publish



Obr. 10: Prepojenie MQTT Subscribe s OPC UA klient - WRITE

potrebujeme vytvoriť OPC UA klienta ktorý bude mať nasledovné nastavenie:

- Endpoint - URL na OPC UA server (v našom prípade to je `//localhost:4840`)
- Action - pre príjem dát zo servera, ako akciu nastavíme READ

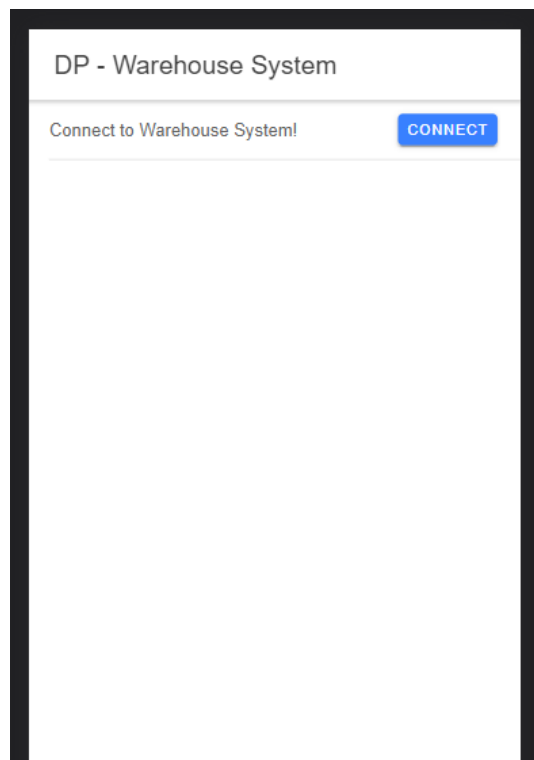
Vstupom do klienta sú dve adresy uzlov, ktoré sa nachádzajú na OPC UA serveri. Nakoľko mi potrebujeme v mobilnej aplikácii informáciu o tom, či proces beží a aký je aktuálny stav v sklade, tak zo serveru potrebujeme adresu týchto dvoch uzlov. Do injekčného uzlu ako topic nastavíme adresu OPC UA uzlu a keďže chceme mať aktuálne dáta, tak si nastavíme možnosť injektovať uzol na každú sekundu.

Výstup z klienta pošleme na MQTT broker pomocou uzla MQTT Publish. Taktiež aj tu máme dva uzly, jeden pre aktuálny stav procesu a druhý pre aktuálny stav v sklade.

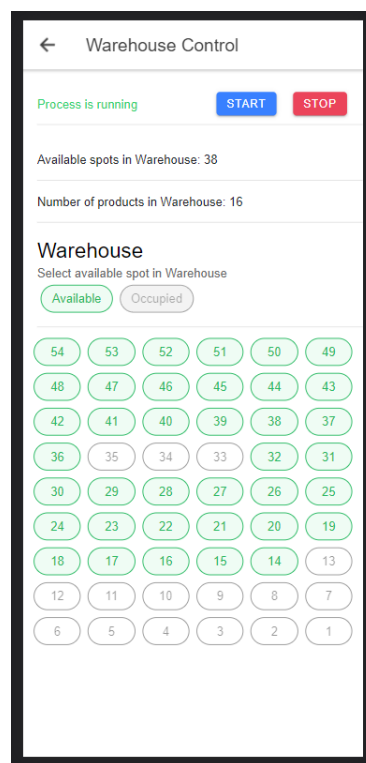
Na posielanie údajov z mobilnej aplikácie ako sme už spomenuli, používame MQTT protokol s uzlom MQTT Publish. Údaje ktoré operátor pošle z mobilnej aplikácie odchyťame v Node-RED pomocou MQTT uzla Subscribe. Pre každý uzol správne nastavíme jeho topic, nakoľko aby sme poslali údaje na server potrebujeme vedieť adresu uzla do ktorého hodnotu posielame. Taktiež tentokrát OPC UA klient má ako Action nastavenú hodnotu WRITE.

4.1.2 Implementácia mobilnej aplikácie

Nakoľko sme chceli, aby mobilná aplikácia bola multiplatformová, tak sme si na jej vývoj zvolili voľne dostupný framework Ionic. Mobilná aplikácia má dve obrazovky, resp. dva komponenty a jeden servis. Komponent s názvom Home reprezentuje domovskú obrazovku, odkiaľ operátor má možnosť sa napojiť na MQTT broker stlačením tlačítka Connect. Komponent s názvom WarehouseControl reprezentuje obrazovku Warehouse s možnosťou riadiť a monitorovať sklad. Akonáhle sa operátor pripojí na MQTT broker, načíta sa obrazovka Warehouse a



Obr. 11: Domovská obrazovka



Obr. 12: Aktuálny stav procesu a produktov v sklade

5 Záver

V článku je predstavené moderné riešenie na riadenie a monitorovanie udalostného systému s využitím multiplatformovej mobilnej aplikácie. Nakoľko sa na prepojenie udalostného systému s mobilnou aplikáciou využíva komunikačný štandard OPC UA, predložené riešenie by sa mohlo rozšíriť a prepojiť s akoukoľvek ďalšou platformou, ktorá povoľuje prístup k sieti. Multiplatformovú mobilnú aplikáciu sme vyvíjali vo voľne dostupnom frameworku Ionic. Výhodou tohto frameworku je v tom, že pomocou webových technológií akými sú HTML, CSS, Javascript, Angular a Typescript sme dokázali pomerne rýchlo implementovať multiplatformové riešenie [9]. Mobilnú aplikáciu sme otestovali aj na fyzických zariadeniach pre platformy Android a iOS a pre obe platformy výsledok bol rovnako úspešný.

Literatúra

- [1] K. S. Kiangala, Z. Wang.
Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97:3251–3271, May 2018
- [2] S. Y. Lee, M. Sung
OPC-UA Agent for Legacy Programmable Logic Controllers *Applied Sciences* , 2022, 12, 8859
- [3] B. Hruz, Š. Kozák, V. Veselý.
New Trends in Education of Automation and Information Technology *Slovak Society for Cybernetics and Informatics*, 1336-4774, September 2004.
- [4] Základné prvky Industry 4.0
<https://industry4.sk/o-industry-4-0/principy/>
- [5] W. J. Shyr, T. J. Su and C.M. Lin
Development of Remote Monitoring and a Control System Based on PLC and WebAccess for Learning Mechatronics *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, 97:2013, Dec 2012
- [6] What is CODESYS and Why is it Important?
<https://realpars.com/codesys-basics/>
- [7] W. J. Shyr, T. J. Su and C.M. Lin
Development of Remote Monitoring and a Control System Based on PLC and WebAccess for Learning Mechatronics *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, 97:2013, Dec 2012
- [8] A.W.L. Yao, S.D. Strombeck, J.S.C. Chi
Development of a mobile manufacturing system with PDA and PLC *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25:723–729, June 2004
- [9] What Is Ionic And How Does It Work?
<https://appstronauts.co/blog/what-is-ionic-and-how-does-it-work/>

Edukačná aplikácia vo virtuálnej realite pre obsluhu pálenice

Adam Móricz, Erik Kučera

Ústav automobilovej mechatroniky
Aplikovaná mechatronika a elektromobilita

xmoricz@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zaoberá využitím virtuálnej reality v priemysle, konkrétnejšie pri tréningu obsluhy pálenice. Na začiatku práce sa zaoberáme, čo je to virtuálna realita a o jej rôzne typy. Ďalším krokom je oboznámenie sa o rôznom využití virtuálnej reality nielen v priemysle, ale aj v medicíne, v turistike, bankovníctve a v mnoho ďalších oblastiach. Ďalšia časť práce sa zaoberá vytvorením aplikácie, v ktorej si používateľ naučí ako obsluhovať pálenicu, a vie si vyskúšať jej obsluhu aj na ostro.

1 Úvod

Technológia virtuálnej reality (VR) zaznamenala v posledných rokoch rýchly pokrok a jej vplyv na rôzne odvetvia je čoraz zjavnejší. Od hier a zábavy až po školenia a simulácie má VR potenciál revolučne zmeniť spôsob fungovania podnikov a interakcie so zákazníkmi.

Cieľom tejto práce je preskúmať súčasné a potenciálne využitie VR v priemysle so zameraním na jej výhody, obmedzenia a výzvy. V rámci výskumu sa budú analyzovať prípadové štúdie spoločností, ktoré úspešne implementovali VR do svojej činnosti, ako aj skúmať odvetvia, ktoré budú pravdepodobne najviac ovplyvnené technológiou VR.

Cieľom tejto práce je poskytnúť komplexné pochopenie používania VR v priemysle vrátane výhod a nevýhod prijatia VR, úlohy VR pri formovaní budúcnosti práce a dôsledkov pre podniky a spoločnosť ako celok.

2 Virtuálna realita

Virtuálna realita je počítačom vytvorené prostredie, s ktorým môžu používatelia komunikovať zdanlivo reálnym spôsobom. Umožňuje používateľom zažiť digitálne prostredie a objekty, akoby boli skutočné, a to prostredníctvom náhlavných súprav VR, ktoré zakrývajú oči a uši a sledujú pohyb používateľa. Technológia VR má množstvo potenciálnych aplikácií vrátane hier, zábavy, vzdelávania, simulácie a terapie. Očakáva sa, že odvetvie VR bude v nasledujúcich rokoch naďalej rásť a rozširovať sa, keďže veľké spoločnosti investujú do technológie VR a hardvér a softvér sú čoraz dostupnejšie a cenovo prijateľnejšie (1, 2).

História VR siaha do 60. rokov 20. storočia, keď kombinácia technologického pokroku a vedeckého výskumu viedla k vývoju prvých systémov VR. Technológia VR sa však

začala presadzovať v komerčných aplikáciách až v 90. rokoch 20. storočia a v roku 2000 s príchodom pokročilejšej počítačovej grafiky a hardvéru (3).

Technológia VR však nie je bez obmedzení a výziev. Niektorí používatelia môžu pri používaní VR pociťovať nepohodlie alebo pohybovú nevoľnosť a obsah dostupný vo VR je stále obmedzený. VR si vyžaduje vysoký výpočtový výkon a nemusí fungovať na starších počítačoch a na optimálne používanie si vyžaduje aj veľký priestor a voľný výhľad. Okrem toho má používanie VR dôsledky na súkromie a bezpečnosť a táto technológia sa stále vyvíja a jej potenciálne využitie a vplyv na spoločnosť ešte nie sú úplne pochopené.

2.1 Kategórie virtuálnej reality

Virtuálnu realitu môžeme rozdeliť na 3 rôzne kategórie, podľa stupňa ponorenia.

2.1.1 Ne-imerzívne VR systémy

Ne-imerzívna VR je najjednoduchšia a najdostupnejšia forma virtuálnej reality. Zvyčajne si nevyžaduje používanie špecializovaného hardvéru VR, ako je náhlavná súprava alebo ručné ovládače, a používatelia môžu komunikovať s virtuálnym prostredím pomocou bežných zariadení, ako je počítač alebo smartfón (1).

Medzi príklady ne-imerzívnej VR patria napr.:

- Webové stránky
- Kiosky
- Počítače

Ne-imerzívna VR poskytuje menej intenzívny a prístupnejší zážitok ako imerzívnejšie formy VR, čo z nej robí dobrý vstupný bod pre jednotlivcov, ktorí s technológiou VR začínajú. Okrem toho môže ísť o nákladovo efektívny spôsob skúmania obsahu VR a môže sa používať v rôznych prostrediach vrátane škôl, múzeí a verejných podujatí (4).

2.1.2 Polo-imerzívne VR systémy

Polo-imerzívna virtuálna realita je zmesou ne-imerzívnej a plne imerzívnej virtuálnej reality. Môže mať podobu 3D priestoru alebo virtuálneho prostredia, v ktorom sa môžete sami pohybovať buď prostredníctvom obrazovky počítača, alebo VR boxu/náhlavnej súpravy. Všetky činnosti vo virtuálnom svete sa teda sústreďujú smerom k vám. Nemáte však žiadne reálne fyzické pohyby okrem vizuálneho zážitku.

Na počítači sa môžete pohybovať po virtuálnom priestore pomocou myši a na mobilných zariadeniach sa môžete pohybovať dotykom a potiahnutím prstom (1, 2).

2.1.3 Plne imerzívne VR systémy

Plne imerzívna VR je najpokročilejšia forma virtuálnej reality a poskytuje používateľom najrealistickejší a najkomplexnejší zmyslový zážitok. Zvyčajne zahŕňa použitie špičkového displeja namontovaného na hlave a viacerých snímačov a kamier na sledovanie pohybov používateľa a na zabezpečenie presného sledovania hlavy a tela. Displej sa zvyčajne rozdeľuje medzi oči používateľa, čím sa vytvára stereoskopický 3D efekt, a v kombinácii so sledovaním vstupov vytvára pohlcujúci, vierohodný zážitok (1, 2).

Plne imerzívna VR je navrhnutá tak, aby poskytovala pocit prítomnosti vo virtuálnom prostredí, a bežne sa používa na účely simulácie, vzdelávania a zábavy. Umožňuje používateľom komunikovať s virtuálnym prostredím a objektmi realistickejším a intuitívnejším spôsobom ako iné formy VR a môže poskytnúť pocit pohltienia, ktorý je neporovnateľný s inými formami médií (4).

Plne imerzívna VR má však aj svoje obmedzenia. Môže byť drahá a zložitá a môže si vyžadovať značné investície do hardvéru a infraštruktúry. Okrem toho môžu používatelia pri používaní plne imerzívnej VR pociťovať určité nepohodlie alebo dezorientáciu a možno budú musieť robiť prestávky alebo obmedziť svoje vystavenie obsahu VR.

Napriek týmto obmedzeniam je plne imerzívna VR rýchlo sa rozvíjajúca a vzrušujúca oblasť technológie so širokou škálou aplikácií a rastúcou základňou používateľov. Keďže technológia VR naďalej napreduje, je pravdepodobné, že plne imerzívna VR bude ešte dostupnejšia a rozšírenejšia a bude zohrávať čoraz dôležitejšiu úlohu v rôznych oblastiach, od zábavy až po vzdelávanie a ďalšie.

2.2 Využitie virtuálnej reality okrem hier

Hoci sa VR často spája s videohrami, má mnoho ďalších aplikácií a využití mimo zábavy. VR sa dá využiť v rôznych odvetviach vrátane vzdelávania, zdravotníctva, vojenského výcviku, dizajnu a marketingu. Vo vzdelávaní sa VR môže používať na vytváranie interaktívnych, pútavých vzdelávacích zážitkov, ktoré študentom umožňujú skúmať predmety praktickým a pohlcujúcim spôsobom. V zdravotníctve sa VR môže používať na terapiu a rehabilitáciu, pričom umožňuje pacientom precvičovať pohyby a činnosti v kontrolovanom a bezpečnom prostredí. Armáda využíva VR aj na výcvikové účely, pričom vojakom poskytuje simulácie reálnych scenárov, ktoré ich pripravujú na boj (6, 7).

V oblasti dizajnu sa VR môže používať na vytváranie prototypov a testovanie, čo dizajnérom umožňuje otestovať realizovateľnosť a funkčnosť ich návrhov vo virtuálnom prostredí. VR sa využíva aj v marketingu, kde poskytuje zákazníkom jedinečný a pútavý zážitok a umožňuje im interakciu s výrobkami spôsobom, ktorý predtým nebol možný (8).

Celkovo má VR množstvo využití aj mimo videohier a má potenciál spôsobiť revolúciu v mnohých odvetviach.

2.3 Automobilový priemysel

Virtuálna realita (VR) mení automobilový priemysel tým, že inžinierom a konštruktérom ponúka účinný spôsob testovania a experimentovania s dizajnom a konštrukciou vozidla. Používaním VR sa dá vyhnúť nákladným prototypom, pretože vizuálny dizajn a zakrytie objektov sa dajú skontrolovať a vyhodnotiť už na začiatku procesu. Spoločnosti ako BMW a Jaguar Land Rover (JLR) využívajú VR na tento účel už nejaký čas a ukázalo sa, že ide o úsporné opatrenie, pretože výrazne znižuje počet prototypov potrebných na jednu líniu vozidla (9).

2.4 Zdravotníctvo

VR zaznamenáva v lekárskom priemysle veľký pokrok. Jedným z príkladov jej využitia je liečba znižovania bolesti. V novembri 2021 schválil úrad FDA na liečbu znižovania bolesti u dospelých používanie VR EaseVRx na lekárske predpis. Systém využíva kognitívno-behaviorálnu terapiu a ďalšie behaviorálne princípy, ako je hlboká relaxácia, zmena pozornosti a interoceptívne uvedomovanie, ktoré pomáhajú pri znižovaní chronickej bolesti (7, 8, 9).

Zdravotnícki pracovníci môžu využívať VR na lepšiu prípravu na pobyt v operačnej sále, či už ako mladší lekár vysvetľujúci diagnózy a liečebné plány alebo ortopéd vykonávajúci operáciu. Spoločnosti ako Osso VR ponúkajú simulácie pre chirurgov, ktorí môžu komunikovať so zdravotníckymi pomôckami vo VR a nacvičovať operácie na virtuálnych telách, čo pomáha zlepšiť oboznámenie sa s novými pomôckami a zručnosť pri ich implantácii (7, 8, 9).

VR bola uznaná aj ako liečba problémov duševného zdravia, pričom terapia expozíciou vo virtuálnej realite je obzvlášť účinná pri liečbe post traumatickej stresovej poruchy a úzkosti. Čas strávený vo VR má množstvo terapeutických výhod (7, 8, 9).

2.5 Turistika

Obmedzenia spôsobené celosvetovou pandémiou spôsobili, že mnohí túžia po možnosti cestovať, navštíviť rôzne kultúry a spoznať svetoznáme pamiatky. Vďaka VR teraz môžete absolvovať prehliadky miest, ako je Barcelona alebo Budapešť, priamo z pohodlia domova, bez ohľadu na to, kde sa práve nachádzate. Môžete si vychutnať aj prehliadku Edinburghu s Harry Potterom (9, 11).

V post pandemickom svete umožnila technológia VR prezrieť si dovolenku ešte pred jej rezerváciou. Napríklad v roku 2015 spoločnosť Thomas Cook predstavila VR zážitok "Try Before You Fly" (Vyskúšajte, než poletíte), ktorý potenciálnym cestovateľom umožnil navštíviť predajne a vyskúšať si dovolenku vo VR ešte pred jej rezerváciou. Výsledkom bol 190 % nárast počtu rezervácií výletov do New Yorku (9).

Okrem toho VR Expeditions 2.0 poskytuje virtuálne výlety do terénu, ktoré umožňujú navštíviť miesta, ako je Koloseum v Ríme, koralové útesy, a dokonca aj povrch Marsu, z pohodlia domova (9).

2.6 Architektúra

Využívanie VR mení prístup architektov pri navrhovaní a experimentovaní s ich projektmi. Vďaka VR si architekti môžu nielen predstaviť, ako bude budova alebo priestor vyzeráť, ale aj zažiť, ako sa v ňom budú cítiť. Napríklad majiteľ nehnuteľnosti, ktorý chce pridať prístavbu, si môže priestor prezrieť vo VR a v reálnom čase ho upraviť ešte pred fyzickou výstavbou, čím ušetrí čas, peniaze a zvýši spokojnosť po dokončení projektu. Hoci architekti už dlho používajú 3D modely, používanie nástrojov VR im umožňuje pochopiť a preskúmať priestor v plnom rozsahu. Britská televízia BBC dokonca pripravila televízny program "Your Home Made Perfect", v ktorom dvaja súťažiaci architekti predvádzajú majiteľom domov návrhy vo VR ešte pred ich reálnou výstavbou (9, 10).

2.7 Maloobchodný predaj – Obchodníctvo

Nástup technológie virtuálnej reality, známej ako "metaverse", je pripravený priniesť revolúciu v online nakupovaní. Vďaka maloobchodným zážitkom vo virtuálnej realite a technológiám skenovania tela si budú môcť spotrebiteľia virtuálne vyskúšať oblečenie, čo ušetrí čas a podporí udržateľnosť. Zákazníci budú napríklad vopred vedieť, či im daný tovar sedí veľkosťou a tvarom, čím sa zníži vplyv rýchlej módy a nadmernej prepravy na životné prostredie (6, 9).

Viaceré spoločnosti sa usilujú o oživenie zážitku z nakupovania vo VR. Európsky maloobchodný predajca ASOS investoval do spoločnosti Trillenium, ktorá sa zaoberá vývojom softvéru. Módne veľmoci, ako napríklad Hugo Boss, budú medzi prvými, ktorí sa v marci 2022 zúčastnia na úvodnom týždni módy Metaverse Fashion Week s virtuálnymi prehliadkovými módlami, obchodmi a skúšobnými miestnosťami (6, 9).

Tento posun smerom k nakupovaniu vo virtuálnej realite sa neobmedzuje len na módu, čo dokazuje aj partnerstvo spoločnosti eBay s austrálskym maloobchodným predajcom Myer pri spustení prvého obchodného domu s virtuálnou realitou na svete v roku 2015 (9).

2.8 Nehnuteľnosť

Vďaka VR si teraz môžete nehnuteľnosti prezrieť z pohodlia svojho domova bez toho, aby ste museli plánovať stretnutia alebo venovať víkendy hľadaniu domu. Spoločnosti, ako napríklad Matterport, umožňujú jednotlivcom virtuálne preskúmanie domov online, čo poskytuje komplexnú predstavu o priestore a šetrí čas tým, že navštívite len domy, ktoré spĺňajú vaše očakávania. Táto technológia vám umožňuje zamerať sa na potenciálne nehnuteľnosti, ktoré si s najväčšou pravdepodobnosťou zamilujete osobne (9).

2.9 Učenie a rozvoj

Technológiu VR si osvojil aj vzdelávací sektor, pričom spoločnosti ako Bank of America poskytujú svojim 10 000 zamestnancom nástroje na učenie pomocou VR a spoločnosť Walmart školí pomocou VR 1 milión svojich zamestnancov. Táto technológia umožňuje jednotlivcom učiť sa prostredníctvom praktických skúseností v bezpečnom prostredí. Je nákladovo efektívna, konzistentná a škálovateľná.

Jedným z takýchto príkladov je spoločnosť VirtualSpeech, ktorá ponúka školenia VR zamerané na interpersonálne zručnosti, ako je verejné vystupovanie, aktívne počúvanie a predaj. Kombinuje e-learning so simuláciami VR a cvičeniami, vďaka čomu môžu účastníci rozvíjať svoju sebadôveru a zručnosti vo virtuálnych rokovacích miestnostiach a posluchárňach. Z výskumu spoločnosti PwC vyplýva, že vzdelávanie založené na VR vedie k vyššej úrovni uchovávaní informácií v porovnaní s tradičnými metódami vzdelávania, keďže ľudia sa môžu vo VR prostredí učiť až 4-krát rýchlejšie (9).

2.10 Nábor zamestnancov

Spoločnosť Lloyds Banking Group vytvorila v Spojenom kráľovstve precedens tým, že do hodnotenia budúcich absolventov v roku 2017 zahrnula simulácie VR. Využívanie VR má potenciál revolučne zmeniť spôsob hodnotenia pracovných zručností, ako je napríklad rozhodovanie, a potenciálne nahradiť tradičné metódy hodnotenia a zjednodušiť proces pohovoru pre zamestnávateľa aj uchádzača. Tento posun má potenciál priniesť kvalitnejšiu skupinu kandidátov, ako to vidíme v prípade spoločnosti Deutsche Bahn (9).

2.11 Zábava

Virtuálna realita spôsobila revolúciu v zábavnom priemysle a umožňuje ľuďom zažiť pohlcujúce a interaktívne médiá spôsobom, aký tu ešte nebol. VR zmenila spôsob, akým ľudia konzumujú zábavu a komunikujú s ňou, od hier a filmov až po živé predstavenia a zábavné parky.

Virtuálna realita sa využíva v zábavnom priemysle na zlepšenie zážitku divákov prostredníctvom 360-stupňových filmov, čo im umožňuje cítiť sa emocionálne prepojení s postavami alebo filmom. Spoločnosti ako Disney Movies VR ponúkajú zážitky vo VR, napríklad podujatia na červenom koberci a rozhovory s hercami filmov. Okrem toho má VR potenciál zmeniť spôsob, akým sa vytvára mediálny obsah. Spoločnosti ako Flipside XR ponúkajú možnosti animácie v reálnom čase a snímania pohybu, čo tvorcom umožňuje vytvárať interaktívne animované relácie alebo naživo vysielat animované predstavenia prostredníctvom VR alebo platforiem, ako sú YouTube, Twitch alebo Facebook Live (9).

Vo filmovom priemysle VR umožňuje filmárom vytvárať pohlcujúcejšie zážitky, pri ktorých sa diváci môžu preniesť do rôznych svetov a komunikovať s prostredím a postavami okolo seba. Niektoré filmové spoločnosti využívajú VR ako nástroj na pred vizualizáciu počas produkcie, ktorý umožňuje režisérom vidieť a plánovať scény vo virtuálnom prostredí ešte pred ich fyzickým nakrúcaním (11).

Z VR profitujú aj živé vystúpenia, pri ktorých umelci využívajú túto technológiu na vytvorenie jedinečných a nezabudnuteľných zážitkov pre svojich fanúšikov. Od virtuálnych koncertov až po pohlcujúce divadelné zážitky, VR umožňuje tvorcom preniesť publikum do svojho sveta doteraz nevídaným spôsobom (12).

VR mení zábavný priemysel a ponúka novú úroveň pohlcujúcich a interaktívnych zážitkov, ktoré v budúcnosti zmenia spôsob, akým konzumujeme médiá a ako s nimi komunikujeme.

3 Aplikácia

Celá aplikácia na obsluhu pálenice je vytvorená v hernom engine Unity. Na programovanie sa používal jazyk C# a vbudovaný Visual Scripting v unity. Model pálenice nám bol poskytnutý Strojníckou Fakultou.

Boli vytvorené 2 rôzne typy aplikácie. Prvý typ je desktopová verzia aplikácie, druhý je vo virtuálnej realite. Rozdiel medzi nimi je dosť dôkladný, keďže v desktopovej verzii používateľ si môže len pozrieť pálenicu a spustiť si vizualizáciu kde si vie viac prečítať o jednotlivých komponentoch pálenice.

3.1 Model pálenice



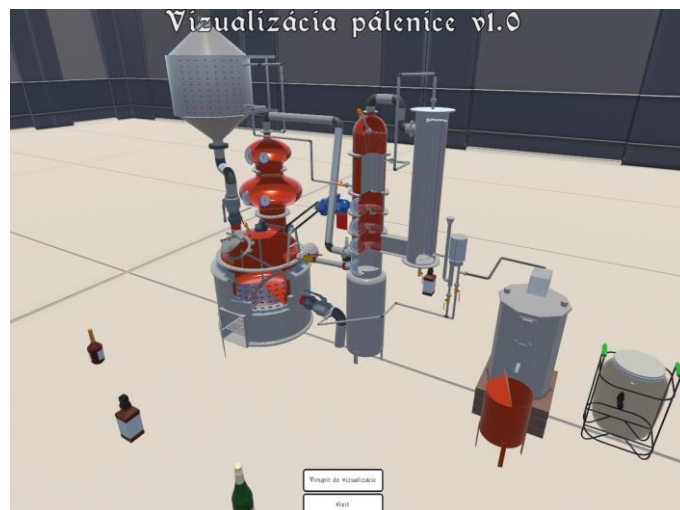
Obr. 1. Model pálenice

Ako vyššie bolo spomínané, model nám bol poskytnutý Strojníckou Fakultou, s ktorou spolupracujeme na vývoji aplikácie. Model sme museli viackrát upravovať aby sa nám vhodil do aplikácie. Úpravy boli napr. zvýraznenie farieb, úprava animácií na šípkach ktoré označujú paru.

3.2 Desktopová verzia aplikácie

V desktopovej verzii aplikácie si používateľ môže prezrieť celú pálenicu. Interakciu má limitovanú len na tlačidlá na obrazovke. Tlačidlá sa nachádzajú v ľavom dolnom rohu na obrazovke. Po kliknutí na spustiť vizualizáciu sa odoberie všetok kontrola od používateľa a môže si prečítať viac o jednotlivých komponentoch pálenice. Po ukončení vizualizácie sa kontrola vráti používateľovi. V ľavom hornom rohu sa ešte nachádza aj krátky popis, ako ovládať aplikáciu.

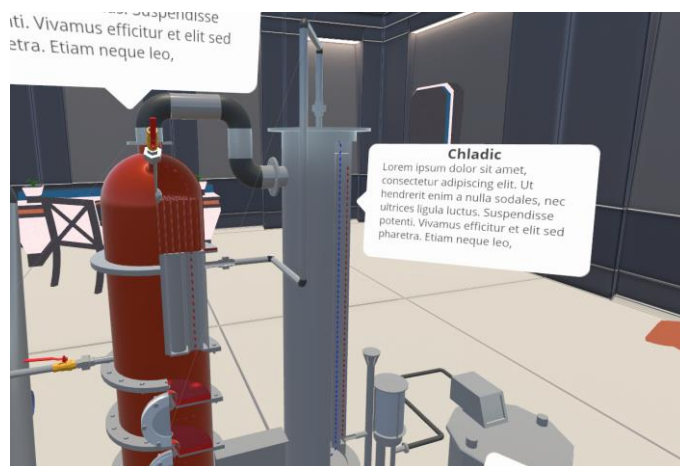
Pre desktopovú verziu bolo vytvorené malé menu, kde sa kamera točí okolo pálenice a okolo nej sú rôzne alkoholy.



Obr. 2. Screenshot z Menu desktopovej verzie



Obr. 3. Screenshot z desktopovej verzie aplikácie



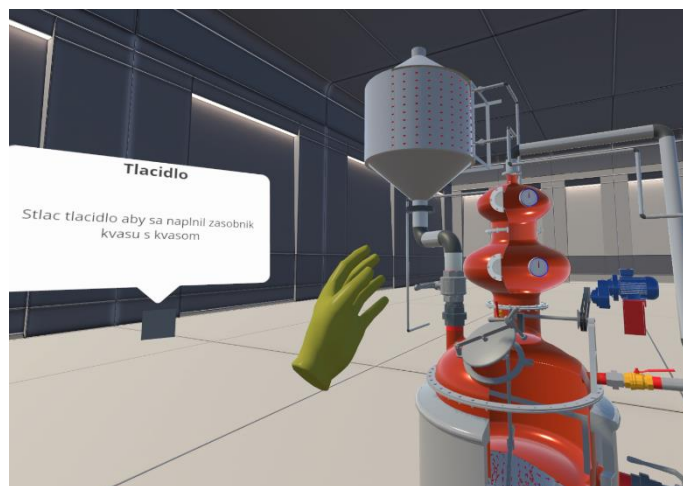
Obr. 4. Screenshot z polovici vizualizácie

3.3 Virtuálna verzia aplikácie

V tejto verzii máme naprogramovanú celú obsluhu pálenice. Obsluha nie je naprogramovaná na reálny čas. V tejto verzii

ešte neexistuje menu, takže používateľ je rovno hodený do scény s pálenicou, ktorá je pripravená na obsluhu.

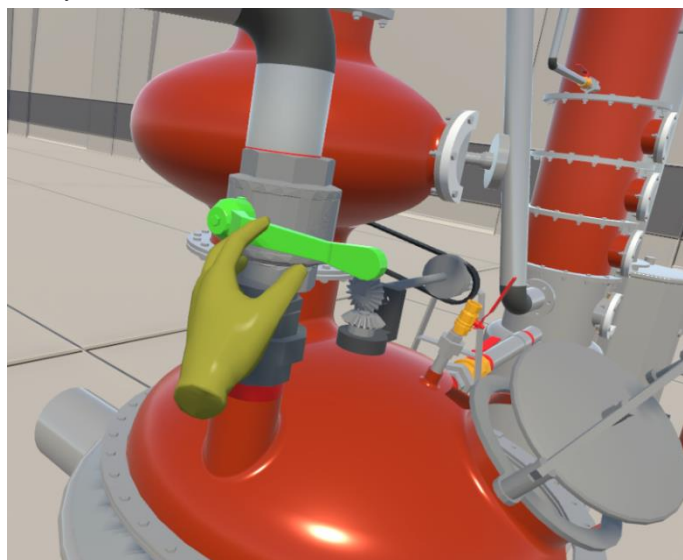
Na pohyb sa používa joystick na ľavom kontrolleri, alebo sa používateľ môže pohybovať v reálnom svete. Na otočenie sa môže používať joystick na pravom kontrolleri, alebo takisto keď sa používateľ otočí v reálnom svete, tak sa otočí aj vo virtuálnom.



Obr. 5. Prvý pohľad z VR aplikácie

V scéne vedľa pálenice je prvé "tlačidlo", ktoré spustí celú simuláciu. V scéne je viacero takýchto tlačidiel, ktoré sa zobrazujú len vtedy, keď ich akcia je relevantná. Nad tlačidlami je popis, že čo vlastne spraví.

Každý jeden ventil je integrovateľný na pálenici. Keď sa používateľ priblíži k jednému ventilu s rukou, ten ventil následne zmení farbu zo šedej na zelenú, aby sa ukázalo používateľovi že s týmto ventilom sa dá interagovať z takejto diaľky.



Obr. 6. Používateľ môže interagovať s ventilom lebo je zelený.

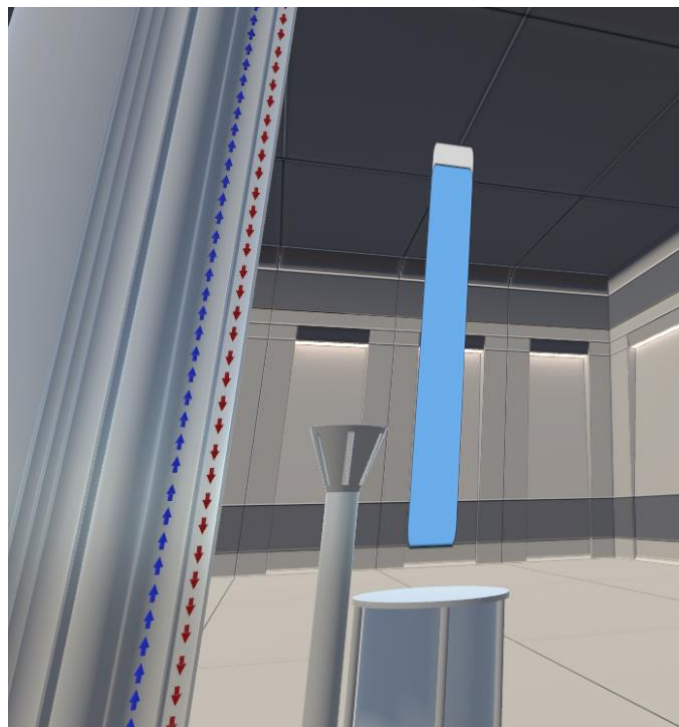
Po spustení simulácie musí používateľ dodržiavať správny postup pálenia, ináč celá simulácia padne, následne sa zobrazí chybová hláška pre používateľa, kde je napísané, že kvôli čomu zlyhala simulácia. Pod hláškou sa nachádza aj

tlačidlo, ktoré po stlačení reštartne celú simuláciu a používateľ môže začať od začiatku.



Obr. 6. Jedna z chybových hlášok s popisom prečo sa objavila.

Pri simulácii sa meria aj koľko destilátu pretieklo do odpadu, a koľko dobrého destilátu vyteklo do colnej správy. Kebyže používateľ nechá pretiecť zlý destilát do colnej správy, celá vypálená pálenka môže ísť do odpadu, lebo je nebezpečný na konzumáciu.



Obr. 7. Meradlo zlého destilátu, ktorý tečie práve do odpadu.

Keď používateľ dodržiaval správny postup pri pálení, dostane zelenú hlášku, že správne ukončil simuláciu. Pod hláškou sa takisto nachádza tlačidlo, ktoré po stlačení reštartne simuláciu a môže sa celá začať odznova.



Obr. 8. Hláska o úspešnom dokončení simulácie

4 Záver

V tejto práci bola predstavená virtuálna realita, jej rôzne kategórie a jej krátka história. Virtuálna realita nie je obmedzená len na videohry, ale dá sa aplikovať aj na rôzne oblasti ako vojenstvo, medicína či výučba. Aplikácia ktorá bola predstavená v druhej časti práce bola vytvorená v Unity a naprogramovaná v jazyku C# a pomocou vizuálneho skriptovania..

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať Erikovi Kučerovi za trpezlivosť a ochotu pri vypracovaní tejto práce, a Strojníckej fakulte za model pálenice.

Literatúra

- [1] The 3 types of virtual reality. Heizenrader. (2019, November 20). Retrieved April 19, 2023, from <https://heizenrader.com/the-3-types-of-virtual-reality/>
- [2] Sultan, C. S. (2023, April 4). 5 types of virtual reality – creating a better future. RexTheme. Retrieved April 19, 2023, from <https://rextheme.com/types-of-virtual-reality/>
- [3] Ameyers. (2023, February 28). History of virtual reality. The Franklin Institute. Retrieved April 19, 2023, from <https://www.fi.edu/en/virtual-reality/history-of-virtual-reality>
- [4] Types of VR system. (n.d.). Retrieved April 19, 2023, from <http://www.agocg.ac.uk/reports/virtual/37/chapter2.htm>
- [5] What is immersive VR? VRdirect. (n.d.). Retrieved April 19, 2023, from <https://www.vrdirect.com/wiki/what-is-immersive-vr/>
- [6] Joe BardiJoe Bardi is Marxent's tech-obsessed former Communications Director. (2022, December 13). Virtual reality defined & use cases. 3D Cloud by Marxent. Retrieved April 19, 2023, from <https://www.marxentlabs.com/what-is-virtual-reality/>

- [7] Munir, A. A. (2020, April 10). 5 exciting uses for virtual reality. FDM Group. Retrieved April 19, 2023, from <https://www.fdmgroup.com/blog/5-exciting-uses-for-virtual-reality/>
- [8] 5 new uses for virtual reality outside of gaming. Perforce Software. (n.d.). Retrieved April 19, 2023, from <https://www.perforce.com/blog/vcs/5-uses-virtual-reality#auto>
- [9] Thompson, S. (2022, March 1). VR applications: 23 industries using virtual reality. VirtualSpeech. Retrieved April 19, 2023, from <https://virtualspeech.com/blog/vr-applications>
- [10] Alcanja, D. (n.d.). Virtual reality applications: 10 industries using virtual reality in 2023. Trio Developers - Stop searching. Start building. Retrieved April 19, 2023, from <https://www.trio.dev/blog/virtual-reality-applications>
- [11] Arango, B. (2022, September 1). VR application in entertainment. Wondershare. Retrieved April 19, 2023, from <https://filmora.wondershare.com/virtual-reality/virtual-reality-use-in-entertainment.html>
- [12] Researcher, S. (2021, July 13). How AR and VR are changing film: A look at the revolutionary stagecraft, the volume. AMT Lab @ CMU. Retrieved April 19, 2023, from <https://amt-lab.org/blog/2021/7/how-ar-and-vr-are-changing-film-a-look-at-the-revolutionary-stagecraft-the-volume>

Programatické generovanie 3D identifikátora pre systémy zmiešanej reality

Martin Michalovič, Oto Haffner¹

Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave

Ústav automobilovej mechatroniky

xmichalovic@stuba.sk

Abstrakt – Príspevok je zameraný na tvorbu jedinečných 3D identifikátorov, ktoré vznikajú programatickým generovaním v prostredí Blender. Ide o inovatívny spôsob rozlišovania a identifikovania zhodných entít v rôznych podnikoch či továrňach. Cieľom práce bolo prispieť k vývoju takýchto identifikátorov prostredníctvom navrhovania a implementácie algoritmov pre generatívne modelovanie, ktoré môžu byť použité na rozlišovanie identických entít v priemyselných podnikoch, logistických reťazcoch, aplikáciách rozšírenej alebo zmiešanej reality a zároveň tiež poskytnúť optimálny model, ktorý môže byť kusovo vyrobený pomocou aditívnej výroby.

1 Úvod

S narastajúcou komplexnosťou priemyselných procesov a dodávateľských subjektov, rovnako aj s nástupom nových technológií, ako je napríklad zmiešaná realita, vznikajú výzvy v spoľahlivosti identifikovania a rozlišovania entít, ako sú objekty a zariadenia v rôznych podnikoch či továrňach.

Tradičné metódy založené na lineárnych alebo 2D maticových kódach majú obmedzenia v oblasti odolnosti a flexibility. Preto je potrebný vývoj nových metód identifikácie, a jedným sľubným prístupom je použitie unikátnych 3D identifikátorov.

Cieľom práce je prispieť k vývoju takýchto identifikátorov prostredníctvom navrhovania a implementácie algoritmov pre generatívne modelovanie 3D identifikátorov, ktoré môžu byť použité na rozlišovanie identických entít v priemyselných podnikoch, logistických reťazcoch, aplikáciách rozšírenej alebo zmiešanej reality a podobne.

Navrhovaný prístup generatívneho modelovania ponúka niekoľko výhod oproti tradičným metódam. Jednou z výhod je napríklad možnosť vytvorenia 3D identifikátorov, ktoré sú rozpoznateľné v systémoch využívajúcich zmiešanú realitu a môžu byť skenované z akéhokoľvek uhla a na väčšie vzdialenosti. Navyše sú odolnejšie proti falšovaniu a replikácii ako súčasne využívané 2D kódy. Ďalšou z výhod je možnosť

kusovej výroby 3D identifikátorov pomocou 3D tlače, čo poskytuje škálovateľné a nákladovo efektívnejšie riešenie.

Pre dosiahnutie cieľov práce budú vyvinuté nové metódy a algoritmy pre generatívne modelovanie 3D objektov, ktoré zaručia jednoznačnú identifikáciu zariadení a iných entít s rovnakými tvarovými a rozmerovými vlastnosťami.

2 Analýza

V nasledujúcej kapitole sa zameriame na popis motivácie a použitej technológie. Priblížime si, prečo sme sa rozhodli práve pre túto tému, aké sú naše ciele a tiež si priblížime použitý softvér a knižnicu.

2.1 Motivácia

Identifikácia a rozlišovanie zhodných entít je aktuálnym problémom v priemyselných podnikoch, logistických reťazcoch alebo v aplikáciách rozšírenej a zmiešanej reality. Konvenčné postupy vizuálnej identifikácie objektov využívajú čiarové alebo 2D maticové kódy, ktoré možné jednoducho replikovať alebo dešifrovať vnorený identifikačný číselný alebo textový reťazec. Jedným z inovatívnych riešení je využitie unikátneho 3D identifikátora.

Generovanie takýchto identifikátorov je nutné realizovať tak, aby boli rozpoznateľné v systémoch využívajúcich zmiešanú realitu. Nespornou výhodou tejto metódy je možnosť snímania cieľového 3D objektu z ľubovoľného uhla a aj z väčšej vzdialenosti. Takisto aplikácia zmiešanej reality nestratí nájdený 3D objekt tak jednoducho, ako by to bolo v prípade 2D QR kódu. 3D identifikátor môže byť využitý aj v riešeniach poskytujúcich ovládanie a monitorovanie kyberneticko-fyzikálnych systémov (skrátene CPS) v sieťach IoT (anglicky Internet of Things) v zmiešanej realite.

V práci budú realizované nové metódy a algoritmy generatívneho modelovania 3D objektov, ktoré zaručia jednoznačnú identifikáciu zariadení a iných entít, ktoré majú rovnaké rozmerové a tvarové vlastnosti. Zároveň ich bude možné kusovo vyrábať 3D tlačou.

Medzi konvenčné metódy ovládania a diagnostiky CPS pripojených v IoT sieťach patria priemyselné panely,

¹ Vedúci práce

konzolové, webové alebo mobilné aplikácie. V prípade použitia týchto konvenčných metód môže byť tento spôsob v menšej miestnosti vyhovujúci. Nakoľko zoznam zariadení sa zmestí na jednu obrazovku, tak vieme monitorovať a ovládať zariadenia prakticky okamžite. Ak však ide o viac miestností alebo budov, čo v prípade digitálnych tovární nemožno vylúčiť, tak takýto spôsob interakcie sa stáva ťažkopádny [1 - 2].

Na základe uvedených zistení sa v roku 2018 na ÚAMT v rámci dizertačnej práce Ericha Starka začal výskum využitia rozšírenej reality ako novej formy rozhrania človek-stroj pre monitorovanie a ovládanie CPS. Výsledkom bol návrh, implementácia, overenie originálnych postupov a metód monitorovania a ovládania CPS, ktoré využívali IoT a originálny spôsob tvorby definičných schém pre dynamické generovanie používateľského rozhrania v AR [3]. Identifikácia zariadení v prostredí AR nevyužívala konvenčné metódy identifikácie závislé na skenovaní 2D QR kódov, ale moderné programové prostriedky pre rozpoznávanie 3D objektov. Systém, ktorý bolo žiadané ovládať alebo monitorovať, bol identifikovaný podľa jeho vlastného fyzického tvaru.

Môže však nastať situácia, že sa v podniku nachádza viac zariadení s podobným alebo dokonca rovnakým tvarom. Problémom tiež môžu byť zariadenia s veľmi veľkými rozmermi. V takýchto prípadoch by bolo možné využiť vlastné 3D identifikátory, ktoré by boli pre každé zariadenie alebo stroj unikátne. Práve tu nachádza naša práca uplatnenie. Výsledky prinesú nové riešenia pre digitalizáciu v podnikovom prostredí a budú tiež využité pre modernizáciu osnov predmetov a pre rozvoj ďalšej spolupráce s prácou.

Hlavným výsledkom výskumných riešení projektu je návrh a realizácia komplexnej metodiky pre tvorbu nového typu 3D identifikátora pomocou metód programatického generovania 3D modelov, ktoré môžu byť kusovo vyrábané pomocou aditívnej výroby - 3D tlače a získané poznatky budú využiteľné v riešení digitalizácie podnikov a logistických reťazcov (Industry 4.0) a takisto pilotných riešeniach z oblasti aplikácií metaverza.

2.2 Blender, Python API

Blender je softvér pre modelovanie a animáciu 3D objektov, ktorý je bezplatný a open-source. Jednou z hlavných výhod Blenderu pre parametrické programovanie je jeho schopnosť pracovať s programovacími jazykmi a skriptovaním.

Blender má vlastné Python API (anglicky Application Programming Interface), ktoré umožňuje používateľom písať vlastné skripty a automatizovať opakujúce sa úlohy. Táto funkcia je obzvlášť užitočná pri vytváraní parametrických modelov, pretože umožňuje používateľom definovať parametre a ľahko upravovať návrhy na základe meniacich sa požiadaviek alebo obmedzení.

Silný a flexibilný node-based systém Blenderu je ďalšou funkciou, ktorá robí softvér dobre vybaveným pre parametrické programovanie. Softvér umožňuje používateľom vytvárať zložité pracovné postupy a algoritmy pomocou vizuálneho rozhrania, ktoré sa dajú aplikovať na modely a návrhy. Node systém Blenderu je podobný systému Grasshopper v Rhino, a

oba ponúkajú užívateľom flexibilný a prispôsobiteľný spôsob vytvárania parametrických modelov [4].

2.2.1 Knižnica .bpy

V rámci práce sme pri vývoji identifikátora pracovali aj s využitím knižnice .bpy, ktorá sa zameriava na manipuláciu a automatizáciu procesov v 3D a je súčasťou softvéru Blender. Knižnica .bpy rozširuje možnosti Blenderu a jej využitie pre parametrické generovanie otvára množstvo možností pre automatizáciu a zefektívnenie procesov v 3D grafike. Vďaka skriptovaniu v Pythone a funkcionalite knižnice .bpy môžu používatelia navrhovať parametrické modely, ktoré reagujú na zmeny vstupných parametrov a vytvárajú tak dynamický obsah.

Knižnica .bpy umožňuje používateľom písať vlastné skripty, ktoré automatizujú opakujúce sa úlohy, vytvárajú rôzne zložité algoritmy a upravujú existujúce modely, čo pomáha výrazne zrýchliť proces navrhovania a uľahčiť tak iteráciu návrhov [2]. Jednoduchým príkladom pre demonštrovanie použitia niektorých príkazov z knižnice .bpy by mohlo byť napríklad vytvorenie novej kocky v 3D scéne. Vytvorenie novej kocky môžeme demonštrovať na nasledujúcich útržkoch kódov s vysvetlením:

Na začiatku importujeme knižnicu .bpy, pomocou príkazu **import bpy**.

Potom použijeme príkaz **bpy.ops.mesh.primitive_cube_add()**, ktorý vytvorí novú kocku v 3D scéne.

Následne presunieme kocku na novú pozíciu príkazom **bpy.context.active_object.location = (1.0, 2.0, 3.0)** a zmeníme jej farbu na červenú pomocou príkazu **bpy.context.active_object.data.materials.append(bpy.data.materials["Red"])**.

Nakoniec použijeme príkaz **bpy.ops.render.render()** na vykreslenie 3D scény [5].

3 Analýza 3D identifikátora

V nasledujúcej kapitole sa budeme venovať implementácii a postupu návrhu identifikátora spolu s opisom procesu tvorby a opisom základných elementov potrebných na jeho finálne zostavenie.

3.1 Základné elementy

Základom identifikátora považujeme jedinečné .stl prvky, ktoré tvoria steny objektu a sú implementované používateľom. Podrobnejšie a zrozumiteľnejšie sa k nim dostaneme neskôr v práci.

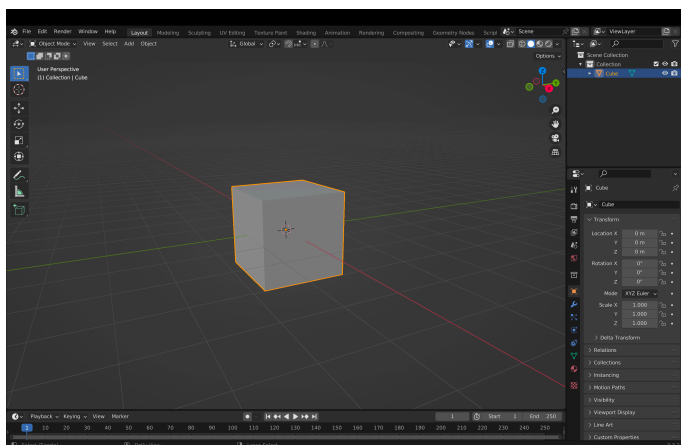
Pred vložením prvého prvku do scény vzniká digitálna forma identifikátora – zoznam, reprezentujúci jeho podobu zloženú z čísel 0, 1, 2 a 3. Táto reprezentácia môže byť napríklad výsledkom šifrovania pôvodného označenia stroja, jeho lokálnej identifikácie v podniku alebo výrobnéj hale a veľkosť zoznamu je možné prispôbiť. To znamená, že ak chceme identifikátor o rozmeroch 5x5x5, výsledný zoznam bude koncipovaný v požadovanej veľkosti na základe vstupu od používateľa.

Vstupom je teda číslo od používateľa, ktoré je transformované do požadovanej veľkosti zoznamu tak, aby sme

v ďalších krokoch mohli programaticky generovať finálny identifikátor a dokázali ho správne priradiť.

Keď máme takto pripravený zoznam prvkov, je potrebné sa rozhodnúť, ktorý element bude neskôr priradený ku ktorému číslu. Ešte predtým je však dôležité tieto elementy vytvoriť a prispôbiť v prostredí Blender.

Pracovali sme so základnou kockou (Obr. 1), ktorá má základnú veľkosť a s vyresetovanými súradnicami. Počiatočná poloha základnej kocky je $x: 0, y: 0, z: 0$.



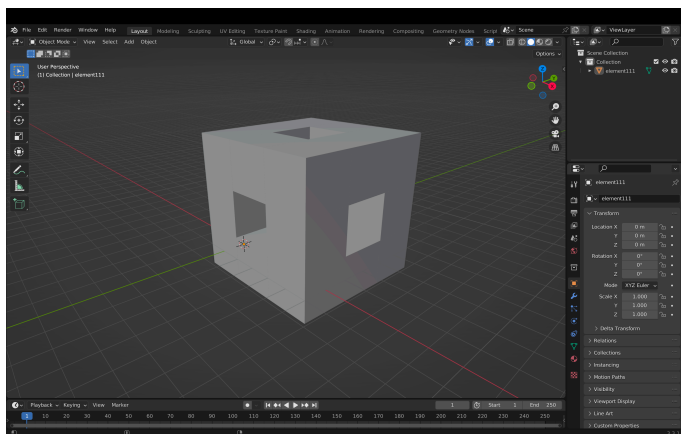
Obr. 1. Základná kocka – rozmer a poloha.

Zistili sme, že je potrebné, aby bol každý element vytvorený na rovnakých súradniciach ako ten predchádzajúci, pretože inak vyskladanie finálneho identifikátora nefunguje správne a jednotlivé elementy boli nesprávne rozložené po scéne a identifikátor tak nemal požadovaný tvar.

3.2 Pôvodné elementy

Pôvodná forma základných elementov, na ktorých bola demonštrovaná funkcionálna a logika programatického generovania bola koncipovaná do tvaru 3D kociek o rozmeroch $3 \times 3 \times 3$ (Obr. 2).

Navrhl sme štyri základné 3D elementy, vyskladané z kociek tak, aby sa navzájom medzi sebou líšili a boli rozoznateľné.

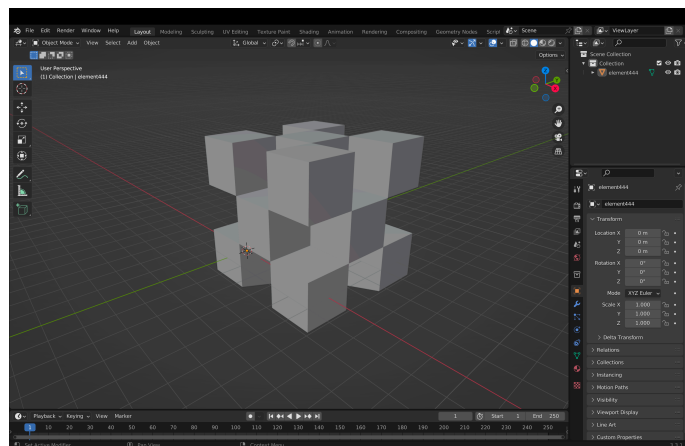


Obr. 2. Príklad pôvodného elementu.

Každý takýto objekt vznikol v separátnom súbore, pre prípad, že by sme sa neskôr potrebovali k jednotlivým objektom vrátiť a niečo pozmeniť. Zamedzíme tak nechcenému prepisovaniu predchádzajúcej práce a ušetríme čas pri neustálom preusporadúvaní kociek. Rovnako vieme hneď exportovať súbor v požadovanom formáte.

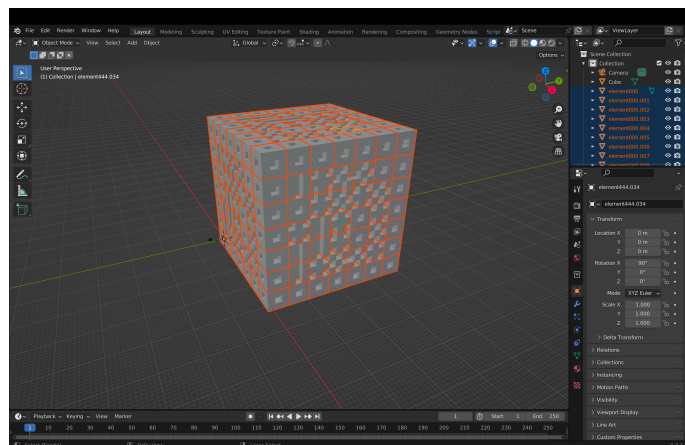
Ako môžeme vidieť na obrázku nižšie (Obr. 3), každý z objektov vzniká na rovnakých súradniciach.

Výhodou takto tvarovaných elementov je, že pri vkladaní do scény a zostavovaní finálneho identifikátora nemusíme v kóde zohľadňovať respektíve brať do úvahy, ktorou stranou bude objekt nasmerovaný nakoľko všetky strany reprezentujú rovnaký vzor.



Obr. 3. Príklad pôvodného elementu.

Na druhú stranu nevýhodou takéhoto riešenia je množstvo využitého materiálu pri 3D tlači. Tlačiareň rozlišuje aj v vnútro objektu, takže vytlačí aj pre nás inak nepotrebnú a neviditeľnú vnútornú zložku identifikátora pričom nevynecháva ani vzor navrhnutých elementov, čo priamoúmerne s využitým materiálom navyšuje aj čas potrebný pre tlač.



Obr. 4. Príklad zostaveného identifikátora.

Ďalšou výzvou takto koncipovaného elementu pre tlač sú vynechané miesta, ktoré definujú samotný element. Ich význam pre finálny výsledok je markantný, takže je potrebné zachovať ich takmer nezmenené. Problém, ktorý však nastane pri tlači sú

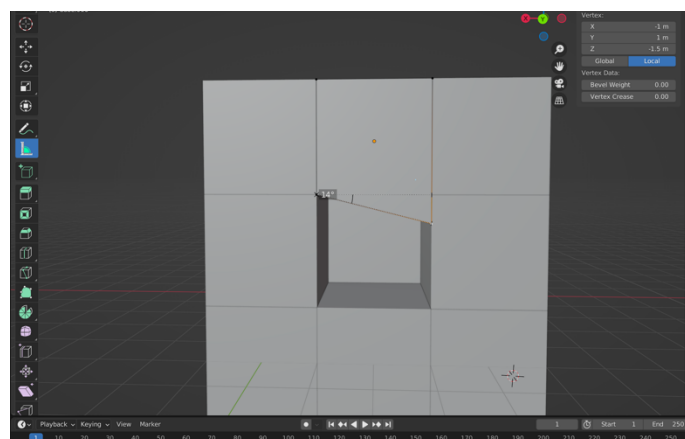
podpery, ktoré tlačiareň využíva aby mohla na úroveň vyššie neskôr nanášať ďalšiu vrstvu, čo pri pohľade spredu ruší požadovaný vzhľad, ktorý chceme doceliť a aby sme sa takto využiteľ „pomoci“ neskôr zbavili, museli by sme ručne vykrojať každý otvor zvlášť.

Je preto potrebné prísť s riešením, ako navrhnuť základný element tak, aby si tlačiareň poradila aj bez toho respektíve dopomôcť jej navrhnutím vlastnej podpery, ktorá nebude kaziť finálny výsledok, identifikátor si zachová svoj vzhľad a nebude potrebný žiadny ďalší manuálny zásah.

3.3 Podpera

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej časti, pre potreby požadovaného výsledku tlače je nutné pozmeniť a doplniť vnútorné výrezy jednotlivých elementov tak, aby si tlačiareň pri 3D tlači poradila s nadchádzajúcimi úrovňami identifikátora.

Bolo zistené, že pri minimálnom naklonení aspoň 14 stupňov, nepotrebuje 3D tlačiareň svojpomocne dotláčať ďalšie podpery a ušetrí nám tak čas aj materiál.

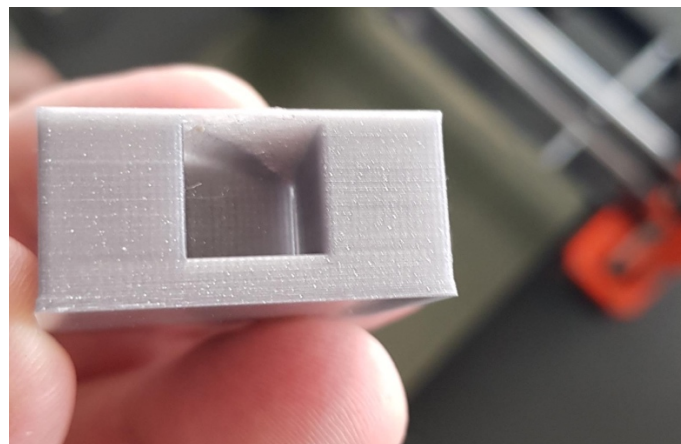


Obr. 5. Ukážka navrhnutej podpery v prostredí Blender.

Vyššie na obrázku číslo 5 môžeme vidieť, ako takáto nami navrhnutá podpera vyzerá. Vzniká predĺžením jednej hrany objektu tak, aby výsledok mal minimálne 14 stupňom.

V našich elementoch sme pracovali s uhlom 17 stupňov, čo je máličko viac ako tlačiareň potrebuje, no je vhodné si vytvoriť rezervu.

Podpera je na obrázku natočená tak, aby bolo možné názorne ukázať ako je navrhnutá a ako vyzerá sklon pri konkrétnom uhle. Finálny objekt má podperu rotovanú smerom dovnútra aby splnila svoj účel a nemenila vzhľad elementu.



Obr. 6. Ukážka podpery po vytlačení.

Potom, čo sme podpery umiestnili vo všetkých výrezoch pri každom elemente a nesmerovali ich dovnútra objektu (aby mal výsledok pri pohľade spredu podobu ako požadujeme) sme výsledok otestovali na skúšku tlačou a ako môžeme vidieť na obrázku číslo 6, tlačiareň nepotrebuje dotláčať žiadne ďalšie pomocné podpery.

3.4 Optimalizácia tlače

Ďalšou výzvou pri tlači identifikátora bola ešte vyššia úspora času pri tlači a rovnako aj úspora použitého materiálu.

Pri 3D tlači prvého identifikátora sme zistili, že tlač bude trvať približne 2 dni 12 hodín a 30 minút pričom sa pre tlač spotrebuje 312 gramov filamentu (Obr. 7).

30,00

Otočit:

0

0

0

°

25,00

Měřítka:

238,1

238,1

238,1

%

Velikost:

100

100

100

mm

20,00

☐ Palce

15,00

Informace o slicování

Použito Filamentu (g)

312,00 (542,00)

(včetně cívky)

Použito Filamentu (m)

104,61

Použito Filamentu (mm³)

251610,23

Náklady

8,68

Odhadovaný čas tisku:

- normální režim

2d12h33m

- tichý režim

2d12h57m

0,20

Exportovat G-code

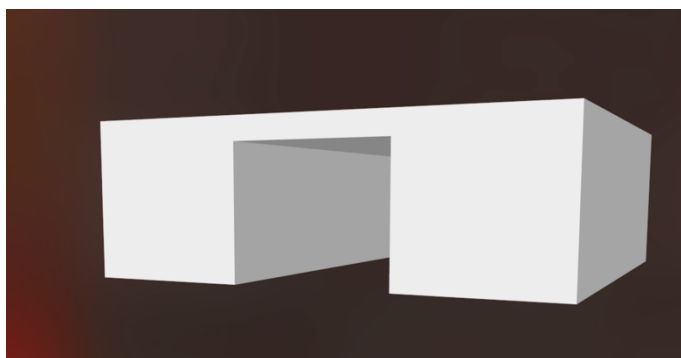
(1)

Obr. 7. Ukážka spotrebovaného materiálu a času pre tlač.

Vyššie spomenuté údaje sú odvodené od veľkosti tlačeneho identifikátora a celkovej zložitosti jednotlivých elementov vrátane vnútornej štruktúry objektu, ktorú my síce nevidíme no tlačiareň ju berie do úvahy.

Ako sme v časti 3.2 našej práce uvádzali, pozitívnym vplyvom na redukciu času a materiálov, je potrebné prepracovanie vnútornej časti identifikátora a potrebné bolo začať základnými elementami.

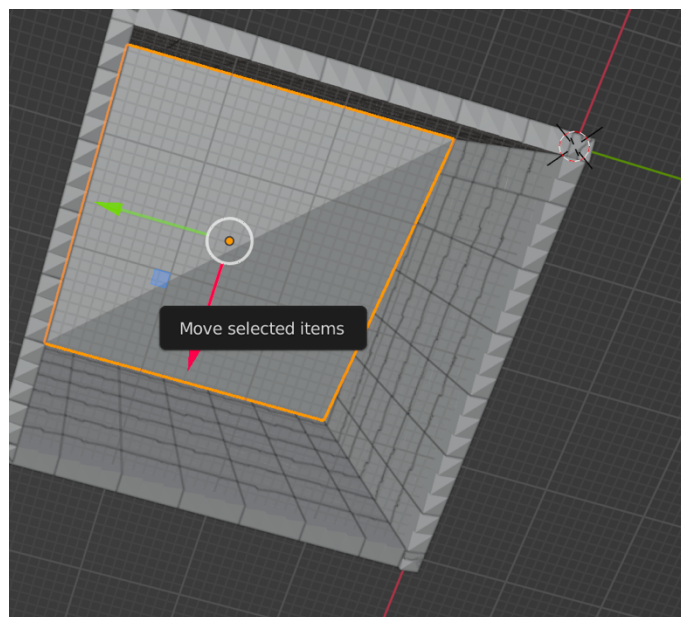
Namiesto pôvodného tvaru 3x3x3 sme zachovali iba prednú stranu elementu o rozmere 3x3 (Obr. 8).



Obr. 8. Ukážka úpravy základného elementu.

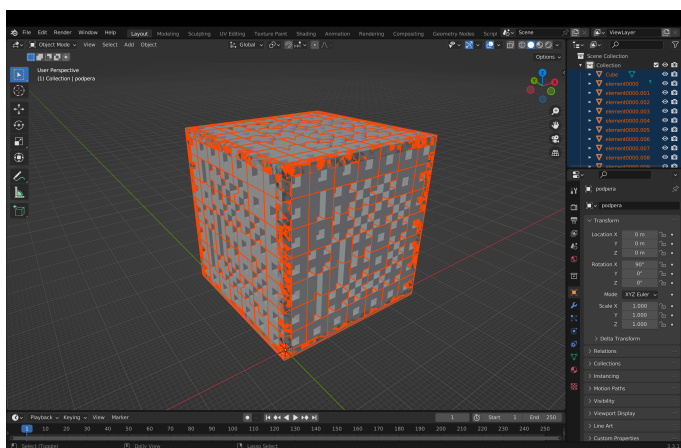
Zo zadnej strany bola následne pridaná stena o hrúbke 0.15% pôvodnej základnej kocky. Opäť sme počítali s menšou rezervou a hrúbkou, ktorá sa pohybuje v rozmedzí 0.15% – 0.25% základnej kocky.

Pri takto nadizajnovanom elemente sa však tentokrát nemôžeme spoliehať na predchádzajúcu výhodu, kedy sme nemuseli brať do úvahy nasmerovanie objektu po vložení do scény, pretože objekt bol z každej strany rovnaký, čo teraz neplatí. V kóde sme preto upravovali rotáciu tak, aby zohľadňovala natočenie každého importovaného .stl takým spôsobom, aby predná strana elementu vždy smerovala von a naopak zadná stena tvorila vnútornú úsporu identifikátora, ktorá sa následne odrazí aj v úspore pri tlači (Obr. 9 a Obr. 11).



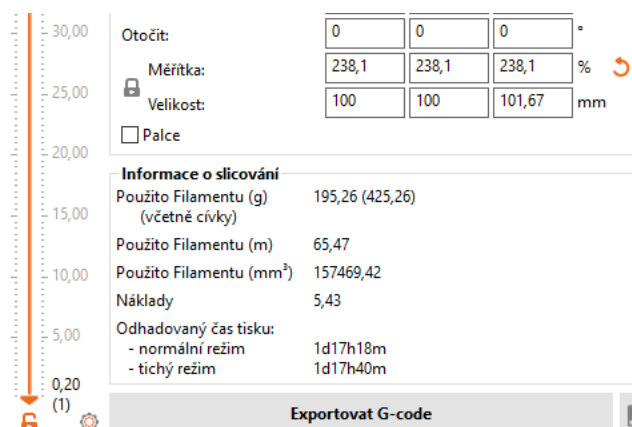
Obr. 10. Ukážka optimalizovaného identifikátora zvnútra.

Pre takto zostavený finálny objekt sa už nemusí vytlačať také množstvo vnútornej štruktúry, ako tomu bolo predtým a celkový čas tlače sa tak zredukoval na 1 deň, 17hodín a 18 minút pri celkovej spotrebe 195 gramov filamentu, čo je úspora materiálu na úrovni približne 37.5% (Obr.11)



Obr. 9. Ukážka optimalizovaného identifikátora zvonku.

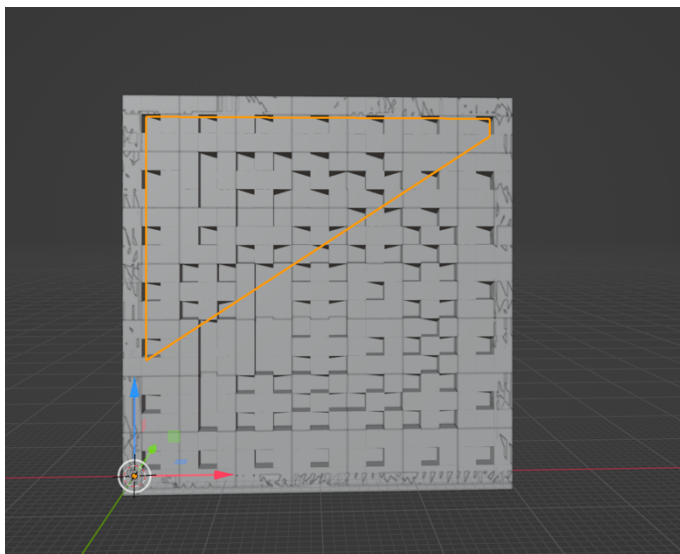
Na prvý pohľad vyzerá identifikátor identicky ako ten neoptimalizovaný predtým, čo je pri pohľade zvonku žiaduce, no keď sa na tento objekt pozrieme zvnútra, môžeme vidieť kde nastala úspora (Obr. 10)



Obr. 11. Ukážka spotrebovaného materiálu a času pre tlač.

Jednou z posledných výziev pri optimalizácii vnútornej štruktúry objektu následne zostalo vyriešenie tlače vrchnej steny, nakoľko teraz je objekt vo vnútri dutý na rozdiel od predchádzajúceho modelu, kedy vnútornú oporu zabezpečovala menšia kocka umiestnená v strede.

Ako pri výrezoch na vonkajšej strane tak aj teraz sme použili podperu, ktorá je však o niečo väčšia a jednu stranu má viac natiahnutú a to do úrovne približne 2/3 steny objektu, čo môžeme vidieť na obrázku 12 nižšie.



Obr. 12. Ukážka vnútornej podpery objektu.

Takto navrhnutá podpera zabezpečí plynulosť tlače a oporu vrchnej stene pričom stále dbá na úsporu materiálu a času.

4 Záver

V našej práci sme sa venovali implementácii a postupu návrhu identifikátora spolu s opisom procesu tvorby a základných elementov potrebných na jeho finálne zostavenie.

Výsledkom práce je inovatívna metóda generovania jedinečných 3D identifikátorov pre jednoznačnú identifikáciu entít, ktoré majú rovnaké rozmerové a tvarové vlastnosti. Tieto identifikátory sú vhodné na použitie v priemysle, logistických reťazcoch a aplikáciách rozšírenej a zmiešanej reality, a to najmä pre ich možnosť snímania z ľubovoľného uhla a z väčšej vzdialenosti, čo zvyšuje efektivitu ovládania a monitorovania kyberneticko-fyzikálnych systémov v IoT sieťach v prostredí zmiešanej reality.

V práci boli použité moderné metódy programatického generovania 3D modelov a aditívnej výroby (3D tlače) na kusovú výrobu identifikátorov.

Celkovo možno povedať, že týmito úpravami sme dosiahli zníženie času tlače z pôvodných 2 dní a 12 hodín na 1 deň a 17 hodín a úsporu materiálu na úrovni približne 37.5%.

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu mojej práce, Ing. Otovi Haffnerovi, PhD., za jeho cenné rady, odborné vedenie a trpezlivosť, počas celej práce. Jeho nápady a inovatívne prístupy k problémom mi boli veľkou inšpiráciou a pomohli mi pri vytváraní výsledku.

Literatúra

- [1] Roblek, V.; Meško, M.; Krapež, A. A complex view of industry 4.0. SAGE Open

- [2] Pereira, A.C.; Romero, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manuf.* 2017,13, 1206–1214
- [3] STARK, Erich, Erik KUČERA, Oto HAFFNER, Peter DRAHOŠ a Roman LESKOVSKÝ. Using Augmented Reality and Internet of Things for Control and Monitoring of Mechatronic Devices. *Electronics* [online]. 2020, 9(8) [cit. 2023-04-14]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics9081272
- [4] O aplikácii Blender. 2023 [cit. 2023-04-13]. URL: <https://docs.blender.org/manual/sk/latest/getting_started/about/introduction.html>
- [5] API Overview. 2023 [cit. 2023-04-09]. URL: <https://docs.blender.org/api/current/info_overview.html>

Sekcia 3

Elektroenergetika

Modelovanie osvetlenia verejného parku a vplyv osvetlenia na jeho prostredie

Bc. Damián Šeliga, prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.

Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

xseliga@stuba.sk

Abstrakt – V modernom rýchlo technologicky napredujúcom svete vyvstáva aj novodobý problém, ktorý sa nazýva „Rušivé svetlo“. Tento pojem býva častokrát nesprávne označovaný aj ako „svetelné znečistenie“ alebo „svetelný smog“. Rušivé svetlo negatívne pôsobí na človeka, ale aj na prírodu. Mestské parky sú v urbanistickom prostredí predstaviteľom prírody a ich priestory je rovnako potrebné, ako aj zvyšok mesta, osvetliť. Nesprávnym návrhom a aplikáciou svietidiel v mestských parkoch je možné dosiahnuť aj negatívne účinky rušivého svetla. Tento príspevok predstavuje, čo je problém rušivého svetla, ako sa prejavuje v mestských parkoch a ako je možné zmierniť jeho účinky v spomínanom prostredí mestského parku.

1 Úvod

Rušivé svetlo, problém s ktorým sa stretol už takmer každý človek, aj keď ho priamo registrovať nemusel. Za rušivé svetlo označujeme také svetlo, ktoré je rozptýlené do okolia bez bližšieho účelu, ktoré svojimi vlastnosťami ako sú kvantita, smer alebo spektrálne zloženie, spôsobuje podráždenie, nepohodu, rozptýlenie alebo zhoršenie schopnosti vnímať podstatné informácie. [1]

Pre účely zlepšenia a ochrany nočného prostredia je potrebné rušivé svetlo obmedziť, pretože môže svojimi dôsledkami spôsobovať fyziologické a ekologické problémy pre okolité prostredie, ľudí a prírodu. [2]

Za rušivé svetlo je považovaná časť svetla, ktorá neslúži na taký účel na aký bola navrhnutá. Konkrétne sa jedná o svetlo, ktoré nevhodne dopadá mimo osvetľovanú plochu, o svetlo rozptýlené v susedstve svetelného zariadenia a o zjasnenie nočnej oblohy spôsobené priamym a nepriamym odrazom žiarenia, rozptýľovaného zložkami atmosféry v smere pozorovania. Nežiaduce účinky rušivého svetla môžeme rozdeliť na oslnenie, závojový jas oblohy či neúčelne rozptýlené svetlo. [3]

Je potrebné spomenúť, že rušivé svetlo býva v neodbornej spoločnosti označované ako „svetelný smog“ alebo „svetelné znečistenie“. Takéto označenia nie sú správne, pretože svetlo nemôže byť znečisťovateľom. Na to aby sme mohli označiť niečo pojmom znečistenie, musí aj po skončení pôsobenia znečisťovateľa ostať prostredie znečistené. To sa pri svetle nedeje, nakoľko po vypnutí svetelných zdrojov sa rozptýľ svetelného žiarenia v atmosfére skončí. To čo nazývame svetelným znečistením je v skutočnosti zvýraznenie

skutočného znečistenia atmosféry svetlom. Svetlo pri prechode oknami do miestností nezašpiní sklá okien, ani iné osvetľované predmety. Správnym pomenovaním je rušivé svetlo. [4], [5]

V prírode môže rušivé svetlo spôsobiť problémy v nočnom prostredí a ohroziť tak rastliny a živočíchy. Mestské parky, predstavujúce časť prírody v meste, tak môžu byť ovplyvnené účinkami rušivého svetla. Územie týchto parkov je rušivým svetlom ovplyvnené viac ako príroda mimo mesta. Jas oblohy nad mestom je vyšší a tak živočíchy, ktoré sa orientujú hviezdou oblohou, stretneme v meste len zriedkavo.

Biotopy mestských parkov nebývajú druhovo veľmi bohaté, svojím charakterom sú skôr homogénne. Najväčšiu časť biotopu tvorí trávnik, rôzne druhy kvetov a stromov. V parkoch, ale môže hniezdiť niekoľko druhov vtákov a hmyzu, či menších nočných živočíchov. [6], [7]

Na hodnotenie účinkov rušivého svetla sa dnes využíva viacero ukazovateľov. V neodbornej verejnosti však býva často krát hlavným argumentom, že sa nemá svietiť do horného polpriestoru. Nie je možné splniť takúto požiadavku, veľa krát je potrebné osvetliť aj okolie osvetľovaného objektu než len objekt samotný. V mestských parkoch sa snažíme osvetliť prevažne chodníky krížujúce mestský park. V niektorých mestských parkoch, ale môžeme natrafiť na situácie kedy sú osvetlené časti stromov, či nebodaj celé koruny stromov. V nasledujúcich kapitolách budú predstavené konkrétne situácie v mestskom parku „Medická záhrada“ v Bratislave, konkrétny stav osvetlenia, simulácia skúmaného objektu a možnosť zlepšenia situácie.

2 Osvetlenie mestského parku

V konkrétnom skúmanom parku a teda v Medickej záhrade môžeme považovať svietidlá za historické kusy. V parku sa nachádzajú svietidlá s guľovým difúzorom, vyžarujúce veľkú časť svetelného toku do horného polpriestoru. Skúmané svietidlá sú špinavé, niektoré časti difúzorov sú poškodené, dokonca niektoré vybrané svietidlá nemajú difúzory vôbec. Tento stav svedčí o situácii v mestských parkoch na našom území. Samosprávy a firmy zodpovedné za osvetlenie mestských parkov prevádzkujú údržbu častokrát len na úrovni výmeny nefunkčných svetelných zdrojov. Spomínané použité svietidlá v medickej záhrade je možné pozorovať na Obr. 1.



Obr. 1 Svetidlá v medickej záhrade za dňa a noci

Na Obr. 1 je taktiež možné vidieť spomínané svetidlo v nočnom prostredí. Z tohto obrázka je zrejmé, že v parku nie je osvetľovaná len komunikácia ale aj časti korún stromov, resp. že použité svetidlo vyžaruje značnú časť svetelného toku do horného polpriestoru. V kapitole 2.4 je možné sledovať výsledné hodnoty jasov takto osvetlených korún stromov.

2.1 Hodnotiace kritéria rušivého osvetlenia

Aby sme vedeli určiť stav osvetlenia skúmaného parku je potrebné spomenúť niekoľko hodnotiacich kritérií. To ako merať rušivé svetlo stanovuje vyhláška ministerstva zdravotníctva č. 539/2007 Z. z.. Pre meranie rušivého svetla sa využívajú fotometre, ktoré sú určené na meranie v oblasti fotopického videnia s pomernou spektrálnou svetelnou účinnosťou podľa príslušnej technickej normy. Intenzita osvetlenia okna sa meria z vonkajšej strany zvislej plochy a v strede tejto plochy. Rušivý jas zo zdrojov svetla sa meria zo stredu okna. [8]

Najväčšie problémy pri neúčinne rozptýlenom svetle spôsobuje časť svetelného toku smerujúca do horného polpriestoru. Na posúdenie a hodnotenie osvetlenia vo vzťahu k rušivému svetlu sa zaviedlo viacero ukazovateľov. Medzi tieto ukazovatele patrí napríklad činiteľ využitia svetidla, podiel svetelného toku do horného polpriestoru – UFR, účinnosť vyžarovania do horného polpriestoru – ULR či účinnosť v hornom polpriestore – ULOR.

Pri skúmaní Medickej záhrady bola na zistenie potrebných hodnôt použitá metóda merania intenzity osvetlenia vodorovnej a zvislej roviny, pretože práve hraničné hodnoty týchto parametrov stanovuje vyhláška č. 539 a technická norma STN EN 12464 – 2. Odporúčané hodnoty intenzit osvetlenia na nehnuteľnostiach popisuje dokument CIE 150. V Tab. 1 sú uvedené hodnoty dovolených a odporúčaných maximálnych hodnôt intenzít osvetlenia a jasov, z vyhlášky 539/2007 Z.z., ktoré nás z hľadiska mestského parku zaujímajú. Hodnoty týchto veličín, uvedené vo vyhláške, sú rovnaké ako hodnoty uvedené v technickej norme STN EN 12464 – 2.

Tab. 1 Limitné hodnoty veličín z vyhlášky 539/2007 Z.z.[8]

Zóna	Svetlo na objektoch		Svietivosť zdroja		Jas	
	$E_v (lx)$		$I (cd)$		$L_{av} (cd.m^{-2})$	$L_{max} (cd.m^{-2})$
	do 22:00	po 22:00	do 22:00	po 22:00	do 22:00	po 22:00
E1	2	0	2 500	0	0	50
E2	5	1	7 500	500	5	400
E3	10	2	10 000	1 000	15	800
E4	25	5	25 000	2 500	25	1 000

Nakoľko dokumenty popisujú aj hodnoty pre jasy a tým pádom intenzita osvetlenia nie je jediná veličina, ktorá nás pri meraní zaujíma, tak pre zistenie hodnôt pozorovaných jasov bola použitá metóda CCD kamery, resp. jasový analyzátor. Jedná sa o presnú metódu, pri ktorej sú používané veľmi citlivé kamery, využívajúce CCD čipy, schopné zachytiť hodnoty jasov, ktoré neskôr získame za použitia špecializovaného softvéru.

2.2 Vplyv rušivého svetla

Vonkajšie umelé osvetlenie nie je jedinou stránkou, ktorá má vplyv na život človeka a nie je ani tou najviac dôležitou. Iné vplyvy ako hluk či smog škodia človeku o veľa viac, avšak pozornosť sa na rušivé svetlo obracia kvôli jeho viditeľnosti.

Zanedbať rušivé svetlo ako problém nie je správne. V nočnom prostredí dokáže rušivé svetlo ovplyvniť človeka, faunu i flóru. Svojimi účinkami v neskoršom dôsledku môže spôsobovať určité zdravotné problémy.

2.2.1 Vplyv na človeka

V živote človeka poškodzuje rušivé svetlo hlavne jeho komfort. Svetlo začína byť pre človeka rušivým v prípade kedy vstupuje do miestností, ktoré sú za normálnych okolností tmavé, napríklad spálne. Hlavným indikátorom tohto vplyvu je osvetlenosť vertikálnych plôch.

V minulosti sa človek riadil podľa biorytmu určovaného svetlom a tmou. S príchodom tmy sa v ľudskom tele tvorí hormón zvaný melatonín, ktorý je označovaný ako „spánkový hormón“. Narušením biorytmu umelým svetlom v noci nastáva v ľudskom tele k poklesu tvorby melatonínu a tým dochádza k narušeniu spánkového biorytmu. Zlý spánok môže v konečnom dôsledku viesť k zdravotným ťažkostiam. [9]

Neúčelne rozptýlené svetlo, ktoré sa stáva pre človeka rušivým je možné pozorovať aj v priestoroch medickej záhrady. Na Obr. 2 je možné pozorovať situáciu kedy je na budove, umiestnenej za hranicami parku, viditeľné osvetlenie okien. Meranie hodnôt osvetlenosti však prebiehalo iba na pôde mestského parku a tak nevieme s určitosťou povedať o aké hodnoty osvetlenosti sa jedná.



Obr. 2 Svetidlá svietiace do okien príľahlej budovy

2.2.2 Vplyv na prírodu mestského parku

Živočíchy celkovo v prírode, ale aj v mestskom parku, sa riadia striedaním dňa a noci. Táto ich vlastnosť je narušená umelým osvetlením. Vybrané druhy vtákov tiahnu práve v noci. Stáva sa, že pri umelom osvetlení krúžia v noci okolo budov alebo menia svoj životný rytmus tak, že spievajú v noci, pokračujú v kŕmení, hniezdia v nesprávnom čase.

Najviac zasiahnutým druhom je však hmyz. V nočných hodinách je hmyz priťahovaný umelým osvetlením. V okolí svetidla si hmyz hľadá potravu, partnera či miesto na kladenie vajíčok. Vďaka umelému osvetleniu je tak hmyz ľahkou korisťou, ľahko sa hmyz krúžením okolo svetla unaví a hynie.

Rovnako ako živočíchy tak sa aj rastlín riadia striedaním dňa a noci. Zo slnečnej energie získavajú energiu pre funkciu formou fotosyntézy. Zmene dňa a noci prispôbujú klíčenie, kvitnutie či opadanie listov. Pri osvetlení stromov v mestskom parku môžeme pozorovať dlhodobú vegetačnú aktivitu stromov. Stromy nezhodia svoje listy a tie napokon opadnú až vplyvom mrazu. Druhy stromov ako javory, brezy, topole a platany sú citlivé na nočné svetlo. Dlhodobým osvetľovaním stromu, skôr či neskôr zapríčiníme jeho uhynutie. V osvetľovanom strome navyše nikdy nenájdeme hniezdiť vtáctvo. [10], [11]

2.3 Meranie intenzity osvetlenia v mestskom parku

Meranie fotometrických veličín prebehlo v medickej záhrade 10.5.2022 po západe slnka za podmienok nezamračenej oblohy s takmer plným mesiacom v čase od 21:20 hod. Na meranie intenzity osvetlenia bol použitý prístroj PRC Krochmann Radiolux 111.

Pre účely merania boli vybrané dve lokality v tomto mestskom parku. V prvej lokalite sa nachádza jedno samostatné svetidlo, ktoré osvetľuje chodník, príľahlé trávnaté plochy a koruny stromov. Druhá lokalita obsahuje štyri svetidlá, rovnomerne rozmiestnené v štvoruholníku,

osvetľujúce primárne detské ihrisko. Merané lokality počas dňa je možné vidieť na Obr. 3 a Obr. 4.



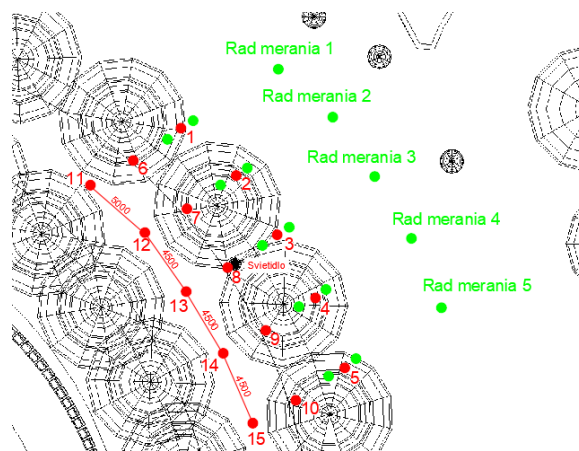
Obr. 3 Meraná lokalita č.1



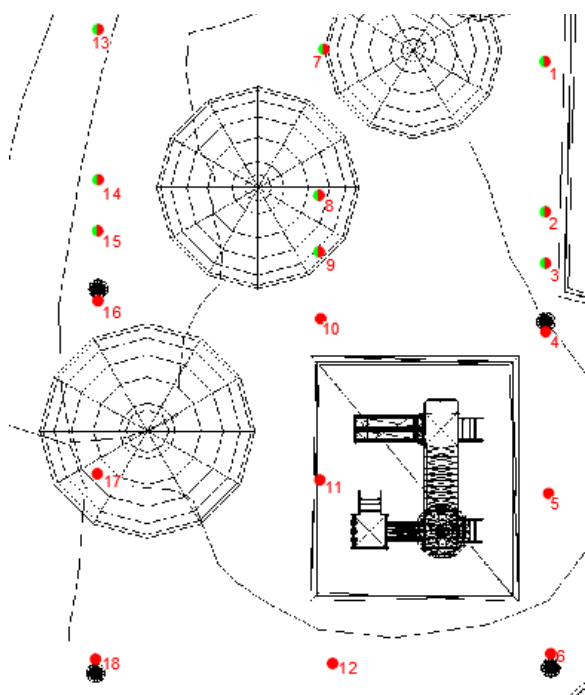
Obr. 4 Meraná lokalita č. 2

Počas vykonávania merania bola osvetľovacia sústava v ustálenom stave a neboli pozorované žiadne zmeny intenzity ani farby osvetlenia.

Merania v oboch lokalitách prebehli v bodoch podľa navrhutej meracej siete. Na Obr. 5 a Obr. 6 je možné vidieť rozloženie týchto meracích sietí. Červenou sú vyznačené body meracej siete, v ktorých prebehlo meranie horizontálnej intenzity osvetlenia, zelenou miesta merania vertikálnej intenzity osvetlenia. Miesta, v ktorých prebiehali obe merania sú vyznačené zeleno-červenou farbou.



Obr. 5 Meracia sieť v lokalite 1



Obr. 6 Meracia sieť v lokalite 2

V prvej lokalite, s jedným samostatným svietidlom, bolo meranie vykonané v 15 bodoch umiestnených v rovnakých líniiach. Prvý rad meraní bol vzdialený 3 metre od osi svietidla, druhý rad sa nachádzal v jednej osi so svietidlom, tretí rad bol vzdialený rovnako 3 metre od osi svietidla, ale na opačnú stranu. Vertikálne osvetlenie bolo merané v rovnakých líniiach ako horizontálne, ale vo vzdialenosti 2, 4 a 10 metrov od osi svietidla smerom na príľahlú trávnatú plochu, vo výške 1 a 2 metre od zeme. V druhej lokalite so štyrmi svietidlami sa meranie vykonalo v 18 bodoch. Vo vnútornom priestore, ohraničenom svietidlami sa rovnomerne rozložilo 9 bodov, v ktorých sa odmerala horizontálna osvetlenosť. V ďalších deviatich bodoch, rovnako ako v prvom prípade vzdialených 2, 4 a 10 metrov od ihriska, bola odmeraná horizontálna aj vertikálna osvetlenosť.

2.3.1 Výsledky meraní

Z nameraných hodnôt sa následným výpočtom určili potrebné veličiny. Prvou veličinou, ktorá nás zaujíma je priemerná udržiavaná celková intenzita osvetlenia E_m na ploche meracej siete, ktorá bola určená na základe vzťahu (1).

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

Kde: E_m – udržiavaná priemerná osvetlenosť, E_i – osvetlenosť v bode, n – počet bodov

Ďalšou podstatnou určenou veličinou je rovnomernosť osvetlenia U_o určená podľa vzťahu (2):

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_m} \quad (2)$$

Kde: U_o – rovnomernosť osvetlenia, E_{min} – minimálna osvetlenosť, E_m – udržiavaná priemerná osvetlenosť

V Tab. 2 je možné vidieť výsledky merania horizontálnej osvetlenosti a rovnomernosť osvetlenia vo všetkých lokalitách.

Tab. 2 Výsledky merania horizontálnej osvetlenosti

Lokalita	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	U_o [-]
1	0,457	0,1	2,2	0,219
2a	3,286	0,56	13,98	0,17
2b	0,884	0,12	3,1	0,136

Pre danú tabuľku platí: 1 – miesto so samostatným svietidlom, 2a – plocha detského ihriska, 2b – plocha vedľa detského ihriska (označenie platí aj pre Tab. 6 a Tab. 7)

Zistené hodnoty horizontálnej osvetlenosti sú dostatočne nízke. Pri osvetľovaní detského ihriska je priemerná osvetlenosť vyššia kvôli vyššiemu počtu svietidiel.

Podľa normy STN EN 13201 – 2 sa začleňujú merané oblasti do kategórie osvetlenia P6 kde je hodnota priemernej osvetlenosti najviac 2 lx. Oblasť detského ihriska začleňujeme do kategórie P4 kde je hodnota udržiavanej osvetlenosti 5 lx.

Osvetlenosť chodníkov môžeme porovnať so svitom mesiaca pri splne. Pri splne dosahujeme osvetlenosť približne 0,1 lx. Je teda možné konštatovať, že dochádza k približne len 4 – násobne vyššej intenzite pri samostatnom svietidle.

Výsledky vertikálnych osvetleností je možné pozorovať v Tab. 3.

Tab. 3 Výsledky merania vertikálnej osvetlenosti

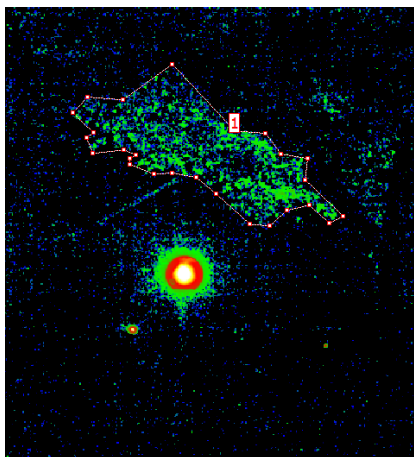
Lokalita	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	U_o [-]
1 - 2 m	1,272	0,18	5,4	0,142
1 - 4 m	0,751	0,15	2,4	0,2
1 - 10 m	0,293	0,2	0,47	0,683
2 - 2 m	4,752	0,43	13,67	0,09
2 - 8 m	1,543	0,48	2,27	0,311
2 - 10 m	0,552	0,37	0,84	0,671

Pre tabuľku platí: 1 – miesto so samostatným svietidlom, 2 – oblasť vedľa detského ihriska

Hodnoty nameraných vertikálnych osvetleností sú v súlade s vyhláškou MZ SR 539/2007 Z.z.. Zistené hodnoty neprekročili limitné hodnoty uvedené vo vyhláške ani v čase do 22:00 ani po ňom, pretože vyhovujú zóne E4, kam patrí aj Medická záhrada. Hodnota osvetlenosti v oblasti vedľa detského ihriska vo vzdialenosti 2 m od svietidla je blízko k hraničnej dovolenej hodnote. Subjektívne môže táto hodnota v oknách blízkej budovy vyvolať pocit rušenia.

2.4 Jasová analýza osvetľovaných stromov

Na korunách stromov nachádzajúcich sa v blízkosti analyzovaných svietidiel bola pomocou, už spomenutého jasového analyzátoru a softvéru, zistená hodnota jasu. Na Obr. 7 je možné pozorovať takúto jasovú analýzu.



Obr. 7 Jasová analýza koruny stromu

Hodnoty vo vyznačenej oblasti osvetlenej koruny stromu je možné vidieť v Tab. 4.

Tab. 4 Výsledky jasovej analýzy

Plocha [m ²]	Priemerný jas L [cd·m ⁻²]	Maximálny jas L _{max} [cd·m ⁻²]
5,4	0,94	7,425

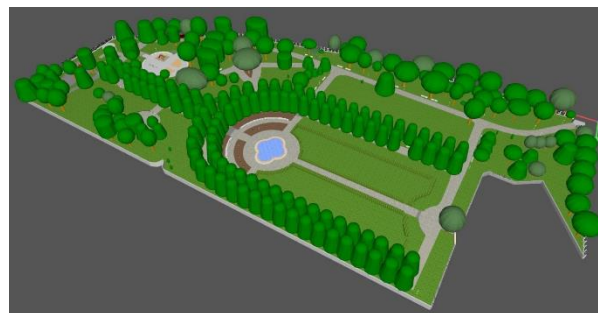
Pri všetkých jasových analýzach v medickej záhrade, nedosiahol priemerný jas hodnotu aspoň 1 cd·m⁻². Porovnať tieto hodnoty s legislatívnymi predpismi je náročné, pretože sa jedná o osvetlenie stromov v mestskom parku, na ktoré žiadny dokument priamo neodkazuje. Ak by sme, ale hodnotili úroveň jasú podľa normy STN EN 12464 – 2, kde sa hodnotí horný limit jasú pre priechod budovy, mohli by sme povedať, že namerané hodnoty jasú neprekračujú limitnú hodnotu pre oblasť E4, dokonca ani pre nižšiu oblasť E2. Podľa vyhlášky MZ SR č. 539/2007 Z.z. kde sa určujú limitné hodnoty jasú z vonkajších zariadení, neprekračujeme rovnako limitnú hodnotu ani v zóne E2. Mestský park začleňujeme totiž do zóny E3 a E4 nakoľko sa nachádza v aglomerácii mesta, kde je celkový jas pomerne vysoký.

2.5 Simulácia mestského parku

Mestský park medickej záhrady bol po úspešnom meraní následne nasimulovaný v simulačnom programe Dialux. Park bol vyhotovený v softvéri v mierke 1:1.

Konštrukcia medickej záhrady bola vyhotovená na základe satelitných snímok, leteckých záberov, výpisov katastrálneho územia a na základe vlastných meraní a vlastnej fotodokumentácie parku.

Súčasťou simulovaného modelu sú svietidlá, stromy a vybrané rastliny, stavebné objekty a komunikácie. Kvôli veľkosti súboru a mestského parku (42 ha) neobsahuje model detaily ako sú obrubníky chodníkov alebo vybrané druhy kvetín a rastlín. Hoci neuvažujeme tieto detaily tak je daný model náročný na výpočet a predstavuje záťaž na hardvér počítača. Výsledný model v simulačnom programe Dialux je možné vidieť na Obr. 8.



Obr. 8 Model medickej záhrady pohľad zo severu

Simulovaný model obsahuje rovnaký počet svietidiel ako medickej záhrady a to je 41 svietidiel umiestnených na bielych stožiaroch vo výške približne 2,5 metra nad zemou. Osvetlenie v mestských parkoch si nevyžaduje vyššie umiestnenie svietidiel nakoľko osvetľujeme malé plochy chodníkov a nad týmito chodníkmi sa často nachádzajú koruny stromov, do ktorých je umiestnenie svietidiel problematické a zbytočné.

Model medickej záhrady je nasimulovaný preto, aby sme mohli porovnať hodnoty vertikálnych a horizontálnych intenzít osvetlenia pri rôznych svietidlách, resp. určiť ako vplyva na tvorbu rušivého svetla podiel vyžarovania do horného polpriestoru.

V simulovanom modeli boli vyskúšané štyri druhy svietidiel, ktorých výsledky boli porovnané. Každé svietidlo je s iným druhom svetelného zdroja, aby sme poukázali na vhodnosť výberu svetelného zdroja pre mestský park. Vybrané svietidlá boli:

- Svietidlo s kompaktnou žiarivkou Schröder Altra, výkon 36 W, svetelný tok 2900 lm,
- Svietidlo so sodíkovou výbojkou Schröder Zafir, výkon 50 W, svetelný tok 3600 lm,
- Svietidlo s LED zdrojom, Schröder Zylindo 5103, výkon 25,8 W, svetelný tok 3439 lm,
- Svietidlo s LED zdrojom guľového tvaru RZB Leuchten basic ball, výkon 36,5 W, svetelný tok 3900 lm.

Výsledné hodnoty priemernej udržiavanej osvetlenosti pre celkovú plochu parku, zistené simuláciou, je možné pozorovať v Tab. 5.

Tab. 5 Simulované hodnoty celkovej osvetlenosti

Zdroj	Kompaktná žiarivka 36 W	Sodíková výbojka 70 W	LED lucerna 25,8W	LED guľa 36,5 W
E _m [lx]	1,92	4,71	2,33	1,35
E _{max} [lx]	71,3	149	57,2	24,5

V Tab. 5 je možné pozorovať, že pri guľovom svietidle sme dosiahli najnižšie hodnoty horizontálnej osvetlenosti. Je to spôsobené tým, že prevažná časť svetelného toku guľového svietidla smeruje do horného polpriestoru. Cieľom takejto simulácie nie je ukázať skutočný stav, ale zistiť, ktoré svietidlá by boli vhodné pri výmene aktuálnych svietidiel. Svietidlá s guľovým difúzorom sa preto nezhodujú s reálne použitými

svetidlami. Parametre reálne použitých svetidiel podliehajú degradácii a ich hodnoty neboli zistené meraním.

V Tab. 6 je možné vidieť výsledky horizontálnej osvetlenosti v jednotlivých plochách, ktoré sa zhodujú so skutočne meranými plochami.

Tab. 6 Simulované hodnoty horizontálnej osvetlenosti jednotlivých plôch

Lokalita		Kompaktná žiarivka	Sodíková výbojka	LED Lucerna	LED guľa
1	E_m [lx]	10,5	23,7	7,06	5,2
	E_{max} [lx]	118	245	62,4	35,7
	U_o [-]	0,002	0,003	0,002	0,037
2a	E_m [lx]	5,87	13,7	7,06	3,65
	E_{max} [lx]	75,4	145	62,4	19,2
	U_o [-]	0,003	0,005	0,002	0,003
2b	E_m [lx]	1,78	5,76	3,04	1,77
	E_{max} [lx]	16,5	36,9	18,5	8,24
	U_o [-]	0,079	0,16	0,072	0,023

Opäť je možné pozorovať, že najnižšie hodnoty dosiahneme pri guľovom svetidle, naopak najvyššie pri sodíkovej výbojke. Vysoké hodnoty pri sodíkovej výbojke sú spôsobené jej výkonom, vybraný typ výbojky by bolo potrebné umiestniť do vyššej výšky, čo v prípade mestského parku nie je vhodné riešenie, jej spektrálne zloženie je však pre mestský park najviac vhodné.

Okrem horizontálnej osvetlenosti v predchádzajúcej časti je možné pozorovať výsledky simulovanej vertikálnej osvetlenosti v Tab. 7..

Tab. 7 Simulované hodnoty vertikálnych osvetleností

Lokalita	Kompaktná žiarivka	Sodíková výbojka	LED lucerna	LED guľa
1 - 2 m	10,8	18,22	16,12	7,67
1 - 4 m	3,1	5,28	5,77	3,81
1 - 10 m	0,43	0,97	1,13	1,54
2 - 2 m	16,5	29,52	21,21	23,82
2 - 4 m	3,84	8,26	7,2	10,24
2 - 10 m	0,76	0,99	0,99	3,09

Vertikálne osvetlenosti dosahujeme pri guľovom svetidle najvyššie, svetidlo je teda z hľadiska tvorby rušivého svetla to najhoršie. Pri ostatných svetidlách dosahujeme nižšie hodnoty vďaka vhodne zvolenej krivke svetivosti. Väčšina svetelného toku pri týchto svetidlách smeruje do dolného polpriestoru. Výsledné simulované hodnoty sú vyššie ako reálne, kvôli nezisteným hodnotám odrazivosti plôch, či starnutím alebo zašpinením skutočne použitých svetidiel.

3 Záver

Namerané hodnoty použitých svetidiel v medickej záhrade vyhovujú legislatívnym podmienkam. Meranie však ukázalo, že značná časť svetelného toku smeruje do horného polpriestoru, čo môže ovplyvniť biotop mestského parku a tvorbu rušivého svetla. Simulácia pomáha nájsť vhodné riešenie na miesto aktuálne použitých guľových svetidiel. Výsledky simulácie ukázali, že na osvetlenie mestského parku sú vhodné svetidlá so smerovaním svetelného toku prevažne nadol, ak je snahou zamedziť tvorbe vertikálneho osvetlenia.

Použitím svetidiel, ktoré smerujú svetelný tok prevažne do dolného priestoru, prestaneme osvetľovať koruny stromov alebo okná priľahlých budov. Použitie guľových svetidiel bolo v minulosti často využívané, ale v dnešnej dobe poznáme už lepšie a vhodnejšie alternatívy.

Vynára sa však otázka do budúcnosti. Chceme osvetľovať v parkoch primárne len chodníky alebo vizuálne skrášliť okolité nočné prostredie mestského parku? Jedno je jasné, svietiť musíme a potrebujeme.

Podakovanie

Chcel by som sa v prvom rade poďakovať prof. Ing. Dionýzovi Gašparovskému, PhD., za jeho pomoc pri riešení problematiky a za predstavenie a nápad riešiť práve túto problematiku rušivého svetla v mestských parkoch.

Zároveň sa chcem poďakovať Agentúre na podporu na podporu výskumu a vývoja, ktorá podporila túto prácu na základe zmluvy č. APVV-20-0157 Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií.

Literatúra

- [1] "STN EN 12665". https://normy.unms.sk/eshop/public/standard_detail.aspx?id=132244 (cit 21. marec 2022).
- [2] "STN EN 12464-2 (360074), Svetlo a osvetlenie, Osvetlenie pracovísk, Časť 2: Vonkajšie pracoviská". 2015.
- [3] "NARIADENIE KOMISIE (ES) č. 245/2009 z 18. marca 2009, ktorým sa vykonáva smernica Európskeho parlamentu a Rady 2005/32/ES v súvislosti s požiadavkami na ekodizajn žiariviek bez zabudovaného predradníka, výbojok s vysokou svetivosťou a predradníkov a svetidiel, ktoré sú schopné ovládať takéto svetelné zdroje, a ktorým sa ruší smernica Európskeho parlamentu a Rady 2000/55/ES". 2009.
- [4] T. Maixner, "Rušivé svetlo", *Odborný časopis Světlo* 06/2010, 2010, [Online]. Available at: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/rusi-ve-svetlo--15454>
- [5] P. Rapavý, "Svetelné znečistenie", *Tvorivý učiteľ fyziky II, Národný festival fyziky*, s. 135–139, 2009.
- [6] R. Jambor, "Vtáky v meste", 2018. <http://ornitolog.sk/blog/?id=9p3l7gz6>
- [7] Z. Lososová a J. Danihelka, "Proč je flóra velkoměst pestrá", č. 6/2014, s. 278–281, 2014.

- [8] “539/2007 Z. z. Vyhláška o limitoch optického žiarenia a požiadavkách na jeho objektivizáciu”.
- [9] *CIE 150 - Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations*. 2017.
- [10] P. Rapavý a P. Begeni, “Svetelné znečistenie a park tmavej oblohy poloniny”, *Biosférické rezervácie na Slovensku IX.*, s. 83–90, 2012.
- [11] V. Sedlák a L. Mihoková, “Svetelné znečistenie v krajine”, *Životné prostredie*, s. 195–207, 2020.

Energetická chudoba na Slovensku

Tomáš Farkaš, Matej Rolko

Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

Ústav manažmentu

xfarkast1@stuba.sk, rolko.matej02@gmail.com

O energetickej chudobe počujeme stále viac, aj v súvislosti s energeticou krízou a rastúcimi cenami. Problém energetickej chudoby je veľmi rozsiahly a presné a následne riešenie je v celku komplikované. Táto práca k študentskej a vedeckej odbornej činnosti sa zameriava na energetickú chudobu na Slovensku a jej následne možné riešenia. Konkrétnejšie sa zameriava na problémy s jednotnou definíciou energetickej chudoby v EÚ a na pochybné postupy kompetentných orgánov. Vo svojej koncepcii z roku 2022, Úrad pre reguláciu sieťových odvetví predstavil návrhy opatrení na ochranu odberateľov spĺňajúcich podmienky energetickej chudoby ktorým sa budeme venovať v našej práci.

1 Energetická chudoba definícia, stav, a príčiny

Energetická chudoba je všeobecne definovaná ako stav, kedy si odberateľ nemôže dovoliť vykurovať domácnosť na základe prípustného štandardu odporúčaného Svetovou zdravotníckou organizáciou. V prípade Slovenskej republiky by sa energetická chudoba mala vzťahovať na skupiny ľudí, ktoré ešte nie sú pod hranicou hmotnej núdze, ale zároveň si nemôžu dovoliť platiť za energiu na zabezpečenie svojich základných životných potrieb. Energetická chudoba sa dotýka predovšetkým domácností, ktoré najviac postihuje rast cien energií pod tlakom dynamických zmien cien ropy a agresívnej inflácie ktorá vplýva nie len na ceny energií ale aj na ceny tovarov a služieb.

Pojem energetická chudoba je zadaný v 2 písm. o) zákona č. 250/2012 Z. z. o regulácii v sieťových odvetviach (ďalej len „zákon o regulácii“) ako stav, kedy priemerné mesačné výdavky domácností na spotrebu elektriny, plynu, tepla na vykurovanie a na prípravu teplej úžitkovej vody, dodávku pitnej vody verejným vodovodom a odvádzanie odpadovej vody verejnou kanalizáciou tvoria významný podiel na priemerných mesačných príjmoch domácností. V tejto definícii nie je bližšie špecifikovaný „významný podiel na priemerných mesačných príjmoch domácností“. Táto definícia si preto vyžaduje upresnenie, na vytvorenie legislatívnych podmienok, ktoré umožnia presne definovať energeticky chudobnú domácnosť. Presná definícia je kľúčová pre tvorbu a implementáciu opatrení a preto v tejto práci navrhujeme jednoznačnú definíciu energetickej chudoby ktorá by sa mala implementovať v celej EÚ.

Energetickú chudobu sme začali vnímať skôr ako vznikla súčasná energetická kríza v EÚ. Energetická chudoba prvotne bola definovaná aj keď nejednoznačne na základe platnej legislatívy EÚ v ES 72/2009.

V súčasnej dobe alarmujúci počet domácností spadá do energetickej chudoby, nakoľko na daný stav vplýva viac faktorov ako: nedostatočný príjem domácnosti, neefektívny spôsob vykurovania, nedostatočná tepelná izolácia nehnuteľností, vysoké ceny energií, neochota odberateľov riadiť svoju spotrebu a inflácia.

Od 1. januára 2023 vstúpilo do platnosti uznesenie č. 722 a 723 z 16.11.2022 o návrhu na schválenie VHZ na zabezpečenie bezpečnosti, pravidelnosti, kvality a ceny dodávok elektriny pre domácnosti v Slovenskej republike a 16. Januára 2023 vláda schválila nariadenie vlády SR č. 19/23, ktorým sa menia ceny za dodávku elektriny na maximálnu výšku 199 €/MWh pre zraniteľných zákazníkov s odberom elektriny do 30 MWh/ročne a zároveň upravuje výšku mesačného poplatku za dodávku elektriny pre domácnosti. Keďže URSO má vo svojej kompetencii rozhodovať o konečných cenách energií, mal by byť nezávislým orgánom a nesmie prijímať pokyny od orgánov verejnej moci ohľadom určovania cien energií. Týmto konaním VHZ a NV sa vniesol chaos do cenotvorby a značná miera neistoty, kto teda v konečnom dôsledku má kompetenciu stanovovať ceny, a či je rešpektovaná legislatíva EÚ, a to konkrétne smernice ES č. 72/2009 a 73/2009.

V roku 2023 sa zvýšili sieťové poplatky v rozmedzí od 42 percent pre odberateľov elektriny pripojených na veľmi vysokom napätí až po 64 percent pre odberateľov pripojených na nízkom napätí. Týka sa to domácností v súvislosti so zvýšením cien výrobkov a služieb (potraviny, spotrebný tovar, stavebný materiál a pod.) a zraniteľných odberateľov.

Domácností a vybraných zraniteľných odberateľov na základe mimoriadnych opatrení vlády SR, sa časť koncovej ceny za dodávku zvýši približne o 5%, a sieťové poplatky останú na rovnakej úrovni ako v roku 2022. Ak sa nezmenia cenové položky mimo regulačného rámca Úradu pre reguláciu sieťových odvetví (odvod do Národného jadrového fondu alebo DPH), tak koncová cena elektriny pre domácnosti sa podľa úradu zmení iba o približne 2,5%. Pri elektrine pre domácnosti, je cena za dodávku jednotná u všetkých dodávateľov a bez ohľadu na vysokú tarifu a to na úrovni 75,54 Eur/MWh s mesačným poplatkom v závislosti od sadzby určenej úradom pre reguláciu sieťových odvetví (ďalej len „URSO“).

Domácnosť v bytovom dome s priemernou ročnou spotrebou elektriny 2 272 kWh, si priplati na základe mimoriadnych vládnych opatrení mesačne 0,78 eur. Oproti priplateniu si o 10,95 eura, ak by sa rozhodovalo podľa cenového rozhodnutia.

V druhom prípade ide o rodinný dom s elektrickým vykurovaním a ohrevom vody. Priemerná ročná spotreba tejto

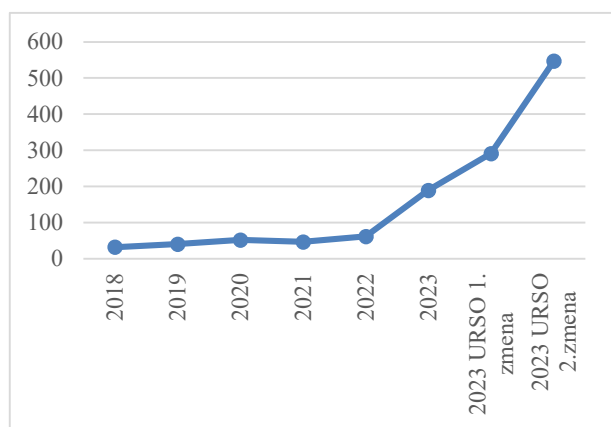
domácnosti je 8 695 kWh. Pripláti si len 2,46 eur mesačne. Pri cenovom rozhodnutí by sa jednalo o navýšenie až o 34,62 eur mesačne.

Pri oboch ilustračných príkladoch je ročné navýšenie faktúr za elektrickú energiu na úrovni takmer troch percent, čo je oproti pôvodnému navýšeniu ceny veľmi malé percento. Tieto skutočnosti môžeme vidieť na obrázku číslo jeden.

Príklady domácností	Priemerná ročná spotreba elektriny	Priemerné ročné náklady na elektrinu (EUR) bez DPH			Zmena nákladov 2023/2022 (Eur za mesiac)	
	kWh	2022	2023 s MOP	2023 CR	S MOP	CR
Domácnosť v bytovom dome	2 272	350,46	359,78	481,84	0,78	10,95
Rodinný dom s elektrickým vykurovaním a ohrevom vody	8 695	1 108,28	1 137,77	1 523,75	2,46	34,62

Obr. č.1 Odhad dopadov na náklady domácnosti na elektrinu pri typických príkladoch spotreby, vlastné vyhotovenie [9]

Vysvetlivka: CR - Cenové rozhodnutia, S MOP - mimoriadnymi opatreniami

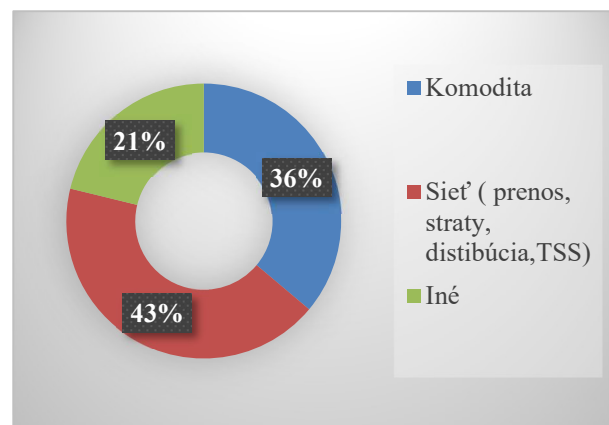


Obr. č.2. Priemerná cena elektriny v EUR/MWh za dané roky [10][11][12][13]

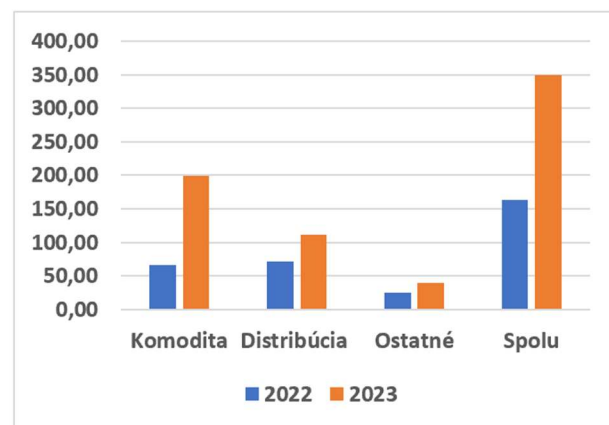
V tomto grafe môžeme pozorovať vývoj priemerných cien elektriny PXE SK BL za jednotlivé roky, od roku 2018 po rok 2023. V roku 2018 bola priemerná cena elektriny na hodnote 31,78 EUR/MWh. V rokoch 2019 a 2020 ceny mierne stúpili, a to na 40,5 EUR/MWh a 51,86 EUR/MWh. Rok 2021 znamenal mierny pokles na hodnotu 46,11 EUR/MWh. Nasledujúcim rokom sa stanovil stúpajúci trend, kde v tomto roku (2022) bola priemerná cena elektriny 61,21 EUR/MWh a v roku 2023 už na hodnote 189 EUR/MWh. Po prvej zmene ÚRSO 291,13 EUR/MWh a po druhej zmene ÚRSO až 547,59 EUR/MWh.

1.1 Štruktúra a nárast ceny elektriny pre malé podniky

Štruktúra ceny elektriny (pre malé podniky, DSS, mestá, obce, školy a podobne) je podstatná pre určenie ceny samotnej elektriny (to čo je napísané vo faktúre zaslanej odberateľovi) skladá sa z komodity, poplatky za používanie sústavy (prenos, straty, distribúcia, TSS), a iných zložiek (TPS, NJF, NDODAVKY + ZISK).



Obr. č.3 Štruktúra ceny elektriny [7][14]



Obr. č.4 Nárast jednotlivých zložiek ceny elektriny [7][14]

V grafe môžeme vidieť nárast cien jednotlivých zložiek ceny elektriny. V prípade komodity ide o nárast o 200 %, pri distribúcii ide 56% a pri ostatných zložkách je to 52%. V porovnaní s rokom 2022 ide o nárast ceny elektriny medziročne o 114%.

1.2 Návrh definície energetickej chudoby

V Európskej únii neexistuje jednotná definícia energetickej chudoby a preto sme sa rozhodli na základe našich skúseností bežného odberateľa navrhnúť všeobecnú definíciu energetickej chudoby ktorá by mohla byť platná pre celú EÚ nasledovne.

Ak náklady domácnosti s jednou osobou s pravidelným príjmom (zárobkovo činná osoba, senior, výsluhový senior) na energiu presiahnu viac ako 45% zo životného minima, tak sa domácnosť stáva energeticky chudobnou. V prípade domácností s 2 osobami s pravidelným príjmom, ktorých náklady na energiu presiahnu 35% z ich súčtu životných minim,

sa taktiež stávajú energeticky chudobnými, a v prípade domácností s 3 a viac osobami a s pravidelným príjmom, ktorých náklady na energiu presiahnu 25% z ich súčtu životných miním, sa radia do kategórie energeticky chudobnej domácnosti.

V prípade Slovenskej republiky je aktuálna výška životného minima 234,42 eur, teda ak čiastka za energiu v prípade jednej pracujúcej osoby prekročí 105,49 eur, v prípade dvoch pracujúcich osôb, (alebo jedného seniora a jedného prac. človeka) prekročí čiastku 164,10 eur a v prípade troch pracujúcich osôb prekročí 175,82 eur, hovoríme o tom že spadajú do energetickej chudoby.

Pre sumárnu kategorizáciu energetickej chudoby sme použili vzorec:

$$\frac{Zn \times x}{100} \times Pzn_{znx} \quad (1)$$

Kde Zn je životné minimum, x je počet osôb s pravidelným príjmom v domácnosti a konečne Pzn_{znx} je % prislúchajúce počtu osôb s pravidelným príjmom v domácnosti.

Definícia energetickej chudoby aplikovaná na národnej úrovni by mala vychádzať zo sociálnych a ekonomických charakteristík života domácností v danej krajine a tiež by jej definícia mala byť predmetom širšieho konsenzu všetkých relevantných orgánov štátnej a verejnej správy.

ÚRSO odporúča vytvorenie nadrezortnej pracovnej skupiny vo svojej gescii, ktorá by sa zaoberala otázkou znenia tejto definície a výstupom ktorej by bolo jej legislatívne ukotvenie. Hovoríme o rezortoch ako je Ministerstvo financií SR, Ministerstvo hospodárstva SR, Ministerstvo práce, sociálnych vecí a rodiny SR a ÚRSO.

Navrhaná metodika v koncepcii ÚRSO definovania energetickej chudoby: V súčasnosti je domácnosť ohrozená energetickou chudobou vtedy, ak po odpočítaní jej celkových nákladov na energie a vodu od celkového disponibilného príjmu domácnosti zostanú danej domácnosti disponibilné finančné zdroje v určenej finančnej výške, napríklad v porovnaní voči univerzálne akceptovanej hodnote životného minima. Pri posudzovaní celkových nákladov domácnosti na energie a dodávku pitnej vody, verejným vodovodom a odvádzanie odpadovej vody verejnou kanalizáciou (ďalej len „voda“) je možné zohľadniť aj hodnotu základného energetického štandardu, ktorú bude potrebné určiť pri špecifikácii konkrétneho znenia definície. Stanovenie tejto hodnoty by malo fungovať ako nástroj na adresnejšie identifikácie domácností, ktoré pomoc reálne potrebujú, a tiež ako nástroj motivujúci k úprave spotrebiteľských návykov s cieľom motivovať domácnosti k hospodárnejšiemu využívaniu energií a vody.

Príklad aplikácie navrhovanej metodiky: ÚRSO navrhuje metodiku definovania energetickej chudoby a metodický prístup, ktorý sa opiera o východiská relevantnej legislatívy EÚ, týkajúcej sa energetickej chudoby. Je pripravený danú nadrezortnú skupinu riadiť a zastrešiť jej činnosť, ale bude aj na ďalších inštitúciách zapojený do činnosti skupiny tak, aby poskytl expertízu a údaje, na základe ktorých bude môcť skupina ako kolektív vytvoriť odborne správny návrh definície.

2 Návrhy opatrení ÚRSO

Podľa § 10 písmena g) zákona o regulácii ÚRSO „prijíma opatrenia na dosiahnutie univerzálnej služby a služby vo verejnom záujme a prispieva k ochrane zraniteľných odberateľov plynu a odberateľov spĺňajúcich podmienky energetickej chudoby v súlade s koncepciou podľa § 9 ods. 3 písmena f)“. ÚRSO chce tieto navrhované opatrenia implementovať v zmysle svojich legislatívnych kompetencií. ÚRSO chce tieto navrhované opatrenia implementovať v zmysle svojich legislatívnych kompetencií. Treba podotknúť že tieto nižšie navrhované opatrenia si budú v prvom kroku vyžadovať primeranú úpravu legislatívneho splnomocnenia ÚRSO v zákone o regulácii a iných zákonoch.

Podľa nášho názoru, viacero z týchto navrhovaných opatrení úradom regulácie a sieťových odvetví mohli byť z časového hľadiska v platnosti skôr, ako je tomu v súčasnosti. Je potrebné aby sa tieto návrhy začali implementovať čo najskôr vzhľadom na aktuálnu politickú situáciu a situáciu na slovenskom trhu z energiami.

2.1 Podpora využívania systémov preplateného (kreditného) odberu elektriny

Návrh tohto opatrenia vychádza z riešenia, ktoré je aktuálne aplikované spoločnosťou Východoslovenská distribučná a.s. vo vybraných oblastiach na východnom Slovensku. Toto opatrenie bolo však navrhované už v 2015. Je založené na kreditnom systéme a využívaní inteligentných meracích systémov (IMS). Technológia IMS prepája viacero aktérov, vrátane zapojenia samospráv. Táto technológia dokáže manažovať predplatenie elektriny a pri vyčerpaní kreditu „vypnúť“ elektromer, kým sa kredit neobnoví. Danému projektu priznal ÚRSO záštitu rámci pilotného ročníka schémy regulačného sandboxu. V nadväznosti na výsledky tohto pilotného projektu ÚRSO zváži a nastaví podmienky zavedenia povinnosti pre dodávateľov ponúkať predplatený odber elektriny po celom Slovensku domácnostiam, ohrozených energetickou chudobou alebo domácnostiam ktoré majú záujem o tento produkt. Domácnosti ktoré spadajú do definície energetickej chudoby, by mali možnosť si predplatiť dodávku elektriny vopred a lepšie riadiť svoju spotrebu. Domácnosť by tak mala neustále kontrolovať nad spotrebou elektriny a informácií o objeme disponibilnej elektriny v rámci kreditu.

2.2 Legislatívna úprava mandátu ÚRSO o posilnení ochrany spotrebiteľa a domácnosti ohrozených energetickou chudobou

Zákon č.250/2012 Z.z., dáva ÚRSO kompetencie vykonávať cenovú a vecnú reguláciu v sieťových odvetviach.

Všeobecný a legislatívny mandát ÚRSO sa „transparentným a nediskriminačným spôsobom snaží zabezpečiť dostupnosť tovarov a ním súvisiacich regulovaných činností za primerané ceny a v určenej kvalite“ (podľa §3 ods. 1 zákona č. 250/2012 Z. z. o regulácii v sieťových odvetviach), bez ohľadu na špecifiká odberateľov. Opatrenia ktoré sú zámerné na pomoc energeticky chudobným domácnostiam tak je možné implementovať na základe legislatívneho mandátu, ktorý má ÚRSO.

V tomto kontexte ÚRSO môže už teraz implementovať nasledovné opatrenia na ochranu domácnosti ohrozených energetickou chudobou.

Optimalizácia dodávkových a distribučných taríf
Navrhuje vytvorenie povinnosti pre dodávateľov energií, aby automaticky, na ročnej báze aktívne identifikovali a analyzovali optimálne tarify pre domácnosti ohrozené energetickou chudobou, a tiež umožnili jedenkrát za rok bezplatnú zmenu dodávkových a distribučných taríf v prípade potreby. Cieľom je úprava cenových parametrov, ktorá bude viesť k efektívnemu zníženiu ročného nákladu na energie.

2.2.1 Ponuka bezplatných splátkových kalendárov a energetického poradenstva

Navrhuje sa zadefinovanie procesov v oblasti vecnej regulácie tak, aby odoberateľ v energeticky chudobnej domácnosti v prípade meškania s úhradou dodávky za energie, automaticky dostal od príslušného dodávateľa ponuku na bezplatný splátkový kalendár a informácie o dostupnosti energetického poradenstva. Do úvahy tiež pripadá automatická ponuka kreditného systému. Cieľom je pomôcť odoberateľovi uhrádzať záväzky za dodávky energií a v prípade, že dotknutej domácnosti aktuálna situácia nedovoľuje uhradiť celý výšku záväzku, bolo by možné tento záväzok rozložiť v čase a obmedziť tak vznik statusu dlžníka.

2.2.2 Zľava pre uplatňovanie doplnkových cenníkových služieb

Dodávatelia a prevádzkovatelia distribučných sústav sietí a vody môžu účtovať poplatky za rôzne úkony vykonané na odbornom mieste, ako aj poplatky súvisiace s prerušením a opätovným obnovením distribúcie alebo v prípade prerušenia v dôsledku neplatenia faktúr. Rôzne poplatky sa taktiež účtujú vo vzťahu k zásahom prevádzkovateľa infraštruktúry na určenom meradle. Ceny za tieto doplnkové služby nie sú predmetom cenovej regulácie ÚRSO. S cieľom zvýšiť ochranu odoberateľov by ÚRSO stanovil zľavu, ktorú by prevádzkovatelia infraštruktúry mali povinnosť uplatniť voči odoberateľom ohrozených energetickou chudobou. Mohlo by ísť napríklad o 30% zľavu z cenníkovej ceny za už spomenuté doplnkové služby, alebo zákonom stanovený spôsob kalkulácie zľavy zo štandardnej ceny. Domácnosti ohrozené energetickou chudobou by mohli byť oslobodené úplne od niektorých typov poplatkov. Tiež by bolo možné previazanie tohto opatrenia s opatrením podpory využívania systémov predplateného odberu elektriny, ktorým by sa prechádzalo hlavne k využitiu niektorých doplnkových služieb.

2.2.3 Ochrana pred prerušením distribúcie energií a pitnej vody hlavne v zimných mesiacoch

Návrh je stanoviť mechanizmus ochrany pred prerušením dodávok energií a pitnej vody pre odoberateľov ktorý spadajú do definície energetickej chudoby. Takúto formu sa navrhuje aplikovať najmä počas kalendárnych mesiacov, kedy je dodávka energií kritická. Je tiež potrebné určiť výšku maximálne mesačného nedoplatku, napríklad môže ísť o maximálnu výšku dvojmesačnej dodávky energií alebo vody, prípadne v inej výške v závislosti od odporúčania a záverov nadrežortnej skupiny, aby sa zamedzil špekulatívnemu správaniu odoberateľa.

2.2.4 Zákaz podomového predaja energií a pitnej vody

ÚRSO si zo svojej doterajšej praxe v oblasti výkonu ochrany spotrebiteľa všima, že podomový predaj nie je optimálnou platformou z hľadiska možnosti kontroly a efektívneho predchádzania nekalým obchodným praktikám, ktoré sa môžu vyskytnúť zo strany obchodných zástupcov jednotlivých dodávateľov. ÚRSO má už v súčasnosti kompetenciu obmedziť podomový predaj. Má na to všetky kompetencie. Takáto úprava má potenciál zvýšiť mieru ochrany všetkých domácností, a nielen tých ktoré spĺňajú kritéria energetickej chudoby

3 Odporúčané opatrenia štátnej politiky ÚRSO

Problematika energetickej chudoby je problémom ktorý sa dotýka viacerých rezortov. Pomoc domácnostiam ohrozených energetickou chudobou je potrebné poskytnúť vo veľmi rozsiahlej a komplexnej forme, ktorú nedokáže vyriešiť len jedna inštitúcia samostatne. Nižšie vám uvádzame návrhy ktoré sú inšpirované existujúcimi programami a schémami v rámci EÚ a príslušnej legislatívy EÚ (Článok 3 ods. 3 písm. d) nariadenia EÚ 2018/1999). Navrhované opatrenia môžu byť trvalé alebo len dočasné v závislosti od prevládajúcej situácie v energetike. Riešenie energetickej chudoby by malo zahŕňať aj sociálnu politiku, ale možno hovoriť najmä o finančnej podpore nízkopríjmovým domácnostiam, ktoré sú ohrozené energetickou chudobou.

3.1 Daňové zvýhodnenia energetickej chudobných domácností

Pomerne rýchlo realizovateľné opatrenie môže byť zvýhodnenie domácností ktoré spĺňajú kritéria energetickej chudoby prostredníctvom daňovej politiky, napríklad formou zníženej DPH. Toto opatrenie by mohlo zvýšiť cenovú dostupnosť dodávky elektriny, plynu, tepla, vodného a stočného prostredníctvom faktúr od príslušných odoberateľov. Ďalej môže ísť o služby spojené s obnovou rodinných domov, ak táto vedie k zvyšovaniu ich energetickej efektívnosti. Vzáťhovať by sa mohla na nákup materiálov, zariadení a poskytovania montážnych služieb.

3.2 Zavedenie opatrení na posilnenie finančnej podpory domácností ohrozených energetickou chudobou

Finančne príspevky môžu byť dôležitými nástrojmi na podporu domácností ohrozených energetickou chudobou. V podmienkach Slovenskej republiky ide o príspevok na bývanie poskytovaný v rámci pomoci v hmotnej núdzi. Príspevok na bývanie sám o sebe nedokáže vyriešiť problém energetickej chudoby, ale ak sa k tomu prirátajú aj dávka v hmotnej núdzi a ostatné príspevky v rámci pomoci v hmotnej núdzi, môže ísť o nástroj slúžiaci na pokrytie časti výdavku na energie. Nastavenie výšky príspevku na bývanie je však v súčasnej ekonomickej a spoločenskej situácii nedostatočné. Bolo by pozitívne prijatie ďalších finančne udržateľných podporných opatrení, ktoré sú zamerané na širšiu skupinu obyvateľov za účelom zmiernenia negatívnych dôsledkov

energetickej chudoby. Zavedenie samostatného príspevku na bývanie a jeho vyňatie zo systému pomoci v hmotnej núdzi sa javí aktuálne ako najvhodnejšie opatrenie.

Účinnou formou finančnej pomoci pre domácnosti, ktorým sa poskytuje pomoc v hmotnej núdzi môže byť aj jednorazová dávka v hmotnej núdzi. Táto jednorazová dávka je určená na čiastočnú úhradu mimoriadnych výdavkov členov domácnosti, ktorým sa poskytuje pomoc v hmotnej núdzi.

3.3 Zvyšovanie energetickej efektívnosti a využívanie energie z obnoviteľných zdrojov

Cieľom daného opatrenia je zníženie energetickej spotreby v budovách, a to hlavne prostredníctvom komplexnej obnovy budov. Je potrebné sa zamerať na podporu z finančných prostriedkov poskytovaných štátom adresne na domácnosti ohrozené energetickou chudobou ako napríklad, REPowerEU, Envirofond, Plán obnovy a odolnosti a podobne.

Pre mnohé domácnosti je zlepšenie tepelno-izolačných vlastností nehnuteľností finančne nedostupným, hlavne tie, ktoré sú ohrozené energetickou chudobou.

Finančné prostriedky z vyššie uvedených programov by mohli byť využité v rámci existujúcich programov ako sú napríklad Zelená domácnosť alebo Obnov dom. Je potrebné aby sa tieto programy stali dostupné pre domácnosti ohrozené energetickou chudobou, optimálne tak, aby umožnili pokryť 100% nákladov, taktiež aby tieto programy boli dostupné napríklad aj nízkopríjmovým rodinám, rodinám so ZŤP dieťaťom alebo domácnosti s minimálne štyrmi deťmi a podobne, ktorým by štátna podpora vedela pokryť 95% nákladov spojených s obnovou a modernizáciu kúrenia.

Doplňkovým nástrojom môže byť štátom vytvorená schéma na financovanie potrebnej spoluúčasti, napríklad formou poskytnutia dlhodobých pôžičiek bez poplatku za poskytnutie a s nízkym alebo nulovým úročením. V súlade s článkom 7 európskej smernice o energetickej efektívnosti, ktorý hovorí o uprednostňovaní spotrebiteľov ohrozených energetickou chudobou, by štát mohol navrhnúť systémy týchto programov.

Inšpiratívnym príkladom z Českej republiky je nedávno oznámená schéma „Nová zelená úsporám Light“, ktorá je špecificky určená pre nízkopríjmové domácnosti a dôchodcov respektíve domácnostiam s nárokom na príspevok na bývanie. Dotovať sa majú jednoduché stavebné úpravy ktoré majú okamžitý efekt na spotrebu energií akým sú zateplenie fasád, striech alebo výmena okien. V istých prípadoch môže príspevok pokryť aj celé náklady na stavebnú úpravu, nakoľko stavebné práce možno vykonávať svojpomocne. Platí však cenový strop ktorý je v prepočte zhruba 6,2 tisíc EUR, na jeden trvale obývaný rekreačný objekt na jednu domácnosť alebo jeden rodinný dom.

Ochrana domácnosti pred rizikom energetickej chudoby má zvyšovať cenovú dostupnosť energií a pitnej vody, avšak súčasne má viesť k hospodárnemu využívaniu energií.

3.4 Zapojenie samospráv do riešenia problematiky energetickej chudoby

V boji proti energetickej chudobe môžu samosprávy plniť kľúčovú úlohu vzhľadom na ich miestne znalosti obyvateľstva a bytového fondu, zodpovednosť a schopnosť zastupovať záujmy miestnych občanov. Ich činnosť môže zahŕňať napríklad poskytovanie sociálneho bývania, služieb, a finančnej podpory, spoluprácu so spotrebiteľskými združeniami, informovanie a vzdelávanie obyvateľov a podporu implementácie systémov predplatenej dodávky elektriny.

3.5 Vytvorenie jednotnej webovej stránky s ucelenými informáciami o energetickej chudobe

Navrhované riešenie zahŕňa vytvorenie informačnej platformy, ktorá by bola súčasťou webovej stránky vlády SR, niektorého ministerstva (MHSR, MPSVaR SR) alebo štátnej inštitúcie (ÚRSO, SIEA, ŠOI). Cieľom tejto platformy by bolo poskytnúť všetky potrebné informácie ohľadom energetickej chudoby na jednom mieste, a mala by umožniť overenie prostredníctvom automatického alebo kontaktného formulára, či domácnosť spĺňa kritéria ohrozenia energetickou chudobou. Ďalej by mali byť na webe všetky kontaktné informácie, odkazy na dostupné nástroje pomoci, a tiež online poradňa a ďalšie požiadavky vyplývajúce z európskych smerníc a nariadení.

Súčasťou by malo byť aj vytvorenie databázy údajov, zabezpečenie zberu a analýzy údajov potrebných pre požadované reportovanie v rámci európskej legislatívy.

4 Záver

Základným prístupom k problematike energetickej chudoby by malo byť uvedenie si, že energetická chudoba nie je len záležitosťou energetiky, ale ide o multirezortný problém, ktorý je možné riešiť iba komplexne za účasti a garancie všetkých zainteresovaných. Energetická chudoba je dôsledkom mnohých faktorov, pričom ich drvivá časť primárne nesúvisí s výrobcami či dodávateľmi energií. Ide skôr o celkový stav spoločnosti a preto by sa mal tento problém riešiť komplexnejšie. Návrh koncepcie na riešenie energetickej chudoby je potrebný. Jeho implementácia by však mala zohľadňovať ekonomickú realitu Slovenska a nevytvárať ďalší kanál šírenia chudoby prenášaním nákladov týchto konceptov na ostatné obyvateľstvo.

Je nutné stanoviť optimálnu sociálnu proporionalitu opatrení zo strany štátu a sociálni partneri vlády tiež musia zohrať svoju iniciatívnu úlohu, a to nezotrvávať len v pozícii pozorovateľa a kritika, ale aktívne podávať konštruktívne podnety, monitorovať dopad finančných a sociálnych opatrení s následnou spätnou väzbou k ministerstvám a úradu.

Podakovanie

Touto cestou vyjadrujeme podakovanie pánovi prof. Ing. Františkovi Janičkovi, PhD. a Ing. Jozefovi Holjenčíkovi, PhD. za odborné usmernenia, cenné rady a podnetné návrhy, ktoré nám pomohli pri vypracovaní našej študentskej vedeckej odbornej činnosti.

Literatúra

- [1] Bakoš, Tomáš. 2023. ÚRSO finálne rozhodol o cene plynu na rok 2023. Koľko si priplatí domácnosť? *ekonomika.pravda.sk*. [Online] 4. Január 2023. [Dátum: 10. Apríl 2023.] <https://ekonomika.pravda.sk/energetika/clanok/652508-urso-finalne-rozhodol-o-cene-plynu-na-rok-2023-kolko-si-priplati-domacnost/>.
- [2] Bakoš, Tomáš. 2022. ÚRSO ukázal, kto sa prepadne do energetickej chudoby. Odhady hovoria až o vyše 430-tisíc domácnostiach (+ príklady). *ekonomika.pravda.sk*. [Online] 11. November 2022. [Dátum: 8. Apríl 2023.] <https://ekonomika.pravda.sk/energetika/clanok/647989-urso-ukazal-kto-sa-prepadne-do-energetickej-chudoby-odhady-hovoria-az-o-vyse-430-tisic-domacnostiach-priklady/>.
- [3] elgas. 2023. Nové ceny energií na rok 2023. *elgas.sk*. [Online] 20. Január 2023. [Dátum: 2023. Apríl 9.] <https://www.elgas.sk/nove-ceny-energii-na-rok-2023/>.
- [4] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví. 2016. Energetická chudoba a zraniteľní odberatelia v energetickom sektore v Európe. Prehľad výskumných projektov v európskych štátoch. [Online] Apríl 2016. [Dátum: 8. Apríl 2023.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/159/114.4b9fc5.pdf>.
- [5] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví. 2014. Koncepcia na ochranu odberateľov spĺňajúcich podmienky energetickej. [Online] Jún 2014. [Dátum: 8. Apríl 2023.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/d03/317.e303b2.pdf>.
- [6] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví. 2022. Koncepcia na ochranu odberateľov spĺňajúcich podmienky energetickej chudoby. [Online] 2022. [Dátum: 8. Apríl 2023.] <https://www.slov-lex.sk/legislativne-procesy/-/SK/dokumenty/LP-2022-786>.
- [7] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví. 2021. Výročná správa 2021. *urso.gov.sk*. [Online] 2021. [Dátum: Apríl 7 2023.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/dad/2030.b1313b.pdf>.
- [8] SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2009/72/ES. *eur-lex.europa.eu*. [Online] 13. Júl 2009. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=CELEX:32009L0072>.
- [9] TASR, Pravda. 2022. ÚRSO finálne zverejnil ceny elektriny na rok 2023. Koľko si priplatí domácnosť? *ekonomika.pravda.sk*. [Online] 31. December 2022. [Dátum: 10. Apríl 2023.] <https://ekonomika.pravda.sk/energetika/clanok/652202-urso-finalne-zverejnil-ceny-elektriny-na-rok-2023-kolko-si-priplati-domacnost/>.
- [10] ÚRSO. 2021. Burzové ceny elektriny a plynu. *urso.gov.sk*. [Online] 26. Apríl 2021. [Dátum: 10. Apríl 2023.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/bca/623.9de544.pdf>.
- [11] ÚRSO. 2021. Burzové ceny elektriny a plynu. *urso.gov.sk*. [Online] 25. Január 2021. [Dátum: 10. Apríl 2023.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/29e/536.619101.pdf>.
- [12] ÚRSO. 2022. Burzové ceny elektriny a plynu k 26.4.2022. *urso.gov.sk*. [Online] 26. Apríl 2022. [Dátum: 10. Apríl 2023.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/b01/1922.7a0969.pdf>.
- [13] ÚRSO. 2023. Burzové ceny elektriny a plynu k 3.4.2023. *urso.gov.sk*. [Online] 3. Apríl 2023. [Dátum: 2023. Apríl 10.] <https://www.urso.gov.sk/data/att/88b/2409.9b6a11.pdf>.
- [14] 2023. Z ČOHO SA SKLADÁ CENA ELEKTRINY? *sse.sk*. [Online] 2023. [Dátum: 7. Apríl 2023.] https://www.sse.sk/domacnosti/elektrina/potrebuje-poradit/z-coho-sa-sklada-cena-elektriny?page_id=7838.
- [15] Zákon 250/2012 Z.z o regulácii v sieťových odvetviach. [Online] <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2012/250/#poznamky.poznamka-8>

SWOT analýza vodíkového hospodárstva

Dominik Oravec, doc. Mgr. Miroslava Farkas Smitková, PhD.

Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

xoravecd@stuba.sk

Abstrakt – Príspevok popisuje vodíkové hospodárstvo, pričom sa zaoberá rôznymi problémami s ním spojenými, ako napr. energetickú, finančnú náročnosť, bezpečnostné riziká a pod. V časti SWOT analýzy ide o zanalyzovanie a posúdenie daných problémov a ich prípadné riešenie.

1 Úvod

V aktuálnom období kedy najmä priemyselne rozvinuté krajiny sú závislé od fosílnych palív, ktorých ložiská sú konečné, je snaha o vznik nových zdrojov, spôsobov akumulácie a transportu energie výrazne vyššia. Dôraz sa kladie najmä na zdroje, ktoré nespôsobujú skleníkové plyny (oxid uhličitý, metán a ďalšie) a s nimi spojené globálne otepľovanie. Takýmito zdrojmi sú najmä zdroje obnoviteľné zdroje energie (OZE). Avšak tieto zdroje (najmä slnečná a veterná elektrárňa) sú ťažko predikovatelné z hľadiska výroby a preto sa ponúka možnosť akumulácie energie v čase vyššej výroby. Dnes už poznáme rôzne spôsoby akumulácie energie ako sú napr. prečerpávací vodná elektrárňa, batériové úložiská. Jednou z možností sa ponúka akumulácia energie vo forme vodíka, tejto problematike sa venuje vodíkové hospodárstvo.

Vodíkové hospodárstvo je zamerané na akumuláciu energie rovnako ako z OZE tak aj z iných zdrojov. Úlohou vodíkového hospodárstva je hľadať ideálne riešenia na komplexný problém výroby, skladovania, transportu a využitia vodíka.

2 Vodíkové hospodárstvo

2.1 Výroba vodíka

Výroba vodíka je proces, ktorý štiepi chemickú väzbu vody a vzniká samostatný vodík, a kyslík, je popísaný rovnicou: [8]



Podľa rôznych spôsobov výroby vodíka, delíme vodík do farebného spektra, vid' Tab. 1. Každý spôsob výroby má rôzny dopad na životné prostredie, prípadne pri OZE takmer nulový. Napriek tomu, že parný reforming je proces výroby, ktorý využíva fosílna palivá a tým sa radí medzi sivý vodík, teda má negatívny dopad na životné prostredie, ide o jeden z najúčinnejších a aktuálne aj najvyužívanejších spôsobov výroby. Tento a vybrané spôsoby výroby sú veľmi stručne popísané v Tab. 2

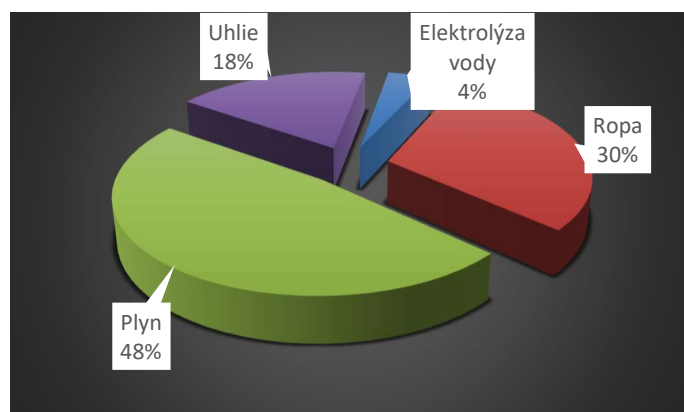
Tab. 1. Farebné značenie vodíka [9]

Farebné označenie	Spôsob výroby
Sivý vodík	Jedná sa o vodík, kde sú fosílna palivá východiskovou surovinou, najmä pri parnom reformingu. V súčasnosti najčastejší spôsob výroby. Neobsahuje zachytávacie zariadenie skleníkových plynov.
Hnedý/Čierny vodík	Proces vyrábajú vodíka pomocou čierneho alebo hnedého uhlia. Má najhorší dopad na životné prostredie.
Modrý vodík	Podobne ako sivý vodík, vyrábaný z fosílnych palív, kde sa využívajú technológie na zachytávanie CO ₂ . Zníženie emisií skleníkových plynov dosahuje viac ako 90 %.
Ružový vodík	Vodík vyrábaný elektrolýzou, kde sa využívajú vysoké teploty jadrových reaktorov na elektrolýzu vodnej pary. Tiež označovaný ako červený alebo fialový vodík.
Tyrkysový vodík	Vyrábaný procesom nazývaným metánová pyrolýza. V budúcnosti môže byť označovaný ako nízko emisný vodík, v závislosti od toho, či bude tento proces napájaný z obnoviteľných zdrojov.
Žltý vodík	Jedná sa o pomerne nové označenie. Značí sa ním vodík vyrábaný elektrolýzou, kde zdrojom elektrickej energie potrebnej na napájanie je solárna energia.
Biely vodík	Prírodný vodík nachádzajúci sa v podzemných ložiskách a spracovávaný frakovaním. Aktuálne neexistuje stratégia ako tento vodík využívať.
Zelený vodík	Jedná sa o vodík, kde energia potrebná na výrobu pochádza z OZE. Ako napríklad fotovoltaické panely alebo veterné turbíny.

Tab. 2. Spôsoby výroby [8]

Spôsob výroby	Stručný popis výroby
Elektrolýza	Pomocou elektrického prúdu je štiepená chemická väzba vody.
Termochemické cykly	Endotermický dej pri ktorom sa využíva energia z jadrovej alebo zo slnečnej energie na tepelný rozklad vody.
Parný reforming	Endotermická reakcia zemného plynu a vodnej pary. Reakcia vodnej pary o teplote 750 – 950 °C. Vzniká vodík, oxid uhoľnatý a menšie množstvo oxidu uhličitého.

Aktuálne až 96 % celkovej výroby vodíka tvoria fosílna palivá. Časť vyrobeného vodíka elektrolýzou predstavuje 4 %. [2] Konkrétne rozdelenie výroby vodíka v závislosti od zdroja energie potrebnej na chemický rozklad vody je uvedené v Obr. 1.



Obr. 1. Členenie výroby vodíka Údaje z: [3]

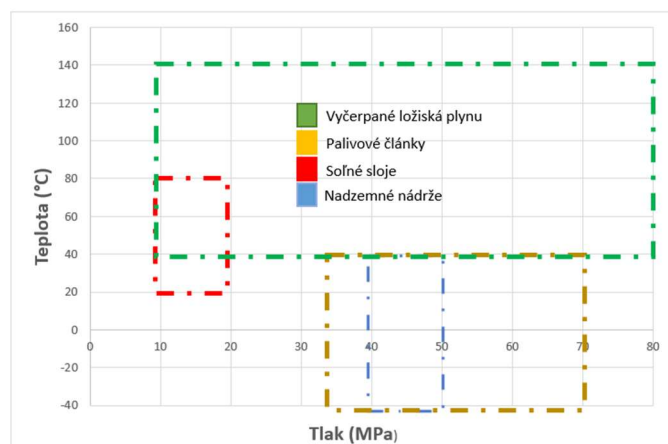
2.2 Skladovanie vodíka

Vodík je skladovaný v rôznych formách, každá forma má určité energetické nároky. Skladovanie sa realizuje vo forme plynu, kvapaliny alebo prípadných hydridov, kde vodík je chemicky viazaný na rôzne látky, ktorými môžu byť aj kovy pri vhodných teplotách a tlakoch.

2.2.1 Skladovanie vo forme plynu

Pre priemysel a veľkokapacitné úložiska vodíka je vhodné vodík skladovať v plynnej forme. V plynnej forme skladovaný vodík je možné uskladniť v tlakových nádobách nad zemským povrchom prípadne aj pod morskou hladinou. Najvýhodnejším skladovaním veľkého množstva vodíka sa javí vo využití vyčerpaných ložísk zemného plynu, soľných slojoch alebo prípadných umelo vytvorených podzemných zásobníkoch. Každý z týchto spôsobov skladovania si vyžaduje v určitom rozsahu rôzne hodnoty tlaku a teploty, vid' Obr. 2. Straty pri skladovaní v tejto forme vznikajú či už potrebnými kompresnými zariadeniami na stláčanie vodíka na

určitú hodnotu tlaku, alebo v prípade podzemných zásobníkov sa časť vodíka usádza v mikropóroch zeminy, preniká do nadložných vrstiev alebo sa zachytáva vo vode viazanej v zemine.



Obr. 2. Hodnoty teplôt a tlaku, ktoré sú potrebné na skladovanie vodíka rôznymi spôsobmi. Údaje z: [7]

2.2.2 Skladovanie vo forme skvapalneného plynu

Na rozvoji skladovania vodíka v kvapalnej forme sa podieľala najmä organizácia NASA, ktorá vodík využíva ako raketové palivo. Skvapalňovanie vodíka považujeme za energeticky náročný proces v ktorom treba kvapalný vodík ochladzovať na teplotu 20 K a celý proces spotrebuje 15,1 MJ/kg energie. [8] Množstvo energie potrebnej na skladovanie vodíka v kvapalnej forme ovplyvňuje čistota plynov, kde všetky plyny okrem hélia je potrebné oddeliť od vodíka, predovšetkým kyslík, ktorý pri koncentrácii vyššej ako je 1 mg kyslíka na 1 kg vodíka spôsobuje explóziu. [8] Ďalšia energetická náročnosť vzniká prechodom vodíka z ortoformy do paraformy. Ortoforma vodíka je stav, kde oba atómy molekuly vodíka majú symetrické spiny, zatiaľ čo pri paraforme sú tieto spiny asymetrické. Paravodík je stabilnejší pri nižších teplotách a má nižší entalpický obsah. Preto sa pri prechode z ortoformy na paraformu uvoľňuje teplo, ktoré zvyšuje nároky na chladiaci proces.

2.2.3 Hybridné skladovanie

Hybridné skladovanie vodíka prináša možnosť zníženia veľkosti skladovacích zásobníkov a vznikajú zásobníky vhodné pre koncových spotrebiteľov. Ide o typ skladovanie pri ktorom sa vodík viaže na iný nosič. Týmto nosičom môžu byť kovy a ich zliatiny, vznikajú tak hydridy kovov. V závislosti od zliatiny sa pri vhodných teplotách a tlakoch viaže vodík na tieto zliatiny. Pri viazaní vodíka ide exotermickú reakciu, pri plnení zásobníka sa uvoľňuje teplo a nádoba musí byť chladená aby nedochádzalo priamo aj k uvoľňovaniu vodíka z nádoby. Pretože pri vyprázdňovaní zásobníka je potrebné nádobu zohriať, prípadne uvoľniť tlak.

2.3 Transport vodíka

Transport vodíka sa rieši tak ako v plynnej aj v kvapalnej forme. Práve pre väčšie vzdialenosti je možnosť distribúcie vodíka diaľkovými plynovými potrubiami, ktoré sú dostatočne

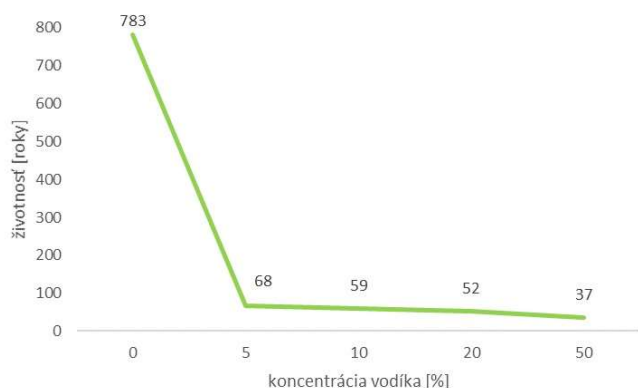
rozvinuté v každej ekonomicky vyspelejšej krajine. Zatiaľ čo na prepravu na kratšie a stredné vzdialenosti, do približne 500 km, je ekonomicky výhodnejší transport vodíka vo kvapalnej alebo hybridnej forme.

2.3.1 Transport v forme plynu

Z energetického hľadiska je potrebné 3 – krát väčšie množstvo vodíka na prenos rovnaké množstva energie ako v prípade zemného plynu. [8] Je to spôsobené menšou výhrevnosťou, ktorou disponuje vodík. Napriek tomu existuje predpoklad na prenášanie rovnakého množstva energie, rovnakým potrubím, pretože kapacita potrubia na prenášanie energie závisí od hustoty plynu, kde množstvo prenášanej energie je úmerné druhej odmocnине hustoty plynu. Vodík má 9 – násobne menšiu hustotu ako práve zemný plyn, ide o kompenzačný faktor. Problém nastáva pri tlakoch väčších ako 5,6 MPa, kde výhrevnosť zemného plynu vzrastie a nedokážeme vodíkom nahradiť množstvo prenášanej energie. [8]

Náklady spojené s transportom vodíka v plynnej forme sú spojené s objemom a množstvom použitých kompresorov. Keďže výberom vhodného toku plynu, turbulentným tokom, vieme zabezpečiť transport až 280 % objemu vodíka voči zemnému plynu, čo predstavuje približne 95 % energetického ekvivalentu. [8]

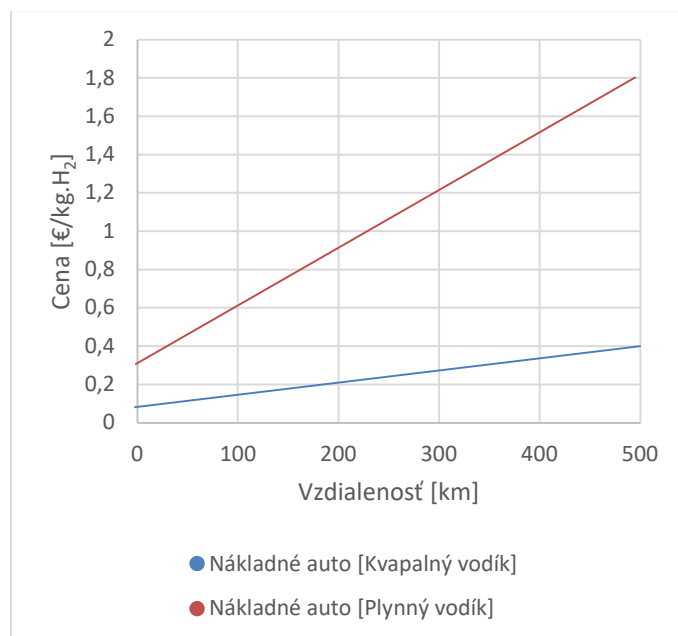
Ďalší z problémov vzniká vodíkovým krehnutím. Ide o jav kedy pomocou difúzie prenikajú častice vodíka do štruktúry materiálu a spôsobujú jeho krehnutie. Tento jav sa zintenzívňuje zvyšovaním tlaku, koncentrácie vodíka a teploty. Ide o nežiadúci jav, ktorý spôsobuje vyššie investičné náklady na transport vodíka potrubím. Na Obr. 3 môžeme vidieť ako vyššia koncentrácia vodíka ovplyvňuje životnosť ocelových potrubí triedy X80. [5]



Obr. 3. Vplyv koncentrácie vodíka na životnosť aktuálne využívaných potrubí [5]

2.3.2 Transport vo forme kvapaliny

Transport v kvapalnej forme, napriek energetickým stratám v podobe potreby dochladzovania zásobníku je ekonomicky výhodnejší a to najmä vďaka potrebe menšieho zásobníka ako v prípade plynnej formy, vid' Obr. 4.



Obr. 4. Finančné náklady dopravy na kratšie vzdialenosti
Údaje z: [6]

Pretože na prenesenie rovnakého množstva energie vodíkom v porovnaní so zemným plynom je potrebné 3 – krát väčšie množstvo vodíka tým vzniká potreba väčších zásobníkov čo spôsobuje vyššie finančné náklady. [8] Pre porovnanie veľkosti zásobníkov, vid' Tab. 3 potrebných na transport energie som vychádzal z tabuľkových hodnôt hustoty a energetickej hustoty vodíka v rôznych formách, a zemného plynu.

Tab. 3. Porovnanie veľkosti zásobníkov, kde energetická hustota predstavuje množstvo energie, ktoré je možné uskladniť na meter kubický. Vypočítaný objem je potrebný na uskladnenie energie o veľkosti 1 kWh

Forma sklad.	Hustota [kg/m³]	Energ. hustota [MJ/m³]	Energ. hustota [kWh/m³]	Objem [m³]	Objem [l]
Plyný vodík	0,09	10	2,78	0,36	359,712
Plyný vodík pri tlaku 30 MPa	22,5	2 700	750	0,0013	1,33
Kvapalný vodík	71,9	8 700	2 416,67	0,000414	0,41
Zemný plyn	0,668	37,4	10,39	0,096	96,25
Metanol	0,79	17 000	4 722,22	0,000212	0,21

2.4 Využitie vodíka

Využitím vodíka najmä v oblasti energetiky a ako paliva má za úlohu nahradiť fosilne palivá a tak zabezpečiť prechod k ekologicky menej závadnému spôsobu výroby elektriny, tepla alebo pohonnej látky.

2.4.1 Využitie v energetike

S výraznou snahou o dekarbonizáciu výroby elektrickej energie by mohol byť vhodným pomocníkom práve vodík. Kde zelený vodík má potenciál uskladniť 4 až 20 % energie produkovanej z obnoviteľných zdrojov. [2] S pribúdajúcimi zdrojmi obnoviteľnej energia rastie taktiež aj potenciál využitia vodíka na uskladňovanie energie.

Vodík môže byť použitý ako médium v termomechanických cykloch pomocou Carnotovej turbíny. Keďže pri spaľovaní vodíka s kyslíkom neprodukuje CO_2 . V prípade ak by sme vodík spaľovali so vzduchom, na každý mól vodnej pary vzniká 1,88 mólu dusíka, ktorý absorbuje časť tepelnej energie. [8] Teda pri spaľovaní vodíka so vzduchom sa dosahuje nižšia spaľovacia teplota a účinnosť kompletného cyklu akumulácie energie je nižšia.

S využitím vodíka je možné uvažovať aj na výrobu tepla. Vodík v porovnaní so zemným plynom má vyššiu teplotu plameňa (2400 K) [8], vyššiu rýchlosť horenia a je potrebná nižšia energia na zapálenie plameňa. Avšak zvýšením teploty treba rátať s technológiou, ktorá je schopná odolávať zvýšeným teplotám. Ďalšou z nevýhod je už spomenuté potrebné trojnásobne väčšie množstvo vodíka ako zemného plynu na výrobu rovnakého množstva tepla. V aktuálnom období vodík ako samostatný zdroj tepla sa nevyužíva. Vodík sa primiešava do potrubí zemného plynu.

2.4.2 Palivové články

Ide o elektrochemické systémy, v ktorých chemická energia paliva sa pomocou oxidačného procesu premieňa na elektrickú. Straty spôsobené na týchto zariadeniach sú spojené so vznikajúcim nízkopotenciálovým teplom. Celková účinnosť takéhoto systému závisí od aktivačného nadpätia elektród, ohmického a koncentračného nadpätia.

Palivové články v porovnaní s Cartonovým cyklom, majú väčšiu účinnosť po teplotu 800 °C. [1] Zväčšujúcou teplotou rovnovážne kyslíkovo-vodíkové napätie klesá a tým z termodynamického hľadiska klesá aj účinnosť, v závislosti od použitého palivového článku. Palivové články aktuálne ako veľkokapacitná výroba elektrickej energie nepredstavujú riešenie, vzhľadom na ich množstvo vyrobenej elektrickej energie. Naopak sa skôr uplatňujú ako zdroj jednosmerného elektrického prúdu pre elektromotor.

2.5 SWOT analýza

Ide o komplexné zhodnotenie vnútorných a vonkajších faktorov. Ako silné stránky SWOT analýzy môžeme považovať jednoduchosť, prehľadnosť a komplexnosť.

Základné delenie SWOT analýzy predstavujú vnútorné a vonkajšie faktory. Medzi vnútorné faktory delíme:

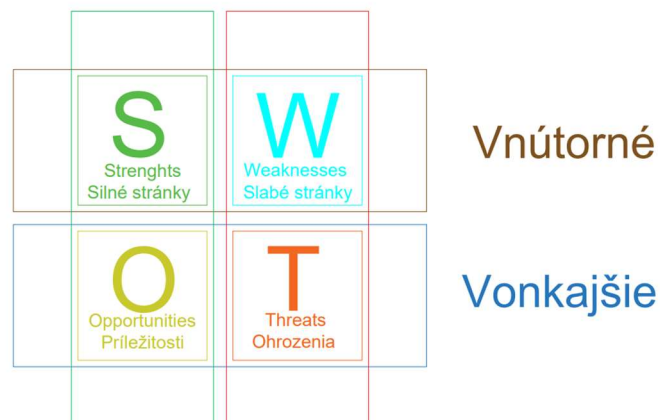
- S (Strenghts – Silné stránky)
- W (Weaknesses – Slabé stránky)

Vnútorné faktory priamo súvisia s produktom, v tomto prípade priamo s vodíkom.

Vonkajšie faktory, ktoré delíme na:

- (Opportunities – Príležitosti)
- T (Threats – Ohrozenia)

Vonkajšie faktory sú ovplyvňované investíciami a trhom.



Obr. 5. Schéma SWOT analýzy

Výsledkom tohto príspevku je spracovanie práve spomenutej SWOT analýzy pre popísané vodíkové hospodárstvo. Konkrétne silné stránky, slabé stránky, príležitosti a ohrozenia sú uvedené v Tab. 4. V Tab. 5 sú uvedené vzájomné pôsobenia jednotlivých vlastností. Bodovanie v tejto matici sa pohybuje v škále -5 až 5. Kde hodnota -5 predstavuje najviac negatívny vzájomný vplyv a hodnota 5 naopak, najviac pozitívny vzájomný vplyv.

3 Záver

Vypracovaním SWOT analýzy som posúdil nasledujúce:

Najvýraznejšou silnou stránkou je S2 (Využitie OZE pri výrobe – elektrolyza vody, termochémické cykly), kde hneď za ňou nasleduje S1 (Spôsob akumulácie, ktorý nemá negatívny dopad na životné prostredie – v závislosti od spôsobu výroby). V stratégii je najvhodnejšie sa zamerať na tieto silné stránky a zabezpečiť zníženie ohrozenia T4 a T5. Ohrozenie T4 (Konkurencia v podobe lacnejších alternatívnych zdrojov energie) je možné potlačiť práve zvýšením výrobných procesov vodíka z OZE, prípadných termochémických cyklov. Následne ohrozenie T5 (Nedostatočná informovanosť širokej verejnosti) je možné potlačiť prednáškami, rôznymi diskusiami, letákmi a celkovou propagáciou vodíkoveho hospodárstva zameraním sa na inštitúcie v oblasti prepravy a výroby energie. Toto ohrozenie je taktiež možné potlačiť viacerými článkami, ktoré by boli uverejňované v rôznych denníkoch a tým zvýšiť povedomie o možnom bezpečnom spôsobe využívania vodíka. Pretože aj z vlastnej skúsenosti som zistil, že každá debata s laikom o vodíku, narazila na rovnaké témy bezpečnosť, nedostatočná rozvinutosť (čerpacie stanice) a finančná náročnosť.

Najslabšími stránkami vodíka sú W2 (Kvôli nižšej výhrevnosti vodíka v porovnaní so zemným plynom, je

potrebné 3 – krát väčšie množstvo vodíka na prenos rovnakého množstva energie) a W4 (Energetická náročnosť skladovania – skvapalňovanie, stláčanie plynu). So slabou stránkou W2 súvisí práve príležitosť O4 (Možnosť využitia vyčerpaných podzemných zásobníkov zemného plynu). Kde práve tieto ložiská sa ponúkajú ako veľkokapacitné úložiská vodíka. Z energetického hľadiska ide aktuálne o náročný proces v ktorom dochádza k stratám energia najmä pri procese uskladňovania vodíka. Pri stláčaní vodíka na 350 barov je potrebných približne 15 – 20 % energie obsiahnutej v palive, v prípade skvapalňovania je potrebných až 30 – 40 %. V hydridnom type skladovania je táto hodnota ovplyvnená použitím nosičom na ktorý sa vodík viaže. Napriek vyššej energetickej náročnosti skladovania, pozitívne vplývajú príležitosti O2 (Energetická nezávislosť – závislosť od dovozu komodít sa zníži) a O5 (Zníženie cenových výkyvom komodít), kde závislosť od dovozu fosílnych palív z iných krajín by klesala.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0157 Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií.

Literatúra

- [1] PETRÁŠ B. – BRESTOVIČ T. 2007 Palivový článok – zdroj energie. Technická univerzita Košice. Strojnícka fakulta
- [2] Národná vodíková asociácia [ONLINE]. 2022.
- [3] FRANCHI G. – CAPOCELLI M. – DE FALCO M. – PIEMONTE V. – BARBA D. 2022. Hydrogen production via steam reforming: a critical analysis of MR and RMM technologies. p. 1. Introduction
- [4] OGDEN M. J. 2020. Hydrogen Infrastructure Capital Costs Compared with Those for Methanol, Gasoline, and Synthetic Middle Distillates p. 262
- [5] OLEJ V. 2020. Úskalia prepravy vodíka plynárenskou infraštruktúrou.
- [6] VARGAS-SALGADO C. – BERNA C. – ALFONSO-SOLAR. – ESCRIVÁ A. 2022. Hydrogen Production from Surplus Electricity Generated by an Autonomous Renewable System: Scenario 2040 on Grand Canary Island, Spain. p. 12
- [7] Hassanpouryouzband, A., Joonaki, E., Edlmann, K. *et al.* Thermodynamic and transport properties of hydrogen containing streams. *Sci Data* 7, 222 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0568-6>
- [8] BALAJKA J. 1982. Vodík a iné nové nosiče energie
- [9] NATIONALGRID. [ONLINE] 2022. The hydrogen colour spectrum

Tab. 4. Kritéria SWOT analýzy

	S – Silné stránky		W – Slabé stránky		O – Príležitosti		T – Ohrozenia
S1	Spôsob akumulácie, ktorý nemá negatívny dopad na životné prostredie – v závislosti od spôsobu výroby	W1	Vodík vďaka svojim vlastnostiam a vysokej difúzií spôsobuje vodíkové krehnutie materiálu	O1	Vznik nových pracovných pozícií – ide o novú technológiu, ktorá si vyžaduje nových ľudí s odborným vzdelaním	T1	Zvýšenie nebezpečnosti príchodom nových technológií a výbušnosťou vodíka
S2	Využitie OZE pri výrobe – elektrolýza vody, termochemické cykly	W2	Kvôli nižšej výhrevnosti vodíka v porovnaní so zemným plynom, je potrebné 3 – krát väčšie množstvo vodíka na prenos rovnakého množstva energie	O2	Energetická nezávislosť – závislosť od dovozu komodít sa zníži	T2	Vysoké vstupné investície, potreba školenia personálu
S3	Spomalenie poklesu Zemných zásob fosílnych palív (ropa, zemný plyn)	W3	Vysoké finančné náklady na výrobu vodíka	O3	Zníženie znečistenia životného prostredia – v závislosti od spôsobu výroby (zelený vodík)	T3	Aktuálne nedostatočne rozvinutá infraštruktúra
S4	Nový nosič energie – nižšia závislosť na fosílnych palivách	W4	Energetická náročnosť skladovania – skvapalňovanie, stláčanie plynu	O4	Možnosť využitia vyčerpaných podzemných zásobníkov zemného plynu	T4	Konkurencia v podobe lacnejších alternatívnych zdrojov energie
S5	Budovanie čerpacích	W5	Nízka účinnosť	O5	Zníženie cenových	T5	Nedostatočná

staníc, vodíkového hospodárstva	palivových článkov, potreba zabezpečiť technológiu na zvýšenie účinnosti	výkyvom komodít	informovanosť širokej verejnosti
---------------------------------	--	-----------------	----------------------------------

Tab. 5. Porovnávací matica

		Interné faktory												
		S - Silné stránky						W - Slabé stránky						
Kľúčové externé faktory	O - Príležitosti T - Ohrozenia	S1	S2	S3	S4	S5	Súčet hodnotenia O,T/S	W1	W2	W3	W4	W5	Súčet hodnotenia O,T/W	Výsledné hodnotenie
	O1	0	5	3	5	5	18	4	2	-2	3	3	10	28
	O2	2	5	3	5	3	18	2	3	3	5	4	17	35
	O3	5	5	3	3	3	19	3	2	4	3	3	15	34
	O4	3	0	-4	2	1	2	1	4	3	1	0	9	11
	O5	1	3	2	5	1	12	3	1	5	4	4	17	29
	T1	0	-2	-4	-4	-2	-12	-5	-3	0	-4	0	-12	-24
	T2	-1	-2	-4	-5	-3	-15	-3	-2	-5	-3	-5	-18	-33
	T3	0	-1	-2	-3	-5	-11	-1	-3	-5	0	-3	-12	-23
	T4	-5	-5	-5	-5	-5	-25	-4	-5	-4	-4	-3	-20	-45
	T5	-5	0	-2	-2	-1	-10	-3	2	-3	0	-3	-7	-17
Súčet hodnotenia S,W		0	8	-10	1	-3	-4	-3	1	-4	5	0	-1	-5
Váha S / W		35	25	15	15	10	/	15	25	20	30	10		

Výpočet parametrov verejného osvetlenia na komunikáciách nepravidelného tvaru

Bc. Gergely Fekete, prof. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.

¹ FEI STU v Bratislave

² Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

xfeketeg@stuba.sk

Táto práca sa zaoberá tézami metodiky CIE140-2019, resp. STN EN 13201-3, ktoré opisujú výpočet parametrov verejného osvetlenia. Výpočty sú spracované v programe Dialux 4.13. Práca poukazuje na rozdielne výsledky pri rôznych metódach.

1 Úvod

V dnešnej dobe sa verejné osvetlenie stalo neoddeliteľnou časťou každodenného života. Štruktúra verejného osvetlenia sa skladá okrem vozovky aj z parkovacích pruhov, chodníkov, zeleného pásu a chodníku. Pri návrhu je potrebné vytvoriť bezpečné prostredie, keďže väčšina z nás sa cíti v nebezpečí v tme, a zlepšiť viditeľnosť pre všetkých účastníkov cestnej premávky. Na návrh verejného osvetlenia existuje viacero programov. Jeden z najpoužívanejších je Dialux, v ktorom je možné navrhnuť dvomi spôsobmi vonkajšiu scénu osvetlenia. V práci sa zaoberáme len výpočtom osvetlenosti a rovnomernosťou osvetlenia.^[2]

2 Výpočty na modeloch

Podľa normy EN 13201-2 je možné vypočítať 4 hodnoty osvetlenosti:

- Horizontálna osvetlenosť;
- Vertikálna osvetlenosť;
- Polvalcova osvetlenosť;
- Polgul'ová osvetlenosť.

V tejto práci skúmame hodnoty horizontálnej osvetlenosti. Na výpočet tejto osvetlenosti všetky merané body musia byť v rovine vozovky. Pre hodnotu osvetlenosti platí vzťah:

$$E_{h,m} = \sum \frac{I_k(C, \gamma) * \cos^3 \varepsilon * f_M}{H^2} \quad (1)$$

kde $I_k(C, \gamma)$ je svietivosť k-tého svietidla, ε je uhol dopadu svetla na vypočítaný bod, f_M je celkový udržiavací činiteľ a H určuje výšku svietidla.^[5]

Udržiavací činiteľ sa počíta z tabuľkových hodnôt z nasledujúceho vzťahu:

$$f_M = f_{LLM} * f_{LS} * f_{LM} * f_{RSM} \quad (2)$$

kde hodnota f_{LLM} je činiteľ starnutia svetelných zdrojov, f_{LS} činiteľ funkčnej spoľahlivosti svetelných zdrojov, f_{LM} je činiteľ

znečistenia svietidiel a f_{RSM} je činiteľ znečistenia povrchov miestnosti.^[5]

Pre výpočty najpriaznivejšie je, keď $f_M = 1$.

Ďalšou skúmanou veličinou je rovnomernosť osvetlenia. Tento kvantitatívny parameter osvetlenia sa počíta na porovnávacej rovine s dodržaním požiadaviek stanovené normou EN 13201-2 zo vzťahu:

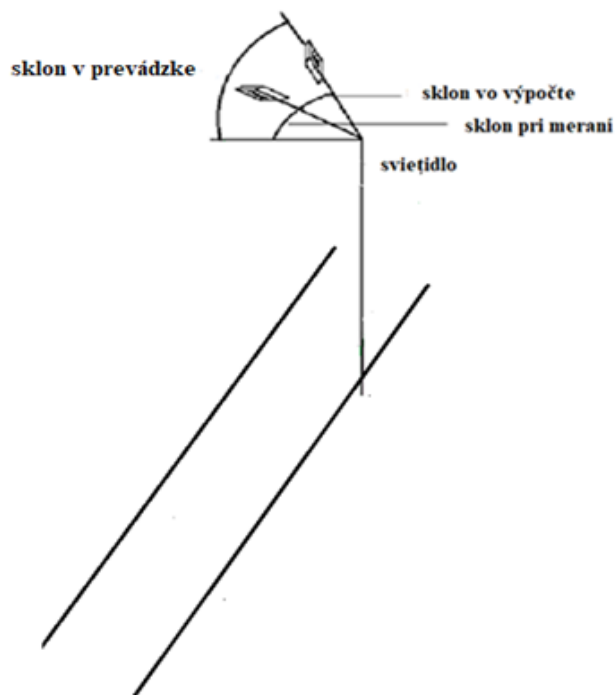
$$U_o = \frac{E_{min}}{E_{av}} \quad (3)$$

kde E_{min} je minimálna hodnota osvetlenosti a E_{av} je priemerná hodnota osvetlenosti.^[4]

V programe Dialux 4.13 existuje 2 druhy výpočtu na verejné osvetlenie:

- Vonkajšia scéna;
- Verejné osvetlenie.

Program Dialux na výpočet používa bodovú metódu. Táto metóda sa používa na výpočet intenzity osvetlenia v konkrétnom bode. Výpočet sa vykonáva pre všetky body a výsledky sa zosumarizujú.^[3]



Obr. 1– Spôsob uloženia svetelného stožiaru na okraji vozovky
^[1]

Na Obr. 1 je znázornený spôsob uloženia svietidla na stožiar (sklon a dĺžka ramena, vzdialenosť od vozovky).

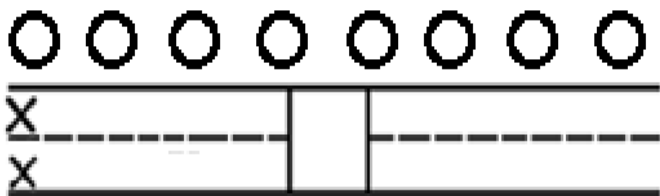
2.1 Metódy výpočtu

V tejto práci sme porovnali 3 metódy výpočtu verejného osvetlenia:

1. Metóda č.1 - *Verejné osvetlenie*, podľa normy CIE 140:2019 / STN 13201-3;
2. Metóda č.2 - *Vonkajšia scéna*, podľa metódy č.1;
3. Metóda č.3 - *Vonkajšia scéna*, rozloženie svetelných stožiarov podľa skutočnej polohy.

V metóde č.1 a 2 do výpočtu sú započítané svietidlá v minimálnej vzdialenosti 5H (5*výška stožiara) z každej strany výpočtových bodov a v maximálnej vzdialenosti 12H od pozorovateľa.

Každá skúmaná ulica je dvojpruhová komunikácia s jednostrannou osvetľovacou sústavou, kde svetelné stožiare majú rovnakú výšku. Všeobecné znázornenie modelov je znázornené na Obr. 2.



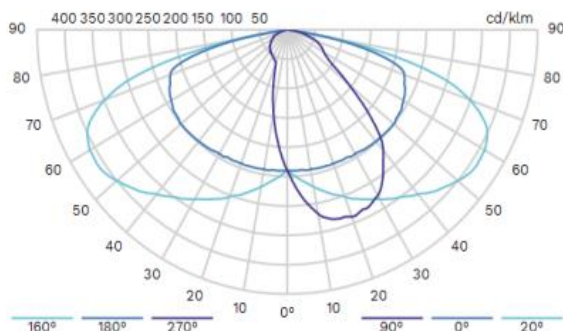
Obr. 2– Poloha svietidiel vo výpočte ^[1]

2.2 Modely ulíc

Výpočty sme zrealizovali na štyroch uliciach s rôznym tvarom a dĺžkou z mesta Spišská Nová Ves:

- Odbočka do vnútroblokov z čsl. Armády;
- Mudroňova ulica;
- I. Stodolu;
- Gorazdova ulica.

Sklon ramena svetelného stožiara je 0°. Udržiavací činiteľ pri všetkých výpočtoch je nastavený na 0,83.



Obr. 3 – Krivky svetivosti používaného svietidla

Na Obr. 4,5,6 a 7 sú znázornené pôdorysy ulíc pre jednotlivé metódy a sú usporiadané podľa nasledujúcej logiky:

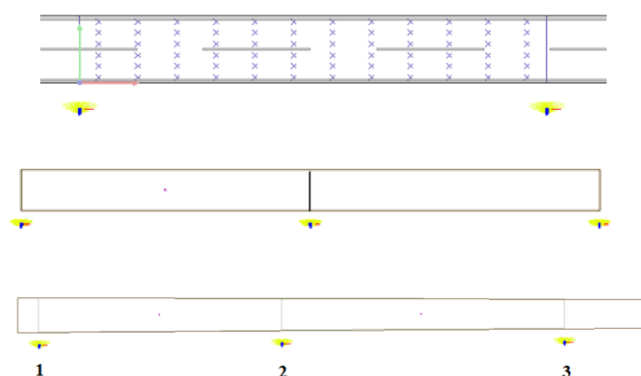
- horný pôdorys patrí k metóde č.1;
- stredný pôdorys patrí k metóde č.2;
- dolný pôdorys patrí k metóde č.3.

2.3 Odbočka do vnútroblokov z čsl. Armády

Táto ulica bola vybraná kvôli jej dĺžke, keďže je krátka, celková šírka sa po jej dĺžke nemení a vzdialenosti medzi svetelnými stožiarimi sú približne rovnaké.

Pre metódu 1 a 2 výpočtová plocha je 35 m dlhá 5 m široká. Svetelný bod je uložený do výšky 6,89 m. Svetelný stožiar je od vozovky 4 m, dĺžka ramena je 2 m. Pre metódu 3 sú nastavené podľa katastrálnej mapy šírka vozovky na 4,36 a dĺžka 77,53 m.

Používané svietidlo pre celý úsek je SCHREDER VOLTANA 2/5102/16 LED 700 mA, 39,1W.



Obr. 4– Ulica čsl. Armády

Tab. 1 - Porovnanie hodnôt osvetlenosti a rovnomernosti osvetlenia pre ulicu čsl. Armády. ^[1]

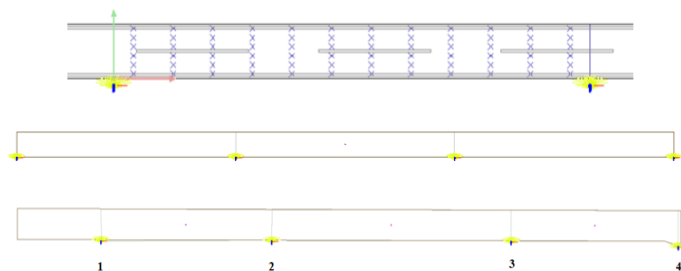
Metóda	Výpočtová plocha	E_{av} [lx]	U_o
1	Celá	6,44	0,35
2	Celá	6,58	0,32
3	Celá	8,71	0,29
	2-3	7,63	0,34

2.4 Mudroňova ulica

Táto ulica je špecifická tým, že má nepravidelnú geometriu a obsah výpočtových plôch je rôzny (v intervale 97 a 135 m²).

Pre metódu 1 a 2 výpočtová plocha je 34 m dlhá 3,5 m široká. Svetelný bod je uložený do výšky 5,91 m. Svetelný stožiar je od vozovky 2 m, dĺžka ramena je 1,5 m. Pre metódu 3 sú nastavené podľa katastrálnej mapy šírka vozovky na 4,95 a dĺžka 94,51m.

Používané svietidlo pre celý úsek je SCHREDER VOLTANA 2/5102/8 LED 700 mA, 18,9 W.



Obr. 5 – Mudroňova ulica

Tab. 2 - Porovnanie hodnôt osvetlenosti a rovnomernosti osvetlenia pre ulicu Mudroňova

Metóda	Výpočtová plocha	E_{av} [lx]	U_o
1	Celá	5,01	0,21
2	Celá	4,92	0,19
3	Celá	6,17	0,15
	2-3	4,93	0,19

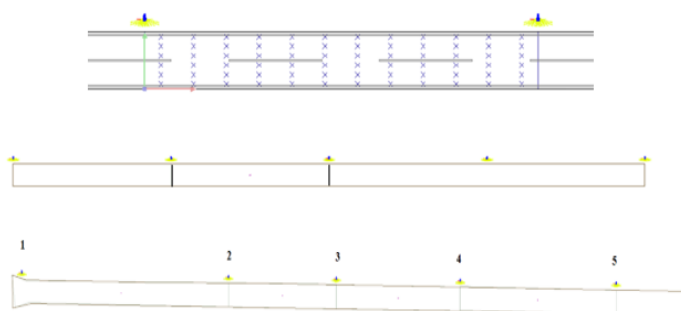
2.5 I. Stodolu

Táto ulica reprezentuje klasickú mestskú ulicu s oceľovými stožiarmi a s meniacou sa šírkou a dĺžkou jednotlivých výpočtových plôch.

Dĺžka výpočtovej plochy je pri metóde č. 1 a č. 2 34 m a šírka 4,5 m. Svetelný bod je uložený do výšky 7,391 m. Svetelný stožiar je vzdialený od vozovky 1m a dĺžka ramena je 2 m. Pri metóde č. 3 je dĺžka ulice 174,59 m a celková šírka je 6,38 m.

Na tejto ulici sme skúmali výpočtovú plochu s meniacou sa šírkou v intervale <4,12 m; 6,38 m>.

Pre účel výpočtu sme používali svietidlá SCHREDER VOLTANA 2/5102/16 LED 500 mA, 26 W.



Obr. 6 – Ulica I. Stodolu

Tab. 3 - Porovnanie hodnôt osvetlenosti a rovnomernosti osvetlenia pre ulicu I. Stodoly

Metóda	Výpočtová plocha	E_{av} [lx]	U_o
1	Celá	6,03	0,33
2	Celá	6,06	0,28
3	Celá	5,56	0,06
	3-4	6,46	0,29

2.6 Gorazdova ulica

Pre metódu 1 a 2 výpočtová plocha je 42 m dlhá 4,5 m široká. Svetelný bod je uložený do výšky 7,89 m. Svetelný stožiar je od vozovky 2m, dĺžka ramena je 1,5 m. Pre metódu 3 sú nastavené podľa katastrálnej mapy šírka vozovky na 6,57 m a dĺžka 319,88 m.

Používané svietidlo pre celý úsek je SCHREDER VOLTANA 2/5102/16 LED 500 mA, 26 W.



Obr. 7 – Gorazdova ulica

Tab. 4 - Porovnanie hodnôt osvetlenosti a rovnomernosti osvetlenia pre ulicu Gorazdova

Metóda	Výpočtová plocha	E_{av} [lx]	U_o
1	Celá	6,03	0,33
2	Celá	6,06	0,28
3	Celá	5,56	0,06
	3-4	6,46	0,29

2.7 Porovnanie výsledkov

Vypočítané hodnoty jednotlivými metódami sme porovnali medzi sebou a do porovnania sme pridali aj výpočty na modeloch celých dĺžok ulíc podľa svetelného passportu. Rozdiely medzi výsledkami sú vyjadrené v percentách.

Tab. 5 – Percentuálny rozdiel vypočítaných hodnôt na Ulici čsl. Armády

Výpočtová plocha	E_{av}	U_o
Metóda č. 1 – Metóda č. 2	2,1%	8,6%
Metóda č. 1 - Metóda č. 3 celá	26,9%	17,1%
Metóda č. 1 – Metóda č. 3 čiastočná	15,6%	2,9%
Metóda č. 2 – Metóda č. 3 celá	25,3%	9,4%
Metóda č. 2 - Metóda č. 3 čiastočná	13,8%	5,9%
Metóda č. 3 celá - Metóda č. 3 čiastočná	13,4%	14,7%

Tab. 6 – Percentuálny rozdiel vypočítaných hodnôt na Mudroňovej ulici

Výpočtová plocha	E_{av}	U_o
Metóda č. 1 – Metóda č. 2	2,2%	9,5%
Metóda č. 1 - Metóda č. 3 celá	18,5%	28,6%
Metóda č. 1 – Metóda č. 3 čiastočná	2,0%	8,1%
Metóda č. 2 – Metóda č. 3 celá	20,3%	21,1%
Metóda č. 2 - Metóda č. 3 čiastočná	0,2%	1,6%
Metóda č. 3 celá - Metóda č. 3 čiastočná	20,1%	22,3%

Tab. 7 – Percentuálny rozdiel vypočítaných hodnôt na Ulici I. Stodolu

Výpočtová plocha	E_{av}	U_o
Metóda č. 1 – Metóda č. 2	0,5%	15,2%
Metóda č. 1 - Metóda č. 3 celá	7,8%	81,8%
Metóda č. 1 – Metóda č. 3 čiastočná	6,7%	12,1%
Metóda č. 2 – Metóda č. 3 celá	8,3%	78,6%
Metóda č. 2 - Metóda č. 3 čiastočná	6,2%	3,4%
Metóda č. 3 celá - Metóda č. 3 čiastočná	13,9%	79,3%

Tab. 8 – Percentuálny rozdiel vypočítaných hodnôt na Gorazdovej ulici

Výpočtová plocha	E_{av}	U_o
Metóda č. 1 – Metóda č. 2	1,8%	10,3%
Metóda č. 1 - Metóda č. 3 celá	13,4%	79,1%
Metóda č. 1 – Metóda č. 3 čiastočná	2,3%	9,1%
Metóda č. 2 – Metóda č. 3 celá	15,0%	76,7%
Metóda č. 2 - Metóda č. 3 čiastočná	4,1%	1,3%
Metóda č. 3 celá - Metóda č. 3 čiastočná	11,3%	77,0%

3 Záver

Pri porovnaní percentuálnych rozdielov medzi metódami č. 1 a č. 2 sme zistili, že rozdiel výsledkov priemernej osvetlenosti je maximálne 2,2%. Percentuálne rozdiely výsledkov pre hodnoty rovnomernosti osvetlenia boli takmer 8 krát vyššie, najväčší rozdiel je 15,2% pri skúmanej ulici I. Stodolu (Tab. 7). Rozdiely medzi vypočítanými hodnotami vznikli z dôvodu, že pri výpočte boli používané rôzne metódy výpočtu.

Medzi metódami č. 1 a č. 3 (celý úsek) boli rozdiely vypočítaných hodnôt výraznejšie, najväčšie boli rozdiely pri priemernej osvetlenosti s hodnotou 26,9 % pri Ulici čsl. Armády (Tab. 6), rozdiel rovnomernosti osvetlenia je výraznejší s hodnotou 81,8% (Tab. 7). Tieto rozdiely sú spôsobované umiestnením svetelných stožiarov, keďže pri Metóde č. 3 (celý úsek) vzdialenosti jednotlivých svetelných stožiarov sú príliš veľké pri porovnaní uložení pri Metóde č.1. Šírky výpočtovej plochy boli tiež rozdielne, keďže pri Metóde č. 3 sa tvar plochy menil.

Percentuálny rozdiel vypočítaných hodnôt medzi metódou č. 1 a č. 3 (úsek s veľkosťou plochy najbližšou k veľkosti úseku pri prvých dvoch metódach) pri veličine E_{av} bol 15,6% (Tab. 6) a pre rovnomernosť osvetlenia 12,1% (Tab .8).

Z výsledkov výpočtu sa nám potvrdilo, že rozdiely hodnôt medzi jednotlivými výpočtovými metódami s rovnakými parametrami nie je v praxi výrazný, ale pri zmene výpočtovej plochy, čo sa týka šírky, dĺžky alebo tvaru, sa rozdiely zvýšia nad prijateľnú úroveň.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0157 Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií.

Literatúra

- [1] INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION. CIE 140: 2019 Road lighting calculations. . 2019. ISBN 978-3-902842-56-5.
- [2] LUCIA CHOCHLÍKOVÁ Kvalita osvetlenia a jej vplyv na naše zdravie. In [online]. 2014. [cit. 2022-06-02]. Dostupné na internete: <<https://freyled.com/blog/kvalita-osvetlenia-a-jej-vplyv-na-nase-zdravie>>.
- [3] SOKANSKÝ, K. et al. Světelná technika. . Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] Čo je rovnomernosť osvetlenia. In OAK LED Co. Limited [online]. 2019. [cit. 2022-06-03]. Dostupné na internete: <<http://sk.oakled.com/info/what-is-uniformity-of-illuminance-39647178.html>>.
- [5] STN EN 13201-3: 2018. Osvetlenie pozemných komunikácií Časť 3: Svetelnotechnický výpočet. . 2018. .

Stanovenie hodnoty elektrotechnických a energetických zariadení

Matej Rolko

¹ Ústav elektrotechniky a elektroenergetiky FEI STU

rolko.matej02@gmail.com

1. Úvod

Návrh na nové triedenie elektrotechnických a energetických zariadení (ich definícia a zdôvodnenie nového triedenia) pre účely stanovenia všeobecnej hodnoty. Cieľom mojej práce je oboznámiť vás s aktuálnym stavom posudzovania a hodnotenia elektrotechnických a energetických zariadení.

Téma je obzvlášť aktuálna vzhľadom na súčasný turbulentný vývoj cien energií na trhu ale aj rast inflácie ktorá negatívne vplyva na ceny tovarov a služieb na Slovensku. Správny prístup k posudzovaniu hodnoty týchto zariadení umožní orientovať sa v cenových ponukách, správne zaradiť zariadenia do účtovnej evidencie a správne posudzovať a hodnotiť výberové konania na výstavbu, realizáciu, predaj a kúpu elektrotechnických a energetických zariadení tak aby nedochádzalo k špekulatívnemu správaniu sa jednotlivých účastníkov trhu.

Základom v súčasnej dobe je vyhláška ministerstva spravodlivosti Slovenskej republiky č. 492/2004 Z. z. na základe ktorej sa v súčasnosti stanovuje všeobecná hodnota týchto zariadení.

2. Aktuálna legislatíva

Metodika určuje postup pri stanovení hodnoty majetku v súlade s platnou legislatívou a zákonom č. 250/2012 Z. z. o regulácii v sieťových odvetviach v znení neskorších predpisov, zákonom č. 251/2012 Z. z. o energetike a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov, zákonom č. 382/2004 Z. z., Vyhláškami Ministerstva práce sociálnych vecí a rodiny SR, vyhláškami Ministerstva spravodlivosti a vyhláškami Úradu pre reguláciu sieťových odvetví:

- č. 2/2013 Z. z., ktorou sa ustanovujú postupy a opatrenia týkajúce sa uchovávaní údajov, forma a obsah uchovávaných údajov,
- č. 3/2013 Z. z., ktorou sa ustanovuje spôsob, rozsah a štruktúra poskytovania meraných údajov o spotrebe na odbernom mieste odberateľa elektriny a ich uchovávanie,
- č. 4/2013 Z. z., ktorou sa ustanovuje spôsob, rozsah a štruktúra poskytovania meraných údajov o spotrebe na odbernom mieste odberateľa plynu a ich uchovávanie,
- č. 24/2013 Z. z., ktorou sa ustanovujú pravidlá pre fungovanie vnútorného trhu s elektrinou a

pravidlá pre fungovanie vnútorného trhu s plynom v znení neskorších predpisov

- č. 450/2022 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia dodávky plynu
- č. 233/2022 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia v elektroenergetike a niektoré podmienky vykonávania regulovaných činností v elektroenergetike v znení neskorších predpisov
- č. 144/2015 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia v tepelnej energetike v znení neskorších predpisov.
- 283/2012 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia za dodávku elektriny malému podniku,
- 285/2012 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia za dodávku plynu malému podniku,
- č. 508/2009 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti na zaistenie bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci s technickými zariadeniami tlakovými, zdvihačmi, elektrickými a plynovými a ktorou sa ustanovujú technické zariadenia, ktoré sa považujú za vyhradené technické zariadenia v znení neskorších predpisov
- č. 18/2017 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia v elektroenergetike a niektoré podmienky vykonávania regulovaných činností v elektroenergetike.

3. Súčasný postup pri stanovení všeobecnej hodnoty elektrických a elektroenergetických zariadení

3.1. Základná amortizácia

Základná amortizácia je mierou skutočného fyzického opotrebenia ohraničená časovým intervalom uvedenia zariadenia do prevádzky. Skôr ako sa začne stanovovať základná amortizácia je potrebné určiť skutočný počet odpracovaných rokov, technickú životnosť zariadenia a zostatkové percento prevádzkyschopnosti.

Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$ZA = \left(\frac{100 - ZO}{\dot{Z}} \right) [\%] \quad (1)$$

Kde r – počet odpracovaných rokov [roky], ZO – zostatkové percento prevádzkyschopnosti EZ [%], $\hat{Z}$ – prognózovaná technická životnosť EZ [roky],

Základnou podmienkou na použitie tohto vzťahu je: $r \leq \hat{Z}$. V prípade, že zariadenie je v prevádzke dlhšiu dobu, ako je prognózovaná technická životnosť, t. j. $r > \hat{Z}$, základná amortizácia sa vypočíta podľa vzťahu:

$$ZA = VTS - ZO \quad [\%] \quad (2)$$

Kde VTS – východiskový technický stav EZ [%]

3.2. Technický stav

Technický stav je reálny – skutočný technický stav zariadenia stanovený k rozhodujúcemu dátumu, zodpovedajúci základnej amortizácii určenej pre skutočnú dobu prevádzky zariadenia, priamoúmerný spôsobu prevádzky a morálnemu opotrebeniu zariadenia.

Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$TS = (VTS - ZA) \cdot \left(1 + \frac{\pm Z}{100}\right) \cdot k_{MO} \quad [\%] \quad (3)$$

Kde TS – technický stav EZ [%], VTS – východiskový technický stav EZ [%], ZA – základná amortizácia EZ [%], Z – zmena technického stavu EZ [%], k_{MO} – koeficient morálneho opotrebenia

Koeficient morálneho opotrebenia môže dosahovať hodnoty z intervalu (0; 1>

3.3. Technická hodnota

Technická hodnota je peňažným vyjadrením technického stavu hodnoteného zariadenia.

Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$TH = \frac{TS \cdot VH}{100} \quad [€] \quad (4)$$

Kde TH – technická hodnota, TS – Technický stav EZ stanovený k rozhodujúcemu dátumu [%], VH – východisková hodnota EZ

3.4. Všeobecná hodnota

Všeobecná hodnota je výsledná objektivizovaná hodnota majetku, ktorá je znaleckým odhadom najpravdepodobnejšej ceny hodnoteného majetku ku dňu hodnotenia v danom mieste a čase, ktorú by tento mal dosiahnuť na trhu v podmienkach voľnej súťaže pri poctivom predaji, keď kupujúci aj predávajúci budú konať s patričnou informovanosťou i opatrnosťou a s predpokladom, že cena nie je ovplyvnená neprimeranou pohnútkou, obvykle vrátane dane z pridanej hodnoty.

Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$VSH = TH \cdot k_p \quad [€] \quad (5)$$

kde TH – technická hodnota EZ, k_p – koeficient predajnosti EZ

Koeficient predajnosti sa vypočíta podľa vzťahu:

$$k_p = k_{PT} \cdot k_{PS} \cdot k_{PD} \cdot k_{PL} \cdot k_{PI} \quad [-], \quad (6)$$

Kde k_{PT} – koeficient úplnosti alebo neplatnosti, dokumentácie potrebnej na prevádzku EZ – $k_{PT} \in (0; 1>$, k_{PS} – koeficient zohľadňujúci dostupnosť náhradných dielov a servisných služieb, opravy a údržbu, EZ – $k_{PS} \in (0; 1>$, k_{PD} – koeficient dopytu po hodnotenom EZ na trhu – $k_{PD} \in R^+$, k_{PL} – tento koeficient sa použije pri stanovení všeobecnej hodnoty technologického celku pozostávajúceho z viacerých EZ alebo aj jednotlivého EZ a zohľadňuje zníženie všeobecnej hodnoty technologického celku alebo EZ v dôsledku zásahu do celku, napr. nutnosťou jeho demontáže alebo vyčlenením niektorého EZ z technologického celku – $k_{PL} \in (0; 1>$, k_{PI} – koeficient ostatných vplyvov, napr. EZ v záručnej lehote, počet predchádzajúcich užívateľov (neznámy spôsob údržby a využívania EZ, EZ po havárii a pod.). – $k_{PI} (0; 1>$

4. Kategorizácia elektrotechnických a energetických zariadení a materiálov používaných na ich výrobu

Všeobecné informácie o kategorizácii elektrotechnických a energetických :

Základom pre správne stanovenie všeobecnej hodnoty je správne zaradenie elektrotechnických a energetických (ďalej len „EZ“) do príslušnej kategórie na základe ktorého sú vo výpočte používané údaje ako životnosť a ZO . Pri zatriedení je dôležité rešpektovať nasledovné zásady :

- Každé uvedenie EZ v niektorej položke sa vzťahuje aj na taký výrobok, ktorý je nekompletný alebo nedokončený za predpokladu, že v stave a za podmienok, v akých sa nachádza k rozhodujúcemu dátumu tento nekompletný alebo nedokončený výrobok, má charakteristické znaky kompletného alebo hotového výrobku.
- Ak má byť EZ zaradené do dvoch alebo viacerých položiek, najšpecifickejšia položka musí mať prednosť pred položkami so všeobecnejším významom.
- Zmesi, EZ zložené z rôznych materiálov alebo EZ skladajúce sa z rôznych komponentov a EZ dodávané v súboroch na predaj v malom sa zariaďa podľa materiálu alebo komponentu, ktorý im dáva ich podstatný charakter.
- EZ alebo materiál ktorý nie je možné zatriediť podľa vyššie uvedených pravidiel sa zatriedi do položky, ktorá zahŕňa najpodstatnejšie EZ alebo materiál.
- Púzdra, obaly, schránky, špeciálne tvarované alebo upravené na vloženie určitého výrobku alebo súboru výrobkov vhodné na dlhodobé využitie sa zatriediť s týmito výrobkami.

Aktuálny stav kategorizácia uvedená v prílohe č. 5 vyhlášky 492/2004 Z. z.. Principiálne je možné konštatovať že jednotlivé zariadenia sú rozdelené na následné skupiny :

1. Silnopráúdové elektrotechnické zariadenia
 - 1.1. Elektrotechnické zariadenia na výrobu elektrickej energie (Kogeneračné jednotky, Kotly na výrobu vodnej alebo inej pary, konvertory a pod.)
 - 1.2. Elektrotechnické zariadenia na rozvod elektrickej energie (Tlačené obvody, Rozvádzače, rozvodové panely a pod.)
 - 1.3. Elektrotechnické zariadenia na premenu a prenos elektrickej energie (Vzduchové čerpadlá, kompresory, ventilátory a pod.)
2. Slabopráúdové elektrotechnické zariadenia
 - 2.1. Elektrotechnické zariadenia na rozvod elektrickej energie (Drôty, káble, izolačné časti a súčasti na elektrické stroje a pod.)
 - 2.2. Elektrotechnické zariadenia na premenu a prenos elektrickej energie (Galvanické články a batérie, Elektrické akumulátory a pod.)
 - 2.3. Elektrotechnické zariadenia na prenos informácií (Elektrické prístroje na drôtovú telefóniu alebo telegrafiu, Mikrofóny, reproduktory a pod.)
 - 2.4. Elektrotechnické zariadenia na spracovanie informácií (Písacie stroje, magnetické alebo optické snímače, kancelárske stroje a prístroje)
 - 2.5. Elektrotechnické zariadenia na záznam a reprodukciu informácií (Gramofóny, Magnetofóny, Kinematografické kamery a projektory a pod.)
 - 2.6. Meracie zariadenia (Buzoly, mikroskopy, váhy, Načúvacie pomôcky, stimulatory srdcového svalu a pod.)
 - 2.7. Riadiace zariadenia (Automatické regulačné alebo riadiace prístroje a nástroje, Elektrické prístroje signalizačné, bezpečnostné alebo na kontrolu a riadenie, poplachové zariadenia)
 - 2.8. Iné elektrotechnické zariadenia (Potreby na lunaparkové a spoločenské hry, Softvér dodávaný s výpočtovou technikou, elektronické stroje a zariadenia a prístroje, ktoré majú individuálne funkcie a nie sú špecifikované alebo zahrnuté v ostatných skupinách)

5. Návrhy na zmeny

Nakoľko súčasná kategorizácia EZ je zastaralá a nekorešponduje s kategorizáciou v štátoch EÚ vypracoval som novú inovatívnu kategorizáciu na základe predpisov EÚ a následnej analýzy kategorizácie EZ v jednotlivých štátoch EÚ

Tabuľka 1 kategorizácia EZ

Kat	Elektrické a elektrotechnické zariadenia	Príklady	Ž
1.	Malé domáce spotrebiče a ich komponenty	Vysávače, hriankovače, fritézy, elektrické nože	7
2.	Veľké domáce spotrebiče a ich komponenty		
3.	Priemyselné (gastro)		
4.	Elektronické a komunikačné zariadenia, informačné systémy a ich komponenty		
5.	Výpočtová technika		
6.	Zariadenia zábavnej a úžitkovej elektroniky a ich komponenty		
7.	Svietidlá a ich komponenty		
8.	Priemyselné svietidlá a svietidlá verejného osvetlenia		
9.	El. náradie(okrem priemyselných nástrojov) a ich komponenty		
10.	El. veľké priemyselné stroje a ich komponenty		
11.	El. hračky, športové a rekreačné vybavenie poháňané el. Prúdom a ich komponenty		
12.	El. Zdravotnícke vybavenie a ich komponenty		
13.	El. Monitorovacie, regulačné a kontrolné prístroje (okrem zariadení		

Chladničky, mrazničky, elektrické varné dosky, klimatizácie, chladenie, rekuperácia, kotly na vykurovanie

Chladničky, mrazničky, elektrické varné dosky

Najmä tlačiarne, kopírovacie stroje, komunikačné prístroje, kancelárske prístroje

PC, Notebooky, servery, rootre...

Mobilné telefóny, herné konzoly, televízory, audio sústavy. Smart hodinky, fitness náramky

Žiarivky, LED svietidlá, UV Svietidlá, svietidlá s infračerveným žiarením

Verejné osvetlenie budov, ciest, pamiatok

Vŕtačky, Šijacie stroje, zvaracie a spájkovacie nástroje

Pásový píly, CNC stroje, tlakové lisovacie jednotky, výrobné pásy

Elektro bicykle, elektro kolobežky, autíčka na ovládanie, hracie automaty

Dialyzačné prístroje, röntgen, MR zariadenia, zariadenia na meranie tlaku krvi, cukru, srdcového tepu, zubárske nástroje

Detektory dymu, regulátory kúrenia, termostaty, váhy,

	ktoré spadajú do kategórie zdravotníckeho vybavenia) a ich komponenty	laserové zameriavače, el. Teplomery,		23.	Softvér dodávaný s výpočtovou technikou (krabicový softvér)	MS Office a pod.	5
14.	El. Automatické dávkovače a ich komponenty	Automaty na horúce nápoje, bankomaty, predajné automaty na pevné výrobky,	10	24.	Špeciálne riadiace systémy inde nezahrnuté	RS automobilov, budov a iné inteligentné RS používané pre riadenie technologických procesov (iné ako pre domácnosti)	15
15.	Zariadenia na výrobu elektrickej energie, najmä jadrové elektrárne.	Jadrovo energetické zariadenia najmä reaktory a súčasti primárneho okruhu.	50	25.	Zariadenia na dopravu a prepravu hmôt	Čerpadlá, vývevy, dúchadlá, kompresory, a pod.	17
16.	Zariadenia na výrobu rozvod elektrickej energie, premenu a prenos elektrickej energie a ich komponenty	Generátory, kogeneračné jednotky, turbíny všeobecne (plynová, parné - kondenzačné, protitlakové a pod), transformátory rozvodne vvn, vn, spínacie stanice, vedenia vvn, vn nn, rozvádzače vvn, vn, nn a ich príslušenstvo	25	26.	Optické vedenia	Optické káble vrátane súčastí.	40
17.	Zariadenia na výrobu elektrickej energie z OZE	Fotovoltaické elektrárne a panely, veterné elektrárne,	20	27.	Určené meradlá (zákon o metrológii)	elektromery, plynomery, vodomery	6-10
18.	Zariadenia na výrobu elektriny systémom VUKVET a vodné elektrárne	Zemný plyn, biomasa iné vrátane komponentov, geotermálne elektrárne, vodné elektrárne, teplárne a pod vrátane komponentov.	30	28.	Elektrické vozidlá	vysokozdvížne vozidlá, elektromobily, regálové zakladače a pod.	14
19.	El. zariadenia na výrobu tepla, chladu a ich komponenty pre CZT a priemysel	Kotly parné, horúcovodné, teplovodné a iné, tepelné čerpadlá, klimatizačné jednotky, chladiče, rekuperačné jednotky a pod.	25	29.	Zdvíhacie zariadenia	žeriavy napr. portálové, mostové a pod.	17
20.	El. Optické zariadenia a ich el. komponenty	El. Ďalekohľady, el. Mikroskopy, fotoaparáty, kamery,	8	30.	SKAO	vysokoteplotné palivové články s keramickou elektródou, vysoko odporové voltmetre	20
21.	Drobné ochranné obaly el. Zariadení	Chrániace rúry pre káble, samotné plastové alebo kovové el. Skrine, telo tovarov do ktorých je zasadené el. zariadenie	20	31.	Regulačné stanice ZP		30
22.	Veľké ochranné obaly el. zariadení	Drobné stavby t.j. murované el. Rozvodne, trafostanice,	50	OZE – obnoviteľné zdroje energie, VUKVET- vysoko účinná kombinovaná výroby el. a tepla, CZT- centralizované zásobovanie teplom, SKAO- systém katódovej ochrany, ZP- zemný plyn			

6. Záver

Cieľom mojej študentskej odbornej vedeckej činnosti v tejto práci bolo zanalyzovať súčasný stav v posudzovaní a stanovení hodnoty elektrotechnických a elektroenergetických zariadení vzhľadom na vývoj a diametrálne zmeny, ako napríklad prechod ku globalizácii spoločnosti, zmena prístupu k používaniu a nasadzovaniu elektrotechnických a elektroenergetických zariadení. Mojm základným prínosom v tejto práci je nový pohľad, na kategorizáciu týchto zariadení a tak aktualizovať, zjednodušiť a vylepšiť súčasne platnú kategorizáciu EZ ktorá je už neaktuálna v porovnaní s kategorizáciou EZ členských štátov Európskej únie. SR je súčasťou Európskej únie a colný sadzobník ktorý bol doteraz základným pilierom pre súčasnú kategorizáciu EZ vzhľadom na vývoj vedy a techniky už nie je vhodným podkladom pre

kategorizáciu a triedenie EZ pre účely výpočtu hodnoty týchto zariadení. Mojm cieľom bolo zanalyzovanie kategorizácie v okolitých krajinách v EÚ a následné navrhnutie novej kategorizácie EZ ktoré korešponduje s členskými štátmi EÚ. Návrh novej kategorizácie obsahuje konkrétne skupiny EZ spolu aj s návrhom a životnosťou jednotlivých skupín EZ na základe prieskumu trhu, všeobecne dostupných informácií, informácií od prevádzkovateľov zariadení, dodávateľských a obchodných spoločností. . Navrhované triedenie – kategorizácia môže byť dobrým základom pre „Metodika pre stanovenie technického stavu a všeobecnej hodnoty elektrotechnických zariadení, elektroniky, energetických zariadení, hardvéru, softvéru a nehmotného majetku“, ktorej sa plánujem venovať vo svojej ďalšej práci.

Pod'akovanie

Touto cestou vyjadrujem poďakovanie pánovi prof. Ing. Františkovi Janičkovi, PhD. a Ing. Jozefovi Holjenčíkovi, PhD. za odborné usmernenia, cenné rady a podnetné návrhy, ktoré mi pomohli pri vypracovaní našej študentskej vedeckej odbornej činnosti.

Literatúra

- [1] Zákon č. 382/2004 Z. z. o znalcoch, tlmočníkoch a prekladateľoch
- [2] Vyhláška MS SR č. 492/2004 Z. z. o stanovení všeobecnej hodnoty majetku
- [3] SZILÁGYI M., SEDLÁKOVÁ I.: Ekonomické a právne aspekty stanovenia všeobecnej hodnoty podniku, Žilinská univerzita v ŽILINE, 2002
- [4] Vyparina, M. a kol. Metodika výpočtu všeobecnej hodnoty nehnuteľností a stavieb. 2. vydanie. Žilinská univerzita v EDIS, 2001, ISBN 80-7100-827-3.
- [5] Holjenčík, J. Naništa, R. Smola, A. Metodika na stanovenie všeobecnej hodnoty elektrotechnických zariadení.
- [6] <https://www.baua.de/EN/Topics/Safe-use-of-chemicals-and-products/Product-safety/Electrical-products/Requirements/Electrical-and-electronic-equipment-act.html>
- [7] https://www.slov-lex.sk/static/prilohy/SK/ZZ/2000/480/20010501_2585633-2.pdf
- [8] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006L0095>
- [9] <https://www.ecolex.org/details/legislation/electrical-and-electronic-equipment-act-lex-faoc050952/>
- [10] <https://elektrogesetz.com/#elektrogesetz>
- [11] <https://deutsche-recycling.com/blog/the-electrical-law-in-germany/>
- [12] https://www.en-former.com/en/france-passes-renewable-energy-acceleration-bill/?etcc_med=SEA&etcc_par=Google&etcc_cmp=Energysystems&etcc_grp=153190501608&etcc_bky=france%20renewables&etcc_mty=b&etcc_plc=&etcc_ctv=652674786900&etcc_bde=c&etcc_var=CjwKCAjwrdmhBhBBEiwA4Hx5g5horjkG0x8vnrs91CXSrBPJ2jz341XRS35shoPnPyWgJGM_zlz49xoCesUQAvD_BwE&gclid=CjwKCAjwrdmhBhBBEiwA4Hx5g5horjkG0x8vnrs91CXSrBPJ2jz341XRS35shoPnPyWgJGM_zlz49xoCesUQAvD_BwE

- [13] www.alza.sk
- [14] <https://www.seas.sk/o-nas/bezpecnost/jadrova-bezpecnost/jadrovypalivovy-cyklus/>
- [15] https://www.financnasprava.sk/img/pfsedit/Dokumenty_PFS/Podnikatelia/Clo_obchodny_tovar/Nomenklatura/Colny_sadzobnik/2022/2022.11.02_Col_sadz_2023.pdf
- [16] www.wikipedia.com
- [17] <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2004/492/20170901>
- [18] <https://www.istavebnictvo.sk/clanky/fotovoltaicke-elektrarne>

Využitie biomasy v podmienkach Slovenska

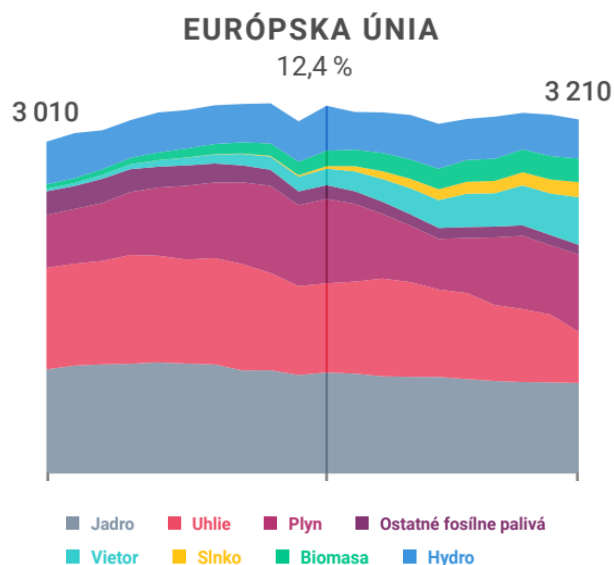
²Natália Marko, ¹Lucia Šišoláková, ¹prof. Ing. František Janíček, PhD.

¹Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, STU FEI

²Ústav manažmentu, STU

xmarkon@stuba.sk, xisolakova@stuba.sk

Pojem biomasa sa vzťahuje na akúkoľvek organickú hmotu pochádzajúcu z materiálov ako sú rastliny, stromy, poľnohospodársky alebo komunálny odpad. Ide o obnoviteľný a udržateľný zdroj energie, ktorý možno použiť pri získavaní elektriny, tepla a biopalív. Biomasu možno premeniť na energiu rôznymi procesmi, vrátane spaľovania, splyňovania, pyrolýzy a anaeróbného vyhnívania a fermentácie. Využívanie biomasy ako zdroja energie má viacero výhod vrátane zníženia emisií skleníkových plynov, zlepšenia postupov odpadového hospodárstva a podpory rozvoja vidieka. Využívanie biomasy má však aj určité problémy, ako napríklad súťaž o využívanie pôdy a potenciálne vplyvy na biodiverzitu. Preto je dôležité starostlivo zvážiť environmentálne aj sociálne dôsledky produkcie a využívania biomasy.



Obr. 1. Percentuálne zobrazenie využívania rôznych zdrojov energie v Európskej únii za rok 2019. (Faktyoklime.sk, 2019)

1 Úvod

Eliminácia znečisťovania životného prostredia je momentálne veľmi aktuálnou témou. Znečisťujú ho rôzne faktory, ako napríklad spaľovanie fosílnych palív.

Naším hlavným zdrojom energie sú stále fosílna palivá. Zvyšovanie cien za fosílna palivá a taktiež aj ich negatívny vplyv na životné prostredie priviedlo k životu myšlienku zamerania sa na obnoviteľné zdroje energie. Medzi nich patrí napríklad veterná energia, vodná energia, geotermálna energia, energia prílivu a odlivu, energia slnečného žiarenia a taktiež aj biomasa.

Biomasa bola pre človeka pred priemyselnou revolúciou primárnym zdrojom energie. Jej podiel ako zdroja energie začal klesať po rozšírení fosílnych palív, ako napríklad ropy a uhlia, ktoré sa začali využívať prevažne v priemysle a doprave v 30-tych rokoch 20-teho storočia.

2 Čo je biomasa

Vo všeobecnosti ide o biologicky rozložiteľné materiály, ktorých zdrojom sú rastliny alebo zvieratá. Medzi tie patria zvyšky z poľnohospodárstva, zvyšky z lesného hospodárstva, riasy a komunálny odpad.

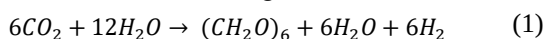
Dôležitým parametrom biomasy je jej schopnosť byť energonosičom. Túto funkciu má, nakoľko prostredníctvom fotosyntetických reakcií dochádza ku konzervovaniu primárnej slnečnej energie. Biomasa svojou podstatou umožňuje premenu jej energetického obsahu najmä pri získavaní tepla, chladu a elektrickej energie, ako aj na produkciu ušľachtilejších foriem pohonných hmôt a biogénnych palív. No energia z biomasy môže byť aj neobnoviteľným zdrojom energie. Produkcia biomasy má rozhodujúci význam v rôznych oblastiach, a to napríklad v poľnohospodárstve, v lesníctve, takisto zasahuje do dopravy, či energetiky. Jej postavenie zásadne ovplyvňuje súvisiace priemyselné odvetvia, ako aj životnú úroveň obyvateľstva a takisto ovplyvňuje dopady zmien klímy, ktoré boli vyvolané množstvom civilizačných zmien. Biomasu možno spaľovať priamo a získavať tak teplo, alebo ju rôznymi procesmi premeniť na obnoviteľné kvapalné a plyné palivá.

Čo sa vzniku či pôvodu týka, jej hlavnými stavebnými článkami sú uhľovodíky. Biomasa vzniká rôznymi neustále prebiehajúcimi procesmi, a to vďaka fyzikálnemu a chemickému kolobehu prvkov a zlúčenín na našej Zemi. Pri týchto procesoch rastlinstvo využíva na svoj rast vodu zo Zeme a oxid uhličitý pochádzajúci z atmosféry. Ďalej rastlinstvo vďaka fotosyntéze vodu a oxid uhličitý pretvára na uhľovodík, ktorý je základom biomasy. Hybná sila fotosyntézy, teda energia slnečných fotónov, je neskôr uskladnená v chemických väzbách organického materiálu, teda biomasa obsahuje aj uloženú chemickú energiu zo slnka.

Každý zdroj biomasy má rôzne vlastnosti z hľadiska výhrevnosti, vlhkosti a obsahu popola. Tieto faktory výrazne ovplyvňujú schopnosť danej biomasy premieňať jej energiu na elektrinu, teplo alebo jej premenu na biopalivo. Najčastejším typom existujúcej a využívanéj biomasy sú rastliny, drevo a odpad. Nazvať ich môžeme aj ako suroviny biomasy.

Počas rastu rastlinstvo prijíma oxid uhličitý a uvoľňuje ho pri následnom energetickom využívaní. Tento uhlíkový cyklus je primárnym dôvodom, prečo mnohí považujú biomasu za uhlíkovo neutrálnu (alebo takmer uhlíkovo neutrálnu) formu energie. Nižšie uvoľňovanie emisií na životné prostredie v súvislosti so zmenou klímy a globálnym otepľovaním. Biomasa obsahuje uloženú chemickú energiu zo slnka. Rastliny produkujú biomasu prostredníctvom fotosyntézy. Biomasa je hmotnosť alebo celkové množstvo živých organizmov jedného živočíšneho alebo rastlinného druhu (druhovú biomasu) alebo všetkých druhov v spoločenstve (biomasa spoločenstva), bežne označované ako jednotka plochy alebo objemu biotopu. Hmotnosť alebo množstvo organizmov na ploche v danom okamihu predstavuje plodinu na stojato. Celkové množstvo organického materiálu produkovaného živými organizmami v určitej oblasti za určité časové obdobie, nazývané primárna alebo sekundárna produktivita (prvá pre rastliny, druhá pre zvieratá), sa zvyčajne meria v jednotkách energie, ako je gram kalórií alebo kilojoulov na meter štvorcový za rok. Bežne sa zaznamenávajú aj miery hmotnosti – napríklad tony uhlíka na kilometer štvorcový za rok alebo gigatony uhlíka za rok.

Slnečná energia



Chlorofyl

Ukážka vzorca biochemického procesu fotosyntézy vedúcej k vzniku biomasy

2.1 Druhy biomasy

Suroviny biomasy vieme rozdeliť podľa ich zdrojov. Medzi zvyšky z poľnohospodárskych plodín vieme zaradiť napríklad nevyužitú časť rastlín ako stonky kukurice, rôzne druhy slamy alebo listy. Veľmi energeticky bohatými sú aj exkrementy poľnohospodárskych zvierat.

Zvyškami z lesného hospodárstva môžeme nazvať konáre, kôru alebo iné časti stromov, ktoré sú nevyužiteľné pre priemysel. Taktiež uhynuté stromy sú vhodné na spracovanie.

Riasy sú veľmi výhodnou biomasou vďaka vysokému obsahu oleja. V závislosti od druhu ich vieme pestovať v slanej

vode, v sladkej vode alebo aj v praktickej vode. Ich nevýhodou je to, že sú náročné na energetický prísun, ktorý dosahuje až tretinu ich výrobných nákladov.

Medzi komunálny odpad vieme zaradiť bežný biologický odpad z domácností. Rôzne potravinové zvyšky, papier alebo biologický odpad zo záhrad.

Biomasa sa takisto delí na mokrá a suchú biomasu. Suchá biomasa je organický materiál, ktorý obsahuje málo vody alebo neobsahuje žiadnu vodu. Môže sa získavať z rastlinných zvyškov, ako je slama, lesné zvyšky, korene a listy, alebo zo živočíšnych odpadov, ako je hnoj. Suchá biomasa sa môže používať na generovanie elektrickej energie a tepla a ako surovina na výrobu biocharu, biochemických peliet a iných palív.

Mokrú biomasu je organickým materiálom, ktorý naopak obsahuje značné množstvo vody. Nakoľko mokrá biomasa zvyčajne obsahuje až 90 % vody, znamená to, že sa nedá použiť priamo ako palivo, pretože na jej spálenie by bolo potrebné veľké množstvo energie. Mokrá biomasu však môžeme použiť na výrobu bioplynu alebo biopaliva prostredníctvom procesu bio degradácie nazývaného anaeróbna digresia (môžeme si predstaviť riadené procesy rozkladu biologických odpadov bez prístupu vzduchu), vznikne nám konečný produkt v podobe nerozloženého digestátu čiže nerozloženého zvyšku v podobe bioplynu. Takisto tento proces môžeme nazvať aj ako metalizácia alebo metánová fermentácia. Medzi takéto materiály patria napríklad biologicky rozložiteľný komunálny odpad, zelená hmota rastlín, riasy, krmoviny či živočíšny odpad (exkrementy).

2.2 Získavanie energie z biomasy

Spôsobov získavania energie z biomasy je niekoľko.

Z hľadiska metód generovania energie z biomasy sa presadzujú suché (spaľovanie, splyňovanie, pyrolýza) a mokré procesy (hnieť, fermentácia)

2.2.1 Spaľovanie

Najrozšírenejším a najkonvenčnejším spôsobom je spaľovanie. Spaľovať je možné prakticky akékoľvek palivo od dreva až po komunálny odpad. Najčastejšie sa spaľuje drevo alebo odpady z poľnohospodárstva. Vyprodukované teplo sa využíva na vykurovanie alebo na generovanie elektrickej energie. (Janiček, 2007)

2.2.2 Splyňovanie

Pri splyňovaní sú produkované horľavé plyny (metán, oxid uhoľnatý, vodík) a aj nehorľavé produkty. Tento proces prebieha počas nedokonalého horenia a ohrievaní biomasy. Vznikajúca zmes plynov má vysokú energetickú hodnotu a môže byť použitá ako plynné palivo v motorových vozidlách. Vo vozidlách však tento plyn vedie k nižšiemu výkonu motora asi o 40%. (Janiček, 2007)

2.2.3 Pyrolýza

Pyrolýza je jednoduchý a pravdepodobne najstarší spôsob úpravy biomasy na palivo vyššej kvality – tzv. drevné uhlie. Na jeho získavanie je okrem dreva možné využiť aj iné suroviny, napríklad slamu. Pyrolýza spočíva v zohrievaní biomasy (ktorá je často rozdrvená a dodávaná do reaktora) za neprítomnosti vzduchu na teplotu 300 – 500 °C, až do doby, pokiaľ všetky prchavé látky z nej neuniknú. Zvyšok – drevné uhlie je palivo, ktoré má takmer dvojnásobnú energetickú hustotu v porovnaní so vstupnou surovinou a navyše lepšie horí (horí pri vyššej teplote). V mnohých krajinách sveta sa dnes vyrába drevné uhlie pyrolýzou dreva. V závislosti od obsahu vlhkosti a účinnosti procesu je potrebných asi 4 – 10 ton dreva na výrobu jednej tony drevného uhlia. Pyrolýza môže prebiehať aj v prítomnosti malého množstva vzduchu (splyňovanie), vody (parné splyňovanie) alebo vodíka (hydrogenácia). Nielen drevné uhlie, ale aj iné produkty pyrolýzy majú značný energetický význam. (Janíček, 2007)

2.2.4 Anaeróbne hnitie

Anaeróbne hnitie podobne ako pyrolýza prebieha v prostredí bez prítomnosti vzduchu, avšak proces hnitia prebieha účinkom baktérií a mikroorganizmov, kým pyrolýza pri pôsobení vysokej teploty. Hnitie organických zvyškov prebieha všade v teplom a vlhkom prostredí a dokonca aj pod vodou, kde vedie k tvorbe plynov vystupujúcich na hladinu. Keďže vznikajúce plyny sú horľavé, môže dochádzať k ich samo zapáleniu, čo v minulosti viedlo k tajomným úkazom nad hladinou jazier. Plyn vznikajúci nad hladinou jazier podobne ako plyn vznikajúci pri hnití organických látok v inom prostredí sa nazýva bioplyn a skladá sa hlavne z metánu (CH_4) a oxidu uhličitého (CO_2). (Janíček, 2007)

2.2.5 Fermentácia

Fermentácia je proces, ktorým sa organický materiál premieňa na iné zlúčeniny v prítomnosti mikroorganizmov. Biomasa sa rozkladá na jednoduchšie zlúčeniny ako alkohol a metán. Mokrá fermentácia sa uskutočňuje pri obsahu vody v biomase až 90%.

Suchá fermentácia sa uskutočňuje v prítomnosti menšieho množstva vody, a to 40 až 75%. Zvyčajne sa využíva na produkciu bioplynu z rastlinných odpadov, živočíšnych odpadov alebo taktiež z komunálneho odpadu.

2.2.6 Biopalivá

Biopalivá sú v podstate všetky tuhé, kvapalné a plynne palivá vyrobené z organických látok buď priamo z rastlín, alebo nepriamo z priemyselných, poľnohospodárskych alebo domácich odpadov.

1. Tuhé:
 - a. Drevo
 - b. Slama
 - c. Rýchloraštie rastliny a dreviny
2. Kvapalné
 - a. Etanol
 - b. Metanol
 - c. Bionafta
3. Plynne – bioplyn. (Janíček, 2007)

Tab. 1. Spôsoby konverzie biomasy na energiu (Janíček, 2007)

Typ konverzie biomasy	Spôsob konverzie biomasy	Energetický výstup	Odpadový materiál alebo druhotná surovina
termochemická konverzia (suché procesy)	spaľovanie	teplo viazané na nosič	popol
	splyňovanie	generátorový plyn	dechtový olej, uhlikaté palivo
	pyrolýza	generátorový plyn	dechtový olej, pevné horľavé zbytky
biochemická konverzia (mokré procesy)	anaeróbna fermentácia	bioplyn	fermentovaný substrát
	aeróbna fermentácia	teplo viazané na nosič	fermentovaný substrát
fyzikálno-chemická konverzia	esterifikácia bioolejov	metylester, biooleje	glycerín

2.3 Energetická hodnota biomasy

Rôzne druhy biomasy majú rozdielne energetické hodnoty. Výhrevnosť hnedého uhlia je 10 až 20 MJ/kg a tak ho vieme porovnávať so suchou biomasou (vlhkosť 15 až 20 %), ktorej výhrevnosť je cca 14 MJ/kg. Avšak nie každá biomasa má také priaznivé hodnoty. Napríklad drevo v čase zberu môže obsahovať od 30 do 60 % vody. Exkrementy hospodárskych zvierat obsahujú 75 až 90 % vody. Preto je potenciálna energia biomasy v čase zberu nižšia ako energia uhlia.

Tab. 2. Energetická hodnota niektorých palív (Janiček, 2007)

Biomasa	Obsah vody [%]	Výhrevnosť [MJ.kg ⁻¹]	Výhrevnosť [kW.kg ⁻¹]
Drevo - dub	20	14,1	3,9
Drevo - smrek	20	13,8	3,8
Slama	15	14,3	4,0
Obilie	15	14,2	3,9
Repkový olej	-	37,1	10,3
Čierne uhlie	4	30,0-35,0	8,3
Hnedé uhlie	20	10,0-20,0	5,5
Vykurovací olej	-	42,7	11,9
Bio-metanol	-	19,5	5,4
Skádkový plyn	-	16,0	4,4
Drevoplyn	-	5,0	1,4
Bioplyn z hnojovnice	-	22,0	6,1
Zemný plyn	-	31,7	8,8
Vodík	-	10,8	3,0

2.4 Legislatíva pre využívanie biomasy

V roku 2017 Slovensko zaviedlo tri „kritériá trvalo udržateľného využívania biomasy“, ktoré sa budú uplatňovať na všetky projekty súvisiace s biomasou financované Európskou úniou. Čo sa týka základných legislatívnych podmienok a trhových okolností využívania biomasy ako zdroja energie v Slovenskej republike, poznáme napríklad zákon regulujúci získavanie biomasy. Jedná sa o Zákon č. 326/2005 Z. z. o lesoch - drevná biomasa z lesných pozemkov, týmto základným dokumentom sa riadi lesné hospodárstvo na Slovensku – program starostlivosti o les; drevná biomasa. Biomasu vníma ako výsledok ťažby – palivové drevo, ďalej ako zvyšky z ťažby – korunové časti stromov, konáre a ako cielene pestované energetické porasty.

Ďalšou je Vyhláška MPRV SR č. 295/2011 Z. z., ktorou sa vykonáva § 19b ods. 2 zákona č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov. Nachádza sa v nej vzor Vyhlásenia pestovateľa/dodávateľa biomasy určenej na výrobu biopaliva alebo bio kvapaliny v súlade s požiadavkami článku 17 smernice 2009/28/ES.

Ďalej o biomase a jej využívaní na Slovensku hovorí aj Zákon č. 138/2010 Z. z. o lesnom reprodukčnom materiáli.

Čo sa týka Európy, ako bolo oznámené v Európskej zelenej dohode, Komisia navrhla revíziu smernice o energii z obnoviteľných zdrojov. Zahŕňa ďalšie ciele posilnenie kritérií udržateľnosti biomasy a prevezme odporúčania správy „Využitie drevnej biomasy na výrobu energie v EÚ“, ktorú vypracovalo Spoločné výskumné centrum Komisie. Ďalej zahŕňa aj „Legislatíva EÚ Smernica o biopalivách pre dopravu

2009/30/ES o podpore biopalív v doprave“ (smernica o kvalite palív).

2.5 Bioplynové stanice

Bioplynová stanica je zariadenie na biochemickú konverziu biomasy. Produkuje plyn, ktorý vzniká pri rozklade organickej hmoty v procese fermentácie. Bioplyn možno vyrobiť z akejkoľvek biologicky rozložiteľnej organickej hmoty. Najčastejšie však ide o odpad z komplexného chovu hospodárskych zvierat, zvyšky rastlín, a odpad z potravinárskeho priemyslu, ako sú napríklad cukrovary. nevyužitý energetický potenciál organických zvyškov dokážu využiť a zároveň vrátiť živiny späť do ekosystému. Z nechceného odpadu sa tak vytvorí energia a hnojivo.

Bioplynové stanice sa stavajú v najrôznejších veľkostiach. Pre ich vzájomné porovnanie sa väčšinou používa veľkosť inštalovaného elektrického výkonu. Podľa tohto delíme bioplynové stanice na malé, stredné a veľké. Malé bioplynové stanice majú inštalovaný výkon do 200 kW. Stredné, najbežnejšie BPS, majú inštalovaný výkon niekoľko stoviek kW. Výkon najväčších bioplynových staníc dosahuje niekoľko tisícok kW.

Bioplynové stanice majú tú výhodu, že sú decentralizovaným zdrojom, bez nukleárneho rizika. Aktuálne bioplynové technológie patria medzi tretie najrýchlejšie rastúce obnoviteľné zdroje energie na svete. Pred nimi je len fotovoltika a veterná energetika. Takisto bioplyn vyrobený v bioplynovej stanici je mnohostranne využiteľný a priamo aplikovateľný. Príkladmi sú vyhrievanie a chladenie, získavanie elektriny, v doprave alebo dokonca v chemickom priemysle. Bioplyn môže byť navyše vyrábaný počas celého roka bez prerušenia.

Čo sa potenciálu bioplynu týka, predikcie sú, že v roku 2030 tento sektor vyprodukuje 370 TWh bio-metánu a v roku 2050 by to malo byť 1 020 TWh. Celková inštalovaná elektrická kapacita všetkých kogeneračných jednotiek na bioplynových staniciach v Európe je viac ako 10 GW, čo je ekvivalent 10 atómových elektrární. Výrazná väčšina bioplynových staníc na Slovensku – viac ako 70 – má inštalovaný výkon v rozpätí 0,9-1,0 MW. Čo sa podpory rozvoja bioplynových staníc na Slovensku týka, v nedávnej minulosti, a to 28. novembra 2022, Ministerstvo hospodárstva zrušilo výzvu z Plánu obnovy. Táto výzva mala slúžiť na podporu modernizácie/transformácie existujúcich zariadení na výrobu elektriny z OZE – bioplynové stanice v rámci Plánu obnovy a odolnosti Slovenskej republiky. V decembri 2022 ju Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky vyhlásilo nanovo, no so zmenenými podmienkami a so zníženou alokáciou.

2.5.1 Legislatíva pre bioplynové stanice

V súčasnosti sa na Slovensku nachádza viac ako 100 bioplynových staníc, ktoré využívajú najmä rastlinné a živočíšne odpady, zosilážovanú kukuricu, trávu a iné organicky rozložiteľné materiály. Vzhľadom na zvýšenú pozornosť na problematiku ochrany životného prostredia a klimatických zmien sa očakáva, že v budúcnosti bude dôležitá podpora a

rozvoj obnoviteľných zdrojov energie, vrátane bioplynu, a to nielen na Slovensku, ale v celom svete.

Podľa zákona č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie, vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov, je bioplynová stanica definovaná ako zariadenie na výrobu bioplynu z biomasy, ktoré sa využíva na výrobu elektriny, tepla alebo pohonnej hmoty. Tento zákon ukladá povinnosti pre prevádzkovateľov bioplynových staníc, ako sú napríklad podať žiadosť o podporu pre výrobu energie z obnoviteľných zdrojov, mať uzavretú zmluvu o odbere a predaji energie, dodržiavať environmentálne požiadavky a obmedzenia emisií, podávať správy a účtovať použitie podpory.

Okrem toho, zákon stanovuje podmienky a postupy pre udelenie a odobratie licencie na prevádzku bioplynovej stanice, ako aj pravidlá pre priame predaje elektriny a tepla zo staníc.

Ďalej môžeme spomenúť Vyhlášku Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky č. 410/2012 Z. z., ktorou sa vykonávajú niektoré ustanovenia zákona o ovzduší v znení vyhlášky č. 270/2014 Z. z. Jednotlivé body vyhlášky hovoria o bioplyn a priemyselné plyny; bioplyn a požiadavky na kvalitu palív a vedenie prevádzkovej evidencie, o technických požiadavkách a podmienkach prevádzkovania, o výrobe bioplynu, alebo napríklad o rozčlenení bioplynových staníc na poľnohospodárske plynové stanice, priemyselné bioplynové stanice a komunálne bioplynové stanice.

Medzi zákony, ktoré sa týkajú bioplynových staníc na Slovensku, patrí Zákon č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie, vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Ustanovuje podmienky pre podporu výroby energie z obnoviteľných zdrojov, ako je bioplyn, a stanovuje povinnosti prevádzkovateľov bioplynových staníc.

Ďalej doplnený zákon z roku 2022, a to Zákon 363/2022 Z. z., ktorým sa mení a dopĺňa zákon č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie, vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov, ktorým sa menia a dopĺňajú niektoré zákony. Okrem toho existujú aj ďalšie zákony, smernice a nariadenia EÚ, ktoré sa týkajú ochrany životného prostredia, obnoviteľných zdrojov energie a emisií, a majú vplyv na prevádzku bioplynových staníc na Slovensku.

Môžeme spomenúť aj smernicu Európskeho parlamentu a Rady 2009/28/ES o podpore využívania energie z obnoviteľných zdrojov. Smernica ustanovuje ciele pre podiel obnoviteľných zdrojov energie v celej EÚ a ustanovuje podmienky pre podporu výroby energie z obnoviteľných zdrojov, vrátane bioplynu.

Ďalšou je Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2010/75/EÚ o priemyselných emisiách (IPPC). Táto smernica sa týka kontrolného systému pre emisie priemyselných zariadení, ako sú bioplynové stanice.

Zákon č. 567/2001 Z. z. o plynifikácii krajiny a o zmene a doplnení niektorých zákonov sa týka výroby, prepravy a distribúcie zemného plynu a môže mať vplyv na prevádzku bioplynových staníc, ktoré produkujú bioplyn ako náhradu za zemný plyn.

Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ), č. 2018/1999 z 11. decembra 2018 o súčasnej úprave cieľov EÚ v oblasti klímy a energie do roku 2030 a o zmene nariadenia (EÚ) č. 2018/1999. Tento právny predpis ustanovuje ciele EÚ pre zníženie emisií skleníkových plynov a podporu využitia obnoviteľných zdrojov energie do roku 2030.

Zákon č. 40/1964 Zb. Občiansky zákonník je zákon, ktorý sa týka práv a povinností občanov a právnických osôb. Môže sa uplatniť aj v prípade sporov medzi prevádzkovateľmi bioplynových staníc a miestnymi obyvateľmi alebo inými dotknutými stranami.

Zákon 363/2022 Z. z., je zákon ktorým sa mení a dopĺňa zákon č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie, vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov, a ktorým sa menia a dopĺňajú niektoré zákony. Stanovuje spôsob podpory a podmienky podpory obnoviteľného plynu a iné.

3 Záver

Využívanie biomasy má potenciál na výrobu obnoviteľnej energie a na zníženie emisií skleníkových plynov.

Ako každá energetická forma, aj biomasa má svoje výhody a nevýhody. Medzi nevýhody vieme zaradiť jej vplyv na poľnohospodárstvo, potenciálny vplyv na biodiverzitu, konkurenciu s potravinovými plodinami, jej nízku energetickú hustotu v porovnaní s fosílnymi palivami a taktiež to, že spracovanie biomasy častokrát prevyší nákladmi cenu fosílnych palív.

Hlavnou výhodou biomasy je jej obnoviteľnosť. Môže byť obnovovaná v krátkom čase, na rozdiel od fosílnych palív, ktoré sa tvoria stovky až tisíce rokov. Môže byť využívaná na výrobu tepla, elektrickej energie, biopalív alebo na výrobu rôznych materiálov, čím podporuje celú škálu ekonomických sektorov. Jej využívanie dokáže podporiť miestne hospodárstvo a ekonomiku, keďže obstarávanie biomasy vie zabezpečiť pracovné príležitosti.

V konečnom dôsledku môžeme konštatovať, že biomasa má veľký potenciál byť udržateľným a obnoviteľným zdrojom energie, ktorý môže byť prospešný pre životné prostredie a spoločnosť ako celok.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0157 Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií.

Rady by sme poďakovali nášmu vedúcemu práce, pánovi prof. Ing. Františkovi Janičkovi, PhD., z Ústavu elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, a aj pánovi prof. Ing. Jánovi Gadušovi, PhD., z Ústavu environmentálneho manažmentu na Fakulte európskych štúdií a regionálneho rozvoja Slovenskej poľnohospodárskej univerzity v Nitre, za pozorné prečítanie textu.

Literatúra

- [1] JANÍČEK, F. et al. 2007. *Obnoviteľné zdroje energie 1*. 1.vyd. Bratislava : STU, 2007. 171 s. ISBN 80-969-7770-3.
- [2] GYÖNGYOVÁ. E. *Bioplynové stanice kvalita ovzdušia*. 2021. ISBN 978-80-8213-043-3
- [3] GADUŠ, J. Inštitút znalostného pôdohospodárstva a inovácií [online]
Dostupné na internete:
<https://www.agroporadenstvo.sk/oze-bioplyn?article=712&fbclid=IwAR2CeF2fbwYkfVZksHZiJP8L0Hf6RxJZywoiJhvg35b3KjbvuKg9l4qD-ao>
- [4] GADUŠ, J. Inštitút znalostného pôdohospodárstva a inovácií [online]
Dostupné na internete:
https://www.agroporadenstvo.sk/oze-bioplyn?article=1576&fbclid=IwAR0xv4jQaj9nCERaZ93CByAINkZZj085QlxFZilPWVAz2ffK_vPiPcYVWWQ
- [5] Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky č. 252/2016 Z. z. zo 7. septembra 2016, [online]
Dostupné na internete: https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2016/252/vyhlasene_znenie.html
- [6] Zbierka zákonov č. 40/1964, z 26. februára 1964 [online]
Dostupné na internete: <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/1964/40/>
- [7] Biomasa, všetko, čo by ste mali vedieť o tejto obnoviteľnej energii | Siet'ová meteorológia [online]
Dostupné na internete:
<https://www.meteorologiaenred.com/sk/biomasa.html>
- [8] Faktyoklime.sk [online]
Dostupné na internete:
<https://faktyoklime.sk/infografiky/elektrina-svet>

Analýza fotovoltickej elektrárne

Bc. Dávid Takács, Ing. Milan Perný, PhD.

Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

xtakacs@stuba.sk

Abstrakt – Publikácia je zameraná na analýzu komponentov fotovoltických (FV) elektrární. Vyhodnotené sú ich elektrické parametre v laboratórnych a v reálnych podmienkach. V texte sa dozvieme o vplyve tienenia na FV moduly, o účinnostiach batérie LiFePo₄, meničov, MPPT regulátora a podobne. Spomenuté budú problémy s napätím pri použití sieťového meniča, ale aj (ne)potreba použitia optimizérov pre FV moduly.

1 Úvod

Výrazný rast dopytu po elektrickej energii a zároveň snaha o znížovanie produkcie emisií CO₂ sú príčinou rozvoja nových technológií v obnoviteľných zdrojoch. Zvyšovanie počtu inštalovaných FV elektrární spôsobujú čoraz prísnejšie energetické triedy pre budovy, ale aj túžba investorov vlastniť ekologický zdroj elektrickej energie s relatívne prijateľnou návratnosťou investícií.

V súčasnosti rozlišujeme podľa vyhotovenia 3 základné typy FV elektrární (FVE):

- Ostrovné (off-grid)
- Sieťové (on-grid)
- Hybridné

Ostrovné FVE sú autonómne systémy bez pripojenia sekundárneho zdroja elektrickej energie. Využívajú sa predovšetkým v oblastiach bez možnosti pripojenia sa na distribučnú sústavu. Pre spoľahlivú prevádzku je nutné použitie akumulátora.

Sieťové FVE nevyužívajú na akumuláciu vyrobenej elektrickej energie batérie. Vyrobenú elektrickú energiu, resp. jej časť, exportujú do distribučnej sústavy. Pri výpadku sieťového napätia dochádza k automatickému odpojeniu meniča.

Hybridné FVE sú kombináciou off-grid a on-grid systému. Jedná sa o najkomplexnejší systém. Primárne sa využíva energia získaná z FV modulov, ktorá je priamo spotrebovaná, alebo sa akumuluje v batérii. V prípade vybitia batérie alebo nedostatočného výkonu z FV modulov dochádza ku dodávke elektrickej energie do záťaže zo siete. Pri plnom nabití batérie a nedostatočnej záťaži, môže ako pri on-grid systéme, dochádzať k exportu elektrickej energie do siete (nutná platná zmluva s prevádzkovateľom distribučnej sústavy). Výhodou hybridných FVE je možnosť dodávky elektrickej energie z FV systému do záťaže aj pri výpadku sieťového napätia.

Na funkčnosť FV systému vplyva množstvo faktorov, ktoré treba pri návrhu brať do úvahy a hľadať pre ne

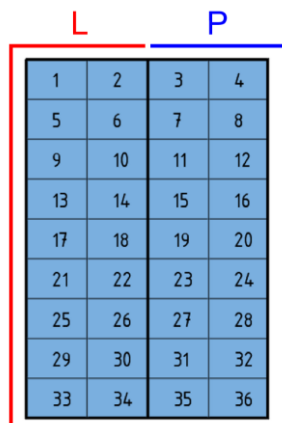
kompromisné riešenia. Medzi hlavné faktory ovplyvňujúce funkčnosť systému môžeme uvažovať sklon modulov, polohu modulov a vplyv tienenia na ne, inštalovaný výkon, použitie optimizérov, rozdelenie modulov na viac „stringov“, výber vhodného meniča, vhodné rozdelenie inštalovaného výkonu spotrebičov medzi fázami, výber vhodnej batérie a iné. Odhliadnuc od technických parametrov je nutné uvažovať finančné hľadisko a vytvoriť predpoklady pre realizovateľný projekt. Preto návrh každej FVE by mal vychádzať z dostatočne odborného posudku, avšak ktorý je častokrát zanedbávaný.

Nasledujúce kapitoly približia problémy, ale aj pozitíva spozorované z praktických meraní na FV systémoch. Zároveň budú komplexne analyzované dáta získané z hybridnej FVE s inštalovaným výkonom 2,6 kWp a zo sieťovej FVE s inštalovaným výkonom 3,95 kWp.

2 Vplyv tienenia na FV moduly

Tienenie FV modulov prináša značné problémy s prehrievaním článkov, znížením výkonu sústavy a v neposlednom rade degradáciu [1]. Fotovoltický modul sa skladá zo sériového, paralelného, alebo sériovo-paralelného usporiadania článkov. Ak dôjde k zatieneniu čo i len jedného článku dochádza k značnému poklesu výkonu modulu a prehrievaniu zatienenej časti. Je to spôsobené zachovávaním si rovnakého prúdu na každom sériovo radenom článku. Prúd v sériovo radených článkoch klesne na úroveň tieneneného článku, na ktorom sa zároveň vo forme tepla spotrebuje prebytočný výkon z netienených článkov. K problémom s tienením taktiež dochádza pri paralelne radených článkoch. V ideálnom prípade by napätie v každej „slučke“ malo dosahovať rovnaké hodnoty. Avšak tienenie paralelne radených článkov prináša diverzitu napätí v „slučkách“ a obvodmi začnú pretekať vyrovnávacie prúdy. Pre zmiernenie problémov s tienením sa používajú ochranné premostňovacie diódy (by-pass diódy), ktoré dokážu spomínané nedostatky výrazným spôsobom eliminovať.

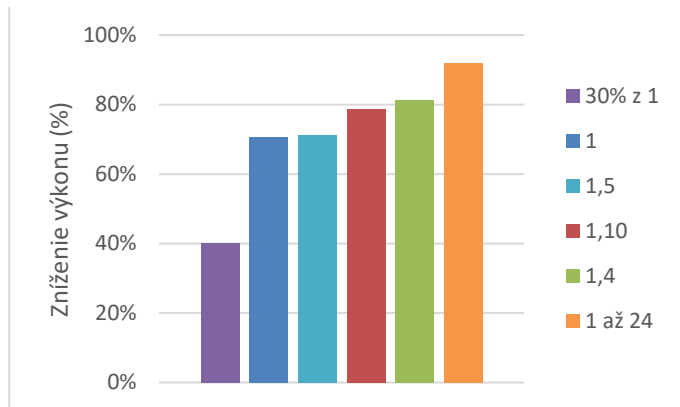
Vplyv tienenia na moduly bol experimentálne overený v laboratórnych podmienkach. V experimente boli použité dva moduly zložené z 36 sériovo radených kremíkových článkov. Modul „A“ neobsahoval ochranné premostňovacie diódy. Modul „B“ obsahoval 2 ochranné premostňovacie diódy. Jedna dióda chránila 18 článkov v časti „L“, druhá dióda chránila 18 článkov v časti „P“, viď. obr. 1. Články boli tienené kartónom.



Obr. 1. Označenie FV článkov pre oba moduly.

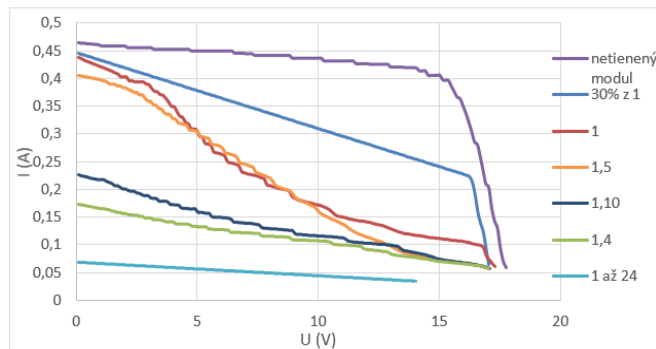
2.1 FV modul bez premost'ovacích diód

Zatienenie len jedného článku (článok č. 1) spôsobilo v prípade modulu bez premost'ovacích diód pokles výkonu o vyše 70 % voči nezatienenému FV modulu. Zatienenie dvoch článkov (články 1, 4) spôsobilo pokles výkonu až o vyše 80 %. Taktiež sme si namodelovali stav zašpinenia vtáčim trusom, kde sme zakryli 30 % z článku č. 1. Zníženie výkonu v danom prípade dosahovalo hodnotu až 40 %. Vidíme, že FV moduly bez ochranných diód sú takmer nepoužiteľné v oblastiach s vyšším rizikom znečistenia, resp. tienenia. Spomínané, ale aj ostatné variácie zakrytia sú zobrazené na obr. 2.



Obr. 2. Zníženie výkonu pri rôznom zatínení FV modulu bez ochranných premost'ovacích diód (modul A).

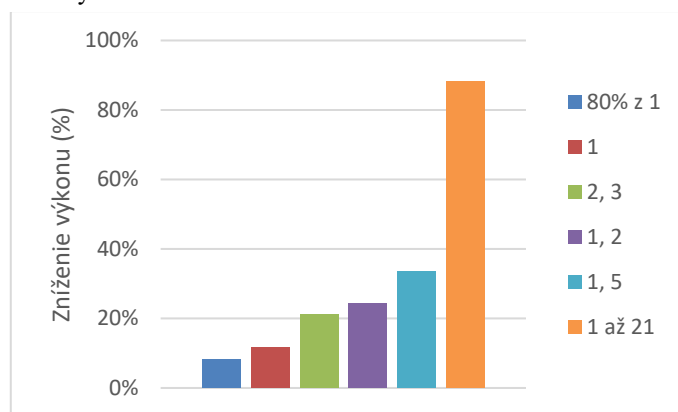
Obr. 3 zobrazuje V-A charakteristiky pre jednotlivé stupne zatienenia. Zatienenie nespôsobuje iba zníženie výkonu, ale aj výraznú deformáciu V-A charakteristiky voči charakteristike modulu bez zatienenia. Deformáciu, resp. odklon V-A charakteristiky od ideálnej vyjadruje faktor plnenia FF (-). Ideálna hodnota faktora plnenia je $FF = 1$. V prípade zatienenia článku č. 1 došlo k poklesu faktora plnenia voči nezatienenému modulu z $FF_{\text{netieneny}} = 0,73$ na $FF_1 = 0,23$. Deformácia V-A charakteristiky, obzvlášť dynamická, je nežiadúcim javom aj pre inteligentnú elektroniku – MPPT regulátory. Algoritmy slúžiace na hľadanie bodu maximálneho výkonu pracujúce postupným „prechodom“ V-A charakteristiky sú citlivé na náhle zmeny elektrických parametrov FV modulov.



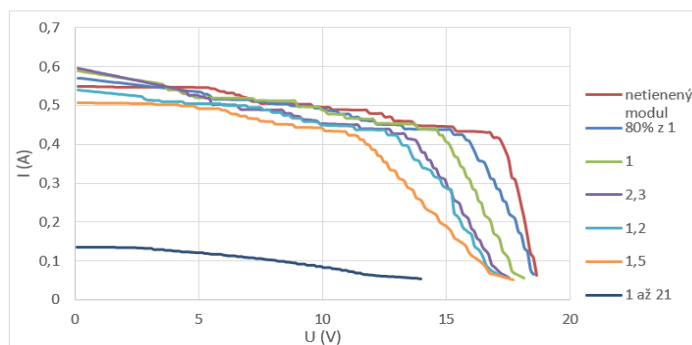
Obr. 3. V-A charakteristika modulu bez ochranných premost'ovacích diód.

2.2 FV modul s premost'ovacími diódami

V druhej fáze experimentu bol potvrdený významný vplyv ochranných diód na stabilitu el. parametrov FV modulu. Zníženie výkonu pri module bez ochranných diód presahujúce 70 % je možné pri zatínení jedného článku modulu s ochrannými diódami znížiť na približne 12 %. Ani zatienenie jedného článku v dvoch vetvách (L a P) nespôsobí markantné zníženie výkonu (približne 21 %). Pri čiastočnom zatínení taktiež nedochádza k výraznej deformácii V-A charakteristiky, čo pozitívne vplyva na chod MPPT regulátora. Pri zatínení jedného článku došlo k zníženiu faktora plnenia z $FF_{\text{netieneny}} = 0,7$ na $FF_1 = 0,6$. Zatienenie jedného článku z dvoch vetiev znížilo faktor plnenia na $FF_{2,3} = 0,54$. Môžeme konštatovať, že technicky jednoduchý a finančne nenáročný úkon – použitie 2 ochranných diód vo FV module zásadne zvyšuje efektívnosť výroby elektrickej energie „zo Slnka“ pri čiastočnom zatínení. Avšak pri väčšom zatínení, v našom prípade 58 %, je zníženie výkonu spôsobené tienením blízke hranici 90%. Riešením na zvýšenie výkonu by bolo použitie viacerých premost'ovacích diód. Ideálny prípadom je samostatná premost'ovacia dióda pre každý FV článok. Toto riešenie však výrazne zvyšuje celkové náklady a z hľadiska požiadavky návratnosti investícií nie je vhodným.



Obr. 4. Zníženie výkonu pri rôznom zatínení FV modulu s ochrannými premost'ovacími diódami (modul B).



Obr. 5. V-A charakteristika modulu s ochrannými premost'ovacími diódami.

3 Analýza hybridnej FVE

Analyzovaná hybridná FVE s inštalovaným výkonom 2,6 kWp je vyhotovená pre rodinný dom na západnom Slovensku. Hybridný systém má obmedzenie na export do distribučnej siete. Pre čo najefektívnejšie využitie vyprodukovanej elektrickej energie z FVE je hlavný domový rozvádzač upravený, pričom inštalovaný výkon spotrebičov v domácnosti je vo výraznej miere pripojený na jednu fázu. Do spomínanej fázy je exportovaná energia z FVE pomocou 1- fázového hybridného meniča Victron.

Samotný systém sa skladá z komponentov:

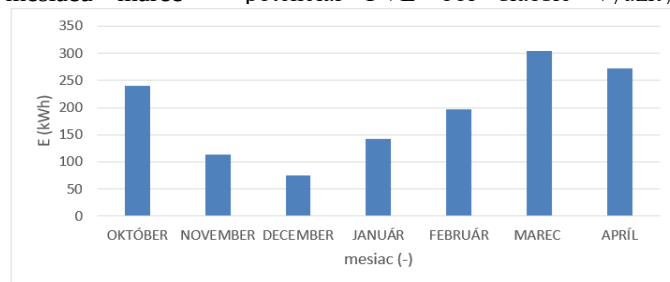
- 9x polykrystalické moduly Amerisolar AS-6P30 (orientácia - juh, sklon = 35 °). Moduly sú prepojené sériovo-parallelne. Tri sériovo radené moduly tvoria jednu paralelnú vetvu. Celkovo je systém zložený z troch paralelných vetiev.
- MPPT regulátor nabíjania Victron Energy BlueSolar 150/45
- 2 x batéria LiFePO₄ Polyntech US2000C (využitelná kapacita 2 x 2280 Wh)
- Hybridný menič Victron Multiplus 48/3000/35
- Victron Energy Venus GX

Analýza prebehla z dát získaných za obdobie 7 mesiacov (október 2021 – apríl 2022). Namerané dáta boli ukladané s periódou 1 minúty.

3.1 Produkcia elektrickej energie

Množstvo elektrickej energie získanej z hybridnej FVE nie je závislé len od atmosférických podmienok. Výroba je ovplyvnená aj technickými riešeniami samotnej FVE, obzvlášť od kapacity akumulátora a spotreby elektrickej energie. Obr. 6 zobrazuje množstvo elektrickej energie získanej pomocou hybridnej FVE v skúmaných mesiacoch. „Najslabším“ mesiacom z pohľadu výroby elektrickej energie bol december, v ktorom bola výroba výrazne znížená nedostatočným množstvom slnečného žiarenia, zlým uhlom dopadu slnečných lúčov na FV moduly, ale najmä zasnežením modulov počas piatich dní. Najviac vyrobenej elektrickej energie bolo v marci a mierny pokles pozorujeme v apríli. Pokles bol spôsobený relatívne veľkými aprílovými rozdielmi v oblačnosti, ale aj menším množstvom odoberanej elektrickej energie voči

mesiacu marec – potenciál FVE bol slabšie využitý.



Obr. 6. Množstvo elektrickej energie získanej z hybridnej FVE v mesiacoch október - apríl

Názorným ukazovateľom závislosti medzi mierou produkcie FVE, spotrebou elektrickej energie a veľkosťou batérie pri hybridných systémoch bez exportu do siete je tabuľka 1. Vyjadruje počet minút, v ktorých dochádzalo k zníženiu výkonu FVE v dôsledku nabitia batérie a nízkeho odberu elektrickej energie objektu. Znižovanie výkonu FV sústavy obzvlášť v čase vysokej intenzity žiarenia bolo najvýraznejšie v mesiacoch október, marec, apríl. Za určitých podmienok bolo zníženie produkcie až o 99 % voči potenciálu sústavy. Je nutné podotknúť, že pri zlom rozložení inštalovaného výkonu spotrebičov medzi fázami a inštalácii 1-fázového meniča môže byť obmedzenie výkonu FVE ešte výraznejšie.

Tab. 1. Počet minút, v ktorých dochádzalo k zníženiu výkonu FVE v dôsledku nabitia batérie a nízkeho odberu elektrickej energie objektu

Mesiac (-)	Čas (min)
Október	2838
November	1210
December	1195
Január	1360
Február	1246
Marec	2910
Apríl	3362

Jedným z riešení na lepšie využitie energetického potenciálu FVE môže byť automatizácia systému. Moderné meniče disponujú možnosťou komunikácie rôznymi protokolmi (Modbus,...). Automatizáciou FVE s inteligentnými zariadeniami (bojler, TČ, klimatizácia, ...) je možné zvýšiť energetický potenciál FV, ale aj skrátiť návratnosť inštalácie. Integráciu FV meničov do automatizácií poskytujú rôzne softvéry, ako napríklad Home Assistant. Nevýhodou takéhoto riešenia môže byť pomerne zložitý algoritmus, pre efektívnu a zmysluplnú prevádzku.

3.2 MPPT regulátor nabíjania

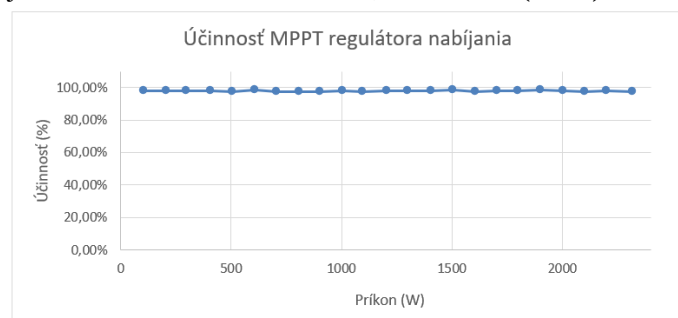
Na tvar V-A charakteristiky a polohu maximálneho bodu výkonu FV modulov vplyvajú rôzne vonkajšie vplyvy ako je intenzita žiarenia, teplota okolia, zatienenie a pod. Z tohto dôvodu sa na zvýšenie produkcie z FV modulov používajú MPPT regulátory. Sú to zariadenia monitorujúce V-A charakteristiku, ktoré vyhľadávajú bod maximálneho výkonu [2]. Ich aplikácia do FV systémov je v súčasnosti veľmi rozšírená. MPPT regulátory môžu byť využívané pre každú

modul samostatne (optimalizéry), alebo sa inštalujú pre FV polia t.j. skupinu vzájomne prepojených modulov.

MPPT regulátor samostatne pre každý modul umožňuje, aby každý fotovoltický modul sústavy pracoval vo svojom maximálnom bode výkonu. Metóda využíva meniče DC/DC určené pre každý modul zvlášť, ktoré sú následne prepojené do centrálného meniča. Riešenie je z hľadiska účinnosti veľmi žiaduce najmä v prostrediach s čiastočným zatienením. Avšak v podmienkach, kde nedochádza k čiastočnému tieneniu je takéto vyhotovenie nepotrebné a zvyšuje počiatočné investičné náklady.

MPPT regulátor pre FV pole - inštalácia jedného MPPT regulátora pre FV pole je ekonomickejšou voľbou ako vyššie spomenutý prípad. MPPT regulátor nevyhľadáva bod maximálneho výkonu jedného modulu, ale vzájomne pospájaných modulov do poľa.

Pri MPPT regulátoroch sa všeobecne uvádzajú vysoké účinnosti (spravidla nad 95 %). Victron Energy BlueSolar 150/45 má deklarovanú maximálnu účinnosť 98 %. Výrobcom udávaná hodnota bola potvrdená aj meraním, pričom účinnosť bola vyhodnocovaná z dát napätia a prúdu zo vstupu a výstupu MPPT regulátora. Účinnosť počas celého pracovného rozsahu je takmer konštantná na úrovni 97,5 % až 98 % (obr. 7).



Obr. 7. Závislosť účinnosti MPPT regulátora nabíjania od príkonu.

3.3 Batéria LiFePo4

Pre efektívnu prácu hybridnej FVE je nutné splniť 3 hlavné kritériá súvisiace s batériovým systémom:

1. Voľba batériového systému s nízkymi stratami elektrickej energie.
2. Výber batérie s vhodne nadimenzovanou kapacitou k odberu elektrickej energie objektu a inštalovanému výkonu FVE.
3. Výber batérie s nízkou degradáciou.

Batéria Polyntech US2000C bola vyhodnotená z hľadiska strát elektrickej energie. Keďže skúmaná FVE elektrárň bola v neustálej prevádzke, nebolo možné nasimulovať procesy (nabitie, vybitie, ...) batérie v laboratórnych podmienkach. Informácie o stave systému sme čerpali z ovládacieho panela FVE, ktorý ukladá parametre batériového systému ako napríklad aktuálny nabíjaci/vybíjaci výkon, teplotu batérie, stav nabitia batérie, percentuálnu degradáciu batérie. Analýza strát elektrickej energie bola vykonaná dvomi metódami.

Prvá metóda využila k výpočtom parametre získané za jeden deň prevádzky. Analyzovali sa toky energií, pričom v počiatočnom stave bola batéria nabitá na 30 %. Následne prebiehal cyklus nabíjania a vybíjania batérie a koncové vybitie bolo opäť na úroveň 30 %. Zo získaných a vypočítaných dát

bolo zistené, že straty v batériovom systéme sú na úrovni 7 %. Pre zamedzenie nožnej výpočtovej chyby spôsobenej z nepresnej percentuálnej indikácie stavu nabitia resp. chybe meracieho zariadenia, bola vykonaná analýza aj inou metódou.

Druhou metódou sa vyhodnocovali toky elektrickej energie z výstupu MPPT regulátora nabíjania a vstupu do meniča. Túto overovaciu metódu sme mohli zvoliť z dôvodu, že jediným elementom sústavy FVE medzi MPPT regulátorom nabíjania a meničom je batériový systém (batéria + nabíjačka). Vyhodnotenie prebiehalo z dát nazbieraných počas dvoch mesiacov. Straty batériového systému vyjadrené z tejto analýzy boli na úrovni 6,5 %. Vidíme, že výsledky z dvoch rozličných metód výpočtu sú takmer totožné a s vysokou pravdepodobnosťou odzrkadľujú skutočnosť – presnú mieru strát. Taktiež môžeme usúdiť, že batériový systém je z hľadiska účinnosti vhodne zvolený k použitiu vo FVE.

3.4 Účinnosť hybridného meniča Victron Multiplus 48/3000/35

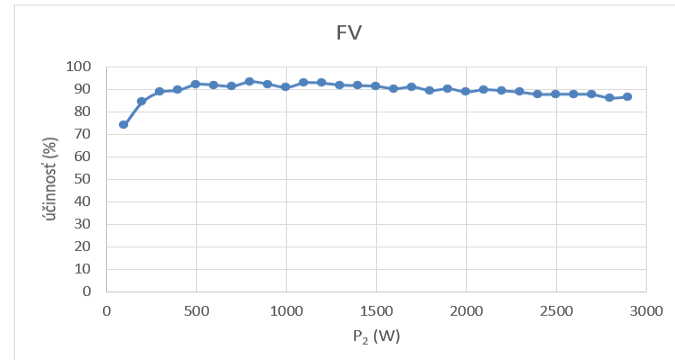
Hybridné meniče na rozdiel od sieťových meničov a meničov používaných na ostrovnú prevádzku sú schopné pracovať v troch rozličných režimoch:

- Výstupná elektrická energia je zabezpečená len pomocou energie z batérie, resp. priamo z FV modulov.
- Výstupná elektrická energia je zabezpečená len zo siete (v prípade vybitia batérie a podmienok, v ktorých FV moduly „nevyrábajú“ elektrickú energiu).
- Kombináciou oboch foriem naraz (FV + sieť)

Predmetom merania bolo vyjadrenie účinnosti v rôznych pracovných podmienkach meniča a zhodnotenie, či nedochádza k znižovaniu účinnosti obzvlášť v kombinovanej prevádzke (FV+ sieť).

a) Menič pracujúci bez siete

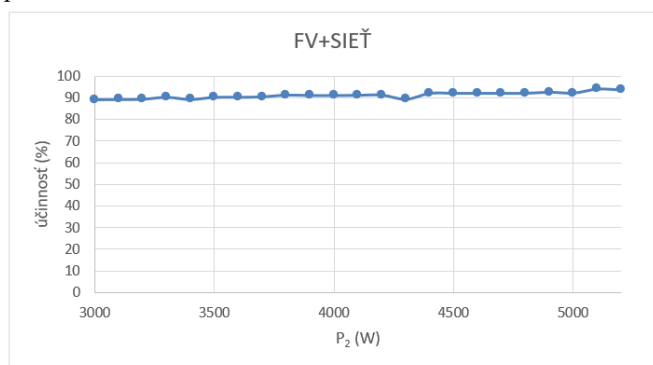
Účinnosť meniča pri práci bez elektrickej energie je zobrazená na obr. 8. Vidíme, že pri výstupnom výkone $P_2 = 100$ W je účinnosť na úrovni 74 %. Je to spôsobené primárne vlastnou spotrebou meniča. Účinnosť postupne stúpala, pričom najvyššiu hodnotu sme zaznamenali pri výstupnom výkone $P_2 = 800$ W. Následne je možné pozorovať mierny pokles účinnosti. FV sústava dokáže pracovať samostatne bez nutnosti odberu elektrickej energie zo siete po výstupný výkon $P_2 = 2900$ W. V tomto bode je účinnosť na úrovni 86 %.



Obr. 8. Závislosť účinnosti od výstupného výkonu – prípad „a“

b) Menič kombinujúci elektrickú energiu z FV a siete

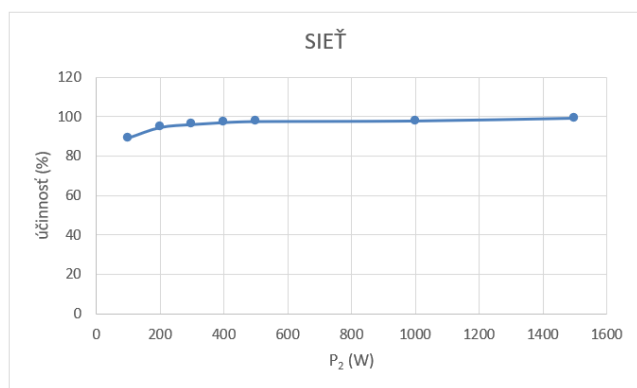
Meranie prebiehalo vo výkonovom spektre, kde menič nie je schopný pracovať bez dodávky elektrickej energie zo siete. Počas merania boli batérie dostatočne nabité, aby sme dosiahli homogenitu merania z hľadiska dodávky elektrickej energie zo strany DC. Predpoklad zníženia účinnosti meniča pri hybridnej práci z dôvodu nevhodnosti spôsobenej kombináciou energií z dvoch zdrojov sa nenaplnil. Naopak v meranom intervale $3000 \text{ W} \leq P_2 \leq 5200 \text{ W}$ účinnosť meniča stúpala. Bolo to spôsobené zvyšovaním podielu elektrickej energie zo siete, voči energii dodávanej zo strany DC. $P_2 = 5200 \text{ W}$ je zároveň maximálny výstupný výkon, ktorý bol menič schopný dodávať pri danom zhotovení FVE.



Obr. 9. Závislosť účinnosti od výstupného výkonu – prípad „b“

c) Menič pracujúci bez elektrickej energie zo strany DC

Úlohou merania bolo zistiť množstvo strát na meniči, ak pracuje len s elektrickou energiou zo siete. Menič využíva elektrickú energiu len zo siete obzvlášť v zimných nočných hodinách, keď je batéria nedostatočne nabitá. Ako je vidieť z obr. 10, straty pri tomto režime sú minimálne a sú spôsobené len vlastnou spotrebou meniča. Odoberaný výkon na chod meniča je 15 – 20 W.



Obr. 10. Závislosť účinnosti od výstupného výkonu – prípad „c“

4 Analýza sieťovej FVE

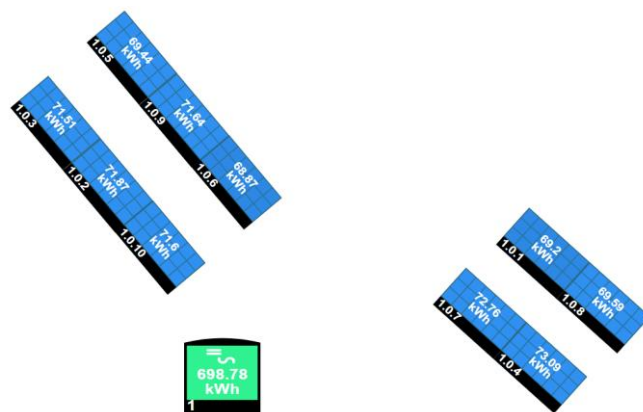
Analýzovaná sieťová FVE má inštalovaný výkon 3,95 kWp. Vyprodukovaná energia je spotrebovaná rodinným domom a prebytok elektrickej energie je exportovaný do distribučnej siete.

Zoznam komponentov FV systému:

- 10x monokrystalický modul Trina Solar Energy TSM – 395DE09.08 (orientácia - juhozápad, sklon = 14 °). Moduly sú prepojené sériovo s využitím optimizérov.
- 10x optimizér SolarEdge S440
- Sieťový menič SolarEdge SE 4000H

4.1 (Ne)potreba použitia optimizérov

Ako už bolo spomenuté v predošlej kapitole, optimizéry v oblastiach s minimálnym lokálnym tienením nezvyšujú výrazným spôsobom produkciu FVE a je ich možné označiť za nepotrebné. Tento fakt sa potvrdil aj pri skúmanej FVE, kde dochádzalo k lokálnemu tieneniu len v ranných a večerných hodinách od atiky.



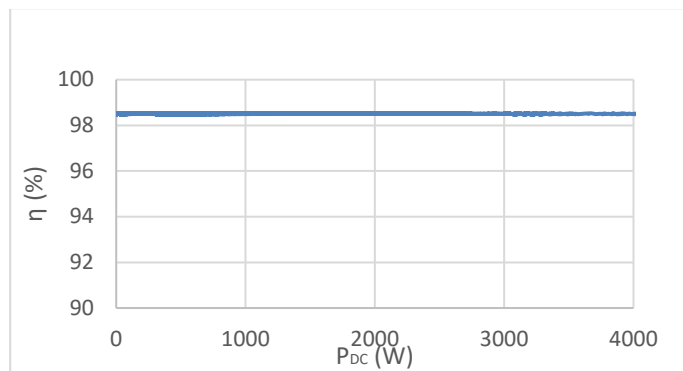
Obr. 11. Produkcia elektrickej energie z modulov za 2 mesiace prevádzky – export fotografie z aplikácie SolarEdge.

Z obr. 11 vidieť malé rozdiely z hľadiska produkcie elektrickej energie jednotlivých FV modulov. Rozdiely sú zanedbateľné obzvlášť pri uvažovaní faktov z kapitoly č. 2, ktorá poukazuje na výrazný vplyv lokálneho tienenia na produkciu modulu. Pri skúmanej FVE je možné konštatovať slabé lokálne tienenie modulov, ale aj nepomer zvýšenia produkcie elektrickej energie voči navýšeniu nákladov inštalácie. Výhodou daného riešenia teda nie je možnosť výrazného navýšenia produkcie FVE, ale možnosť monitoringu všetkých FV modulov samostatne, s čím je umožnená ľahká detekcia prípadného poškodenia modulu.

4.2 Účinnosť sieťového meniča SolarEdge SE 4000H

Chod sieťového meniča nie je ovplyvňovaný faktormi ako pri hybridných meničoch, kde dochádza k rôznym pracovným cyklom meniča, ale len od aktuálneho výkonu z FV modulov.

Z nameraných dát pozorujeme takmer konštantnú účinnosť meniča v celom pracovnom rozsahu na úrovni 98,5 %. Účinnosť počas meraní nebola ovplyvnená ani zvýšením výkonu z modulov a ani trvalou prevádzkou meniča v oblasti maximálneho výkonu.

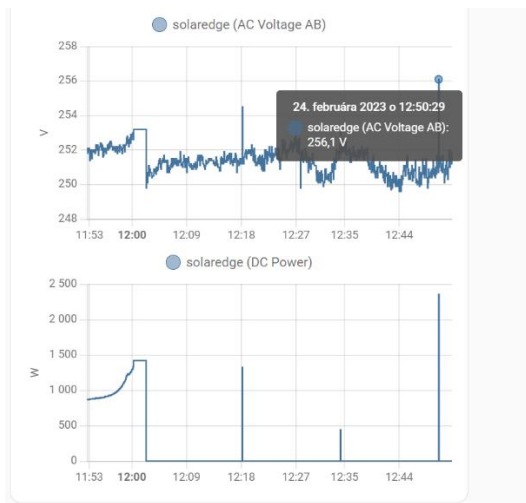


Obr. 12. Závislosť účinnosti meniča Solaredge od výkonu z FV modulov

4.3 Vplyv FVE na sieťové napätie

Implementácia fotovoltických elektrární do distribučnej siete výrazným spôsobom ovplyvňuje jej parametre. Obzvlášť evidentná je lokálna zmena sieťového napätia, kde vplyvom výkonu dodávaného z FVE dochádza k jeho navýšeniu. Dôvodom je zníženie strát, resp. zmenšenie úbytkov napätia na distribučnom rozvode.

Pri slabo nadimenzovanom vedení medzi meničom a distribučným rozvodom a zároveň nesprávne nastavenom distribučnom transformátore môže byť sieťová FVE takmer trvalo odpájaná. Názorným príkladom bol aj skúmaný FV systém pripojený k distribučnej sieti. Hodnota sieťového napätia bola trvalo blízka k 253 V (maximálne dovolené napätie v NN sieti) už bez pripojeného lokálneho zdroja. Pripojením FVE k sieti nastávalo zvýšenie napätia meraného na sieťovom meniči nad 253 V, čo spôsobilo odpojenie meniča od siete na 15 minút.

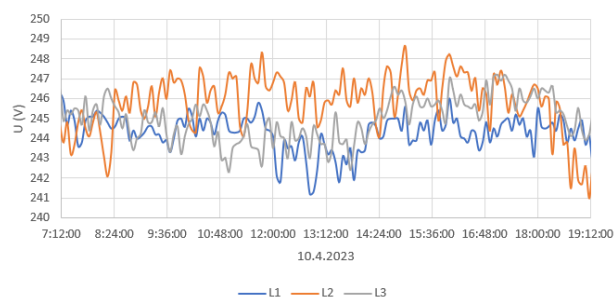


Obr. 13. Grafické znázornenie výkonu z FV modulov a napätia na meniči v čase

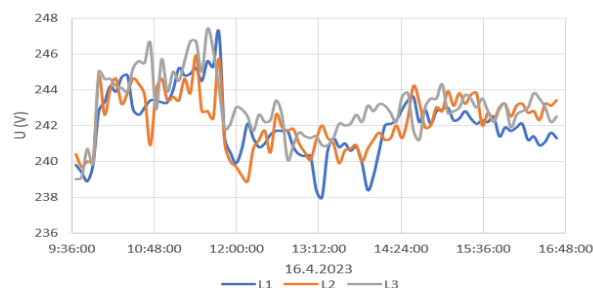
Z obr. 13 vidieť jednak trvalo vysoké sieťové napätie, zároveň však pozorujeme výrazné „špičky“ po pripojení FVE k sieti. Pri dodávanom výkone 2400 W z FV modulov bol nárast napätia na neprípustnú hodnotu 256,1 V; čo spôsobilo okamžité odpojenie. Takáto konfigurácia bola v praxi nepoužiteľná, pretože fotovoltická elektráreň nebola schopná produkcie ani pri chode na polovičný výkon. Po podaní sťažnosti na prevádzkovateľa distribučnej sústavy o vzniknutých

problémoch a následnom prestavení odbočky distribučného transformátora bola produkcia FVE do siete umožnená.

Pripojenie FVE k sieti nespôsobuje len zvýšenie napätia. Spôsobovať môže aj nesymetriu napätia medzi fázami, obzvlášť pri jednofázovom vyhotovení FV systému. Nesymetria sa potvrdila aj praktickým meraním pomocou „smart“ elektromera nainštalovaného v elektromerovom rozvádzači. Nasledujúce grafické zobrazenia ukazujú na rozdiely medzi jednotlivými fázami, ak je FVE pripojená k sieti a je ideálny snečný deň a ak je FVE odpojená. FVE je pripojená na fázu L2.



Obr. 14. Napätia jednotlivých fáz – snečný deň, pripojená FV



Obr. 15. Napätia jednotlivých fáz – odpojená FV

Zvýšenie napätia vo fáze, kde je dodávaná elektrická z FVE je značné a výrazne prevyšuje napätie v ostatných fázach. Toto môže prinášať výrazné problémy v sieti obzvlášť pri pripojení viacerých lokálnych zdrojov so zlým rozložením výkonu vo fázach.

5 Záver

Práca prináša komplexný pohľad na komponenty fotovoltických elektrární používané v bežných aplikáciách z hľadiska ich funkcií, prevádzky a účinnosti. Poukázala na možné problémy (vplyv tienenia na moduly, zmena napätia siete pripojením FVE a iné), ale aj výhody jednotlivých systémov (účinnosti komponentov, použitie premostovacích diód). Je zrejmé, že zdanlivo jednoduchý systém – fotovoltika, musí byť správne navrhnutý, zrealizovaný a prevádzkovaný, aby bola väčšina negatív v čo najväčšej miere eliminovaná.

Podakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Medzinárodné centrum excelentnosti pre výskum inteligentných a bezpečných informačno-komunikačných technológií a systémov – II. etapa, Kód ITMS: 313021W404, ktorý je spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Zároveň tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0157 pre projekt „Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií“, a zmluvy č. APVV-19-0049 pre projekt „Výskum starnutia elektroizolačných systémov, zmeny životnosti používaných materiálov po zavedení nových EÚ regulácií (RoHS, REACH)“.

Literatúra

- [1] T S. SILVESTRE, A. BORONAT, A. CHOUDER. 2009. Study of bypass diodes configuration on PV modules, Applied Energy, Volume 86, Issue 9, 2009, Pages 1632-1640, ISSN 0306-2619.
- [2] GARCÍA, EMILIO, EDUARDO QUILES, ANTONIO CORRECHER, AND FRANCISCO MORANT. 2022. Predictive Diagnosis Based on Predictor Symptoms for Isolated Photovoltaic Systems Using MPPT Charge Regulators. Sensors 22, no. 20: 7819.

Sekcia 4

Elektronika a fotonika

Návrh a realizácia hardvéru pre elektrickú charakterizáciu a testovanie integrovaných obvodov

Emma Puváková, Peter Benko, Peter Gurnik

Ústav elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave

xpuvakova@stuba.sk

Abstrakt – V príspevku sa zaoberáme návrhom a realizáciou hardvéru určeného pre elektrickú charakterizáciu a testovanie integrovaných obvodov pri ich vývoji. Je tu v krátkosti popísaná aj dôležitosť testovania vrátane základných špecifických testov. Riešenie je navrhnuté pre konkrétne automatické testovacie zariadenie a je realizované v spolupráci so spoločnosťou ON Semiconductor Slovakia, a.s. Nami navrhnutý hardvér umožňuje vykonávať testovanie integrovaného obvodu až so štyridsiatimi ôsmimi vývodmi.

1 Úvod

Významnú úlohu v procese vývoja a výroby integrovaného obvodu zohráva jeho testovanie, ktoré výrazne prispieva ku znižovaniu nákladov zo strany výrobcu a ku zvyšovaniu kvality a spoľahlivosti výsledného produktu vo finálnej aplikácii. S testovaním sa stretávame v takmer všetkých etapách vývoja integrovaných obvodov. Mimoriadny význam má charakterizácia obvodu, ktorá však predstavuje časovo náročný úkon, preto sa vykonáva iba pri vývoji a pri produkčnom testovaní sa vynecháva.

V spolupráci so spoločnosťou ON Semiconductor Slovakia, a.s. sme vyvinuli testovací hardvér určený pre automatické testovacie zariadenie ETS-364, ktorý umožňuje charakterizovať a testovať integrované obvody až so štyridsiatimi ôsmimi vývodmi (pinmi).

2 Testovanie integrovaných obvodov

Testovanie integrovaných obvodov je významným elementom pri vývoji nového produktu, overuje jeho špecifické vlastnosti, definuje jeho správanie pri rôznych podmienkach a verifikuje správnosť dizajnu. Produkčné testovanie overuje každú vyrobenú vzorku a preto musí byť rýchle a efektívne.

2.1 Charakterizácia, kontaktné a zvodové testy

Charakterizácia predstavuje proces vyhodnotenia základných elektrických a fyzických vlastností súčiastky a jej základom je štatistická analýza nameraných údajov. Výsledkom je zhodnotenie schopnosti testovanej súčiastky vykonávať požadované funkcie podľa definície produktu, spätná väzba pre navrhnutý dizajn a overenie špecifikácie

uvedenej v technickej dokumentácii produktu. Výstupy z charakterizácie sú následne použité taktiež na určenie limitov pre testy v produkčnom testovaní. Hneď na začiatku vývoja produktu je zásadné určiť schopnosť ochrany súčiastky pred elektrostatickým výbojom (ESD) a mikroprierazom (Latch-up), ktorý môže vzniknúť vytvorením skratu v rámci integrovaného obvodu, čo môže viesť k jeho zničeniu [1]. Významným a smerodajným parametrom pri analýze dát je index spôsobilosti procesu C_{pk} (Process capability index), ktorý určuje pomer variability procesu k špecifikácii, pričom uvažuje odchýlku strednej hodnoty od požadovanej. Charakterizácia je veľmi zdĺhavá a vykonáva sa iba pri vývoji produktu. Pre produkčné testovanie využívame na overenie funkčnosti vyrobenej zapuzdrenej súčiastky kontaktné a zvodové testy. Tieto sa uskutočnia ako prvé, aby v prípade, že súčiastka nimi neprejde, nepokračovala ďalej v procese výroby.

Kontaktné testy overujú správnosť elektrických prepojení medzi testovanou súčiastkou a testovacím zariadením, a zvyčajne overujú prítomnosť ochranných obvodov na čipe. Zvodové testy zväčša odhaľujú fyzické defekty súčiastok ako napríklad zvyšky kovových vlákien alebo častíc vytvárajúcich skraty a vodivé cesty medzi vrstvami, čo sa prejaví nárastom prúdu [2].

2.2 Štvorvodičové meranie

Meranie malých odporov sa prednostne realizuje pomocou Kelvinovej štvorvodičovej metódy. Pri meraní sa využívajú štyri vodiče, pričom dva vodiče, nazývané „force“, vynucujú prúd I a ďalšími dvoma vodičmi, nazývanými „sense“, je merané napätie U na meranej súčiastke (napr. odpore, dióde). Vďaka tomuto prístupu sa získa čo najpresnejšia hodnota meranej veličiny, pretože pokles napätia na meracích vodičoch je zanedbateľne nízky [3].

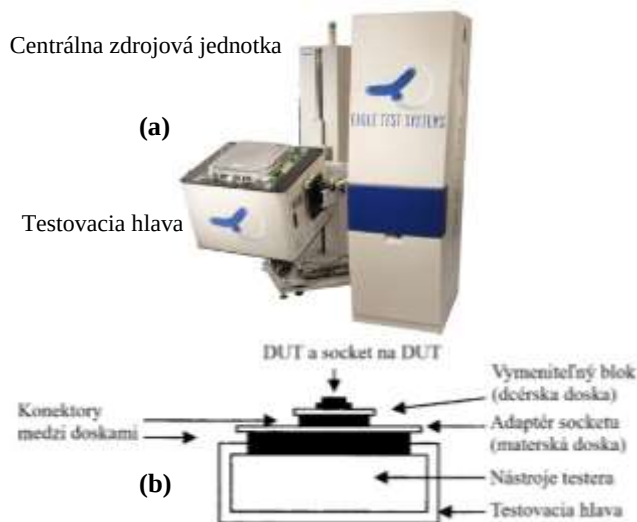
3 Návrh riešenia problematiky

V rámci návrhu hardvéru sme sa zaoberali vývojom takzvanej dcérskej a adaptačnej dosky pre existujúcu materskú dosku vytvorenú pre konkrétne automatické testovacie zariadenie ETS-364.

3.1 Návrh hardvéru pre automatické testovacie zariadenie ETS-364

Automatické testovacie zariadenie ETS-364 je univerzálna testovacia platforma určená na testovanie integrovaných obvodov meraním analógových a zmiešaných signálov. Hlavnou súčasťou tohto zariadenia je centrálna zdrojová jednotka, ktorá obsahuje rôzne typy zdrojových a meracích prostriedkov. Ovládanie testovacieho zariadenia je realizované príslušným softvérom prostredníctvom počítača (Obr. 1. (a)) [4].

Pre túto testovaciu platformu sme pre univerzálnosť použitia vytvorili návrh dcérskej aj adaptačnej dosky. Adaptačná doska, vytvárajúca kontakt s testovanou súčiastkou, sa pripája na dcérsku dosku, ktorá je následne nasadená na materskú. Materská doska sa potom kontaktuje na hlavu testera (Obr. 1. (b)).



Obr. 1. Testovací hardvér: (a) automatické testovacie zariadenie ETS-364 [4], (b) doska rozhrania [3].

Na naše účely sme zo zdrojových prostriedkov testovacieho zariadenia využili jednotky typu APU (Analog Pin Unit), SPU (Smart Pin Unit), DPU (Digital Pin Unit) a CBU (Control Bit Unit).

Jednotky APU a SPU sú zdrojom napätia a prúdu schopné zároveň merania týchto veličín využívajú štvorvodičovú metódu. Vďaka jednotke CBU je k dispozícii 64 kontrolných programovateľných jednotiek C-Bit, ktoré používame na ovládanie relé. Jednotka DPU nám poskytuje 16 vstupno-výstupných kanálov pre digitálne riadenie hardvéru a komunikáciu.

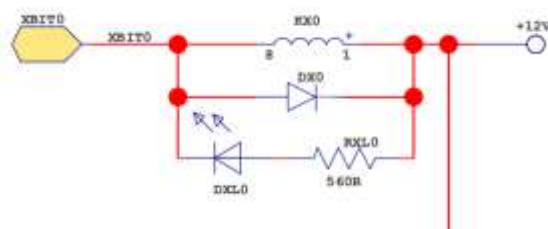
3.2 Návrh a realizácia dcérskej dosky

Návrh schém sme realizovali v programe Xpedition Designer. Schému dcérskej dosky sme navrhli tak, aby bolo možné na každý vývod pripojiť APU zdroj aj SPU zdroj. APU zdrojov sme mali k dispozícii 48, preto je návrh realizovaný pre maximálne 48-vývodovú súčiastku, pričom SPU zdrojov je dostupných iba 8. Výhodou SPU zdrojov je ich väčší napäťový a prúdový rozsah, avšak pre väčší počet APU

zdrojov sme tieto predvolene pripojili na jednotlivé cesty k vývodu. Jeden SPU zdroj sme vždy priradili každým 6 APU zdrojom, pričom prepínanie medzi nimi sme pre každú cestu k vývodu realizovali prostredníctvom relé. Príklad pre pripojenie napájacích vodičov typu „force“ pre 6 APU zdrojov a jeden SPU zdroj je zobrazený na Obr. 2. Analogicky sme priradili zvyšné zdroje pre napájacie aj meracie vodiče typu „high“. Každé relé má paralelne pripojenú ochrannú diódu a LED diódu zapojenú sériovo s rezistorom pre zníženie jej jasu, ktorá signalizuje zopnutie tohto relé a tým vytvorenie vodivej cesty s SPU zdrojom (Obr. 3.).

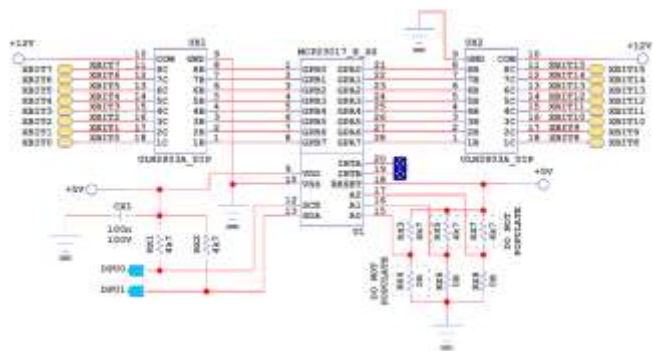


Obr. 2. Pripojenie APU a SPU zdrojov prostredníctvom relé na vodivé cesty prvku pre vytvorenie kontaktov.



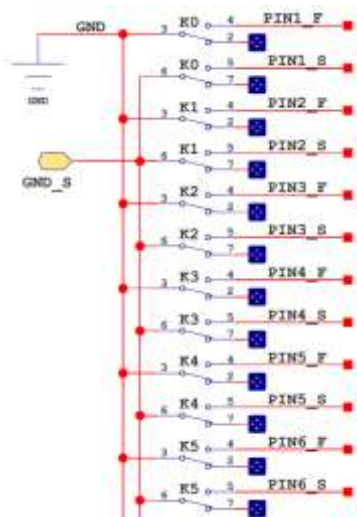
Obr. 3. Pripojenie napájania a LED signalizácie na relé.

Relé, ktorými vytvárame vodivé spojenie medzi požadovaným zdrojom a cestou k vývodu, ovládame prostredníctvom I²C komunikácie. Prostredníctvom DPU jednotiek sme vytvorili riadenie 16-bitového expanderu MCP23017, ktorý poskytuje 16 vstupov a výstupov. Tento typ komunikácie funguje na základe odosielania a prijímania binárnych správ na napäťovej úrovni 5 V, a to vďaka pripojeniu dvoch signálových vodičov. Kanál SDA (Serial Data) poskytuje dátový signál a kanál SCL (Serial Clock) je zdrojom hodinového signálu. Ide o komunikáciu typu „master-slave“, kedy master je na zbernici vždy len jeden, zatiaľ čo slave-ov môže byť pripojených viac a každý z nich má svoju adresu. Odosielané správy obsahujú na začiatku adresu a v prípade zhody začne daný slave na komunikáciu reagovať. Keďže použité relé má napájanie +12 V a I²C komunikácia ovládajúca tieto relé je realizovaná na napäťovej úrovni +5 V, pre kompatibilitu napätí sme potrebovali použiť NPN Darlingtonov tranzistor. Pre požadované pripojenie 48 vývodov sme v návrhu použili 3 takéto zapojenia (Obr. 4) pre I²C komunikáciu a každému zapojeniu sme pre signálové vodiče priradili osobitné DPU jednotky, a tak pre každého master-a máme práve jeden slave.

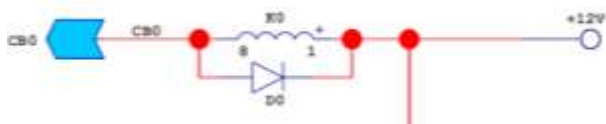


Obr. 4. Pripojenie expanderu pre vytvorenie I²C komunikácie.

Pre možnosť pripojenia vývodov testovanej súčiastky k zemi (GND) sme využili relé, pričom predvolene v nezopnutom stave sú vývody v stave „floating“ a po zopnutí relé je vývod uzemnený (Obr. 5.). Na ovládanie relé sme využili C-Bit jednotky. Pre napájanie relé sme opäť využili napäťovú úroveň +12 V a paralelne sme pripojili ochrannú diódu (Obr. 6.).

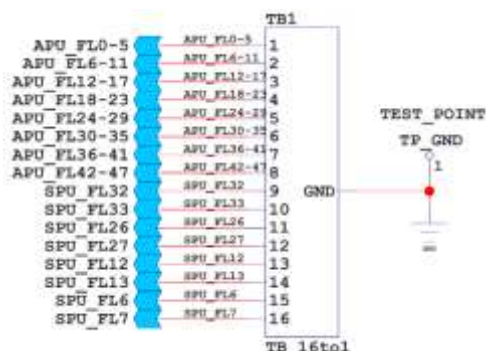


Obr. 5. Prepínanie medzi zemou a stavom „floating“ prostredníctvom relé.



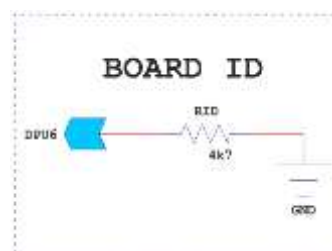
Obr. 6. Pripojenie napájania pre relé.

APU zdroje sú v zdrojových bankách usporiadané po šiesticiach tak, že každý zdroj má vlastný merací a napájací vodič typu „high“, ale merací a napájací vodič typu „low“ je pre celú šesticu zdrojov v banke spoločný. V programe Xpedition Library Manager sme pre uzemnenie vodičov typu „low“ vytvorili prvok zvaný „tiebar“. Táto slúži na spojenie viacerých ciest nakrátko, resp. prepojenie niekoľkých vodivých ciest s rôznymi názvami do jedného spoločného (Obr. 7.).



Obr. 7. Prepojenie uzemnení napájacích vodičov.

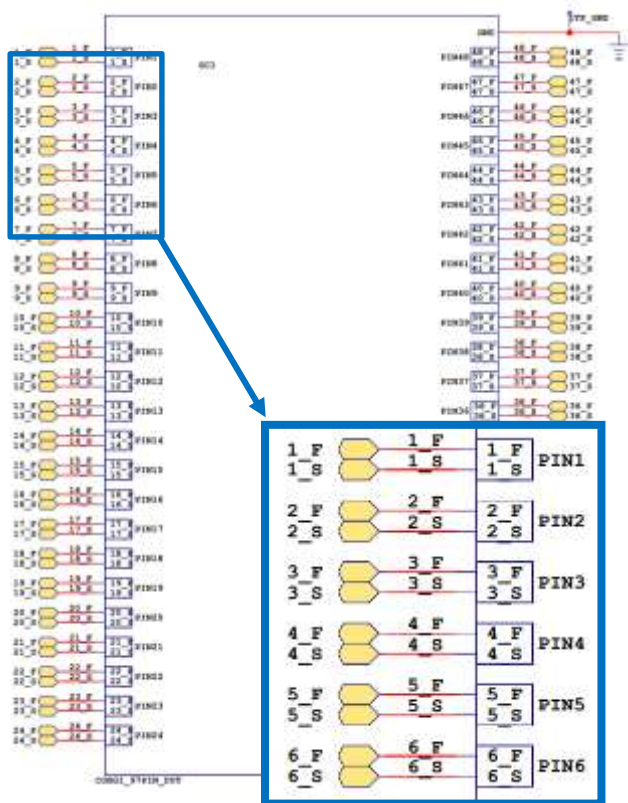
Na dcérsku dosku sme priviedli z testovacej hlavy napájanie napäťových úrovni +5 V a +12 V, a to prostredníctvom materskej dosky. Pre signalizáciu správneho pripojenia napäťových úrovni na dcérsku dosku sme využili signalizáciu prostredníctvom LED diód. Pomocou DPU jednotky sme vytvorili aj možnosť identifikácie dosky. Meraním hodnoty pripojeného rezistora môže testovací program detegovať či je na hlavu testera pripojený požadovaný testovací hardvér (Obr. 8.).



Obr. 8. Identifikácia dosky.

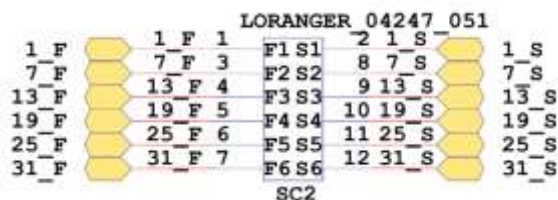
3.3 Návrh a realizácia adaptačnej dosky

Každý integrovaný obvod môže mať rôzne mechanické a fyzické vlastnosti, a preto môže byť zapuzdrený do rôznych normalizovaných puzdiel, ktorých je na trhu niekoľko desiatok. Z tohto dôvodu sme pre zabezpečenie univerzálnosti navrhnutého hardvéru vytvorili všeobecný 97 vývodový prvok, ktorý predstavuje rozhranie pre prepojenie dcérskej dosky s adaptačnou doskou. Adaptačná doska, známa aj ako DUT (Device Under Test) doska, sa skladá z dvoch elektronických prvkov, z protiahlého kontaktného prvku, ktorým vytvoríme kontakty s dcérskou doskou, a päticou (socket), ktorá je špecifická pre každý integrovaný obvod. Navrhnutý kontaktný prvok (Obr. 9.) má k dispozícii 48 párov vývodov, ktoré sme vyhradili pre kontaktovanie päťice konkrétneho typu puzdra a jeden vývod predstavuje uzemnenie.



Obr. 9. Prvok slúžiaci pre vytvorenie kontaktov s adaptačnou doskou.

Pri návrhu adaptačnej dosky sme použili päťicu pre puzdro typu DPAK (Decawatt Package), známe aj pod označením TO-252, ktoré môže mať 3 alebo 5 vývodov a jeden dodatočný uzemnený tzv. „tab“ vývod. Na pripojenie jednotlivých vývodov testovanej súčiastky s týmto typom puzdra sme zvolili každý šiesty vývod navrhnutého prvku pre vytvorenie kontaktov s adaptačnou doskou (Obr. 10.). Ako sme uviedli v predchádzajúcej podkapitole, na 6 za sebou idúcich APU zdrojov pripadá jeden SPU zdroj a teda týmto priradením dosiahneme možnosť súčasného pripojenia SPU zdrojov na všetkých vývodoch testovaného integrovaného obvodu.

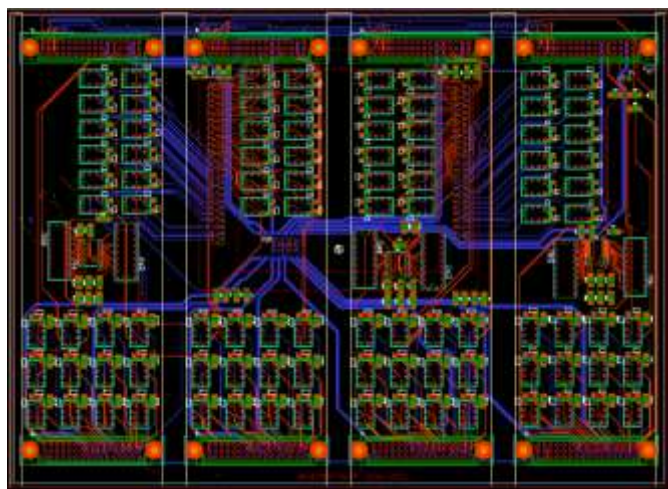


Obr. 10. Pripojenie vodivých ciest navrhnutého prvku k päťici určenej na testovanie súčiastky s typom puzdra TO-252.

Keďže pre každý typ puzdra integrovaného obvodu musí byť samostatne navrhnutá adaptačná doska, preto sme vytvorili šablónu, ktorou sme uľahčili navrhovanie adaptačných dosiek pre ďalšie typy päťíc. Zohľadnili sme aj testovanie pri rôznych teplotách a veľkosť adaptačnej dosky sme prispôbili veľkosti hlavy zariadenia, ktoré prúdením vzduchu nastavuje požadovanú teplotu na určitom mieste testovanej súčiastky.

3.4 Layout a osadenie dosiek

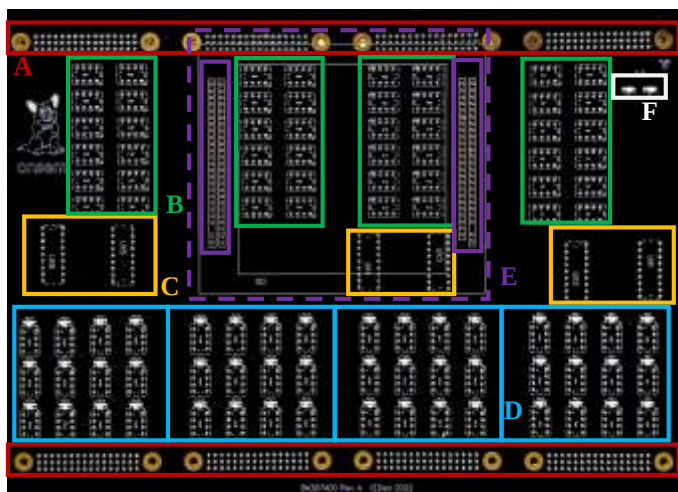
Layout, teda rozloženie vodivých ciest vo vrstvách na doske plošných spojov, sme vytvorili prostredníctvom programu Xpediton Layout. Na dcérskej doske sme cesty rozložili v 8 vrstvách, pričom pre každú sme si určili pravidlá pre ľahkú orientáciu v dizajne. Na Obr. 11 je zobrazené rozloženie vytvorených vodivých ciest pre prvú a poslednú vrstvu dizajnu dosky plošných spojov. V prvej (červenej) vrstve layout-u sme uložili všetky do priestoru zasahujúce elektronické súčiastky a do poslednej (modrej) vrstvy sme uložili LED diódy pre dostupnosť a jednoduchosť ladenia. Keďže layout sme realizovali pre pohľad na dosku zdola, pri zapojenom hardvéri je prvá (červená) vrstva najspodnejšia a posledná (modrá) vrstva najvrchnejšia.



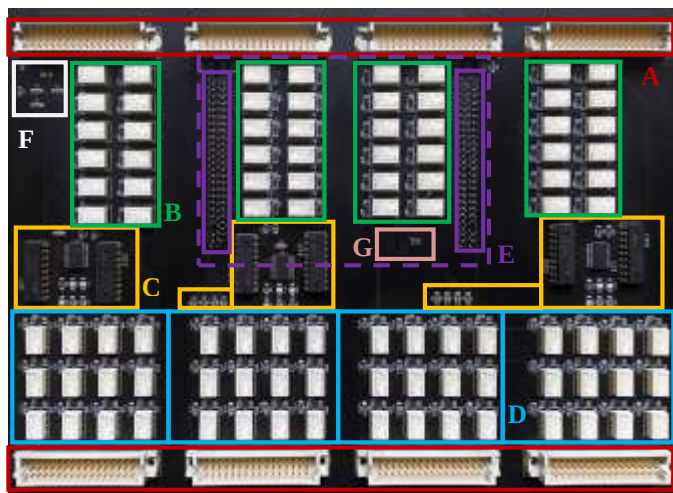
Obr. 11. Rozloženie vodivých ciest pre prvú a poslednú vrstvu dizajnu dosky plošných spojov.

Po výrobe sme obe dosky plošných spojov ručne osadili príslušnými súčiastkami. Na Obr. 12. je zobrazená osadená doska pri pohľade zhora (Obr. 12. (a)) a zdola (Obr. 12. (b)). Farebne sme vyznačili časti schémy, ktoré sme opísali v predchádzajúcich podkapitolách:

- (A) konektory na pripojenie s materskou doskou,
- (B) relé pre prepínanie medzi zemou a stavom „floating“ jednotlivých vývodov (Obr. 5., Obr. 6.),
- (C) zapojenie expanderov (I²C) pre ovládanie relé (Obr. 4.),
- (D) relé pre prepínanie medzi zdrojmi APU a SPU (Obr. 2., Obr. 3.),
- (E) prvok pre pripojenie DUT dosky,
- (F) LED signalizácia pripojenia napájania +5 V a +12 V a identifikácia dosky (Obr. 8.),
- (G) tiebar (Obr. 7.).



(a)

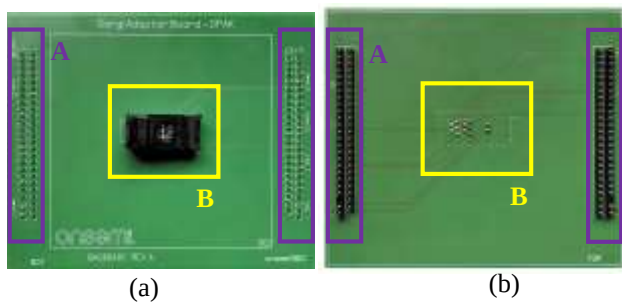


(b)

Obr. 12. Osadená doska pri pohľade (a) zhora a (b) zdola.

Osadená adaptačná doska je zobrazená na Obr. 13., pričom sme opäť vyznačili jej jednotlivé časti:

- (A) prvok pre pripojenie adaptačnej dosky k dcérskej doske (Obr. 9.),
- (B) päťica pre uloženie testovaného integrovaného obvodu (Obr. 10.).



(a)

(b)

Obr. 13. Osadená adaptačná doska pre puzdro typu DPAK pri pohľade (a) zhora a (b) zdola.

Pre vytvorený testovací hardvér je však potrebné vytvoriť aj softvérové prostriedky, ktoré budú riadiť testovanie a to testovací program v prostredí Visual Studio v jazyku C++. Myšlienkou je vytvoriť vstupný súbor, ktorý bude obsahovať dôležité informácie o testovanom obvode, bude definovaný pre každý integrovaný obvod zvlášť a bude obsahovať hodnoty rozsahov prúdov a napätí, v ktorých sa má vykonať meranie, stavy jednotlivých vývodov počas behu testov a podobne. Testovací program spracuje vstupný súbor a podľa neho vykoná testy. Vstupným súborom nesúcim špecifikáciu testovaného integrovaného obvodu zabezpečíme tiež všestrannú použiteľnosť oboch, hardvérových aj softvérových prostriedkov. Po testovaní by sa namerané dáta zapísali do výstupného súboru. Pre vytvorenie vstupného súboru a pre analýzu výstupných dát chceme vytvoriť aplikáciu s intuitívnym užívateľským prostredím využitím programovacieho jazyka C#. Aplikácia má taktiež umožniť grafické zobrazenie výstupov, s ktorými bude možné dynamicky pracovať.

4 Záver

Cieľom práce bolo vytvoriť hardvér pre automatizované testovanie integrovaných obvodov a ich charakterizáciu.

V prvej časti článku sme v krátkosti zhrnuli dôležitosť testovania, predstavili sme si charakterizáciu, kontaktné a zvodové testy a metódu štvorvodičového merania.

V druhej časti sme opísali testovacie zariadenie, pre ktoré sme navrhovali a realizovali testovací hardvér so špecifikovanými požiadavkami. Riešenie a návrh sme predstavili na jednotlivých častiach schémy, ktorú sme vytvorili využitím programu Xpedition Designer. Riešenie bolo v maximálnej miere navrhované predovšetkým za účelom univerzálnosti hardvéru. Pre existujúcu materskú dosku na vybranom automatickom testovacom zariadení sme navrhli dve dosky – dcérsku, ktorá sa nasadzuje na materskú dosku a umožňuje všeobecné využitie, a adaptačnú, ktorú pripájame na dcérsku dosku a predstavuje špecifické riešenie pre konkrétny typ puzdra testovaného integrovaného obvodu. Taktiež sme si ukázali rozloženie vodivých ciest na dvoch vrstvách dosky plošných spojov a ukázali sme si osadenú dosku, na ktorej sme zvýraznili opísané časti schém.

Pre vytvorený hardvér bude ďalej vyvinutý testovací program, ktorý bude riadiť proces testovania a aplikácia na zobrazenie nameraných dát. Tieto prostriedky bude možné využiť napríklad pri vývoji nového produktu a pri určovaní limitov pre produkčné testovanie.

Podakovanie

Ďakujem Ing. Petrovi Gurnikovi, PhD. za odborné vedenie a pomoc pri hľadaní riešenia v danej problematike, a technikovi Ing. Daliborovi Novotnému za pomoc a zaškolenie pre prácu s dizajnerským programom Xpedition. Taktiež ďakujem Ing. Petrovi Benkovi, PhD. za pedagogické vedenie a rady pri písaní. Ďakujem aj firme ON Semiconductor Slovakia, a.s. za poskytnutie prostriedkov umožňujúcich realizáciu navrhnutého riešenia.

Literatúra

- [1] http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q003A.pdf
- [2] BURNS, Mark a Gordon W. ROBERTS. *An introduction to mixed-signal IC test and measurement*. New York: Oxford University Press, 2001. ISBN 978-0-19-514016-3.
- [3] <https://www.tek.com/en/documents/product-article/keithley-low-level-measurements-handbook---7th-edition#C1section0>
- [4] <https://www.teradyne.com/products/ets-364/>

Simulácie elektrických, tepelných a magnetických vlastností výkonového MOS tranzistora v technológiách povrchovej montáže na DPS a zabudovania do DPS

Patrik Suhaj, Aleš Chvála

Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

xsuhaj@stuba.sk

Abstrakt – Práca sa zaoberá porovnaním elektrických, tepelných a magnetických simulácií výkonového MOS tranzistora v dvoch technológiách, konkrétne technológiu povrchovej montáže na DPS a technológiu zabudovania do DPS. V elektrickej simulácii sa zaoberáme simuláciou odporu v zopnutom stave $R_{DS(on)}$, simuláciou elektrického potenciálu a prúdovej hustoty. V tepelnej simulácii sa zaoberáme simuláciou tepelného odporu $R_{th(j-mb)}$ v stacionárnom stave, prechodovej tepelnej impedancie $Z_{th(j-mb)}$ v časovo závislom stave a simuláciou maximálnej povrchovej teploty. V magnetickej simulácii sa zaoberáme simuláciou magnetických parametrov, konkrétne simuláciou elektrického odporu R a indukčnosti L jednotlivých elektród výkonového MOS tranzistora. Práca obsahuje aj návrh modelu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS a návrh modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS. Výsledkom práce je porovnanie vlastností oboch technológií a vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov.

1 Úvod

Výkonový MOS tranzistor je trojelektrodové zariadenie, obsahuje elektródy zdroj (S), kolektor (D), hradlo (G). Je to unipolárny tranzistor čo znamená, že je závislý len od jedného typu nosiča náboja. V závislosti od typu nosiča náboja sa výkonový MOS tranzistor delí na NMOS, kde sú majoritné nosiče náboja elektróny a na PMOS, kde sú majoritnými nosičmi náboja diery. Od štandardného MOS tranzistora sa odlišuje tým, že môže pracovať s oveľa vyššími prúdmi a napätiami. Funguje ako napätím riadený prúdový zdroj, kde sa napätím na elektróde hradlo (G) riadi prúd medzi elektródami zdroj (S) a kolektor (D). [1,2]

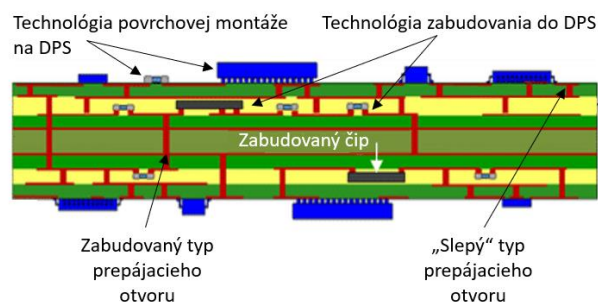
Výkonový MOS tranzistor má množstvo parametrov, ktoré ovplyvňujú jeho činnosť. Patrí k nim napríklad odpor v zopnutom stave $R_{DS(on)}$, ktorý sa skladá z viacerých odporov v sérii, ktoré vznikajú počas výrobného procesu. Keďže pohyblivosť elektrónov a diery so stúpajúcou teplotou klesá znamená to, že odpor v zopnutom stave $R_{DS(on)}$ stúpa so zvyšujúcou teplotou. Ďalší dôležitý parameter je teplotný odpor $R_{th(j-mb)}$, ktorý je dôležité poznať z hľadiska stratového výkonu. [3]

MOSFET ale aj iné súčiastky môžeme osadiť na DPS rôznymi spôsobmi. Základné spôsoby sú dva a to osadzovanie komponentu na DPS, teda technológia povrchovej montáže a zabudovanie komponentu do DPS, teda technológia zabudovania (obr. 1). Obe dva spôsoby majú výhody ale aj nevýhody a je otázka kompromisu aký typ osadenia komponentov zvolíme.

Technológia povrchovej montáže alebo osadenia komponentov na DSP väčšinou zaberá väčšiu plochu ako technológia osadenia do DPS, keďže všetky komponenty sa nachádzajú na povrchu. Problém pri tejto technológii je aj chladenie súčiastok, špeciálne pri výkonových súčiastkach ako je napríklad výkonový MOS tranzistor, pretože vysoká teplota negatívne ovplyvňuje parametre súčiastky. [4]

Technológia osadenia komponentov do DPS výrazne znižuje plochu tým, že súčiastky sa umiestňujú nad seba v tkz. vodivých úrovniach, ktoré sú oddelené izolačnou vrstvou. Takéto umiestnenie má za následok aj zvýšenie elektrického výkonu, keďže sa skracaie dĺžka vodivých ciest a teda aj zníženie parazitných vlastností. Tak isto sa zvyšuje aj odvod tepla a mechanická spoľahlivosť. [5,6]

Na prepojenie jednotlivých vodivých úrovní sa používajú tkz. prepájacie otvory (obr. 1). Tie sa delia na viacero typov. Prvý typ je prepájací otvor, ktorý prechádza skrz celú DPS a spája najvyššiu vodivú úroveň z najnižšou. Ďalší typ je prepájací otvor je tkz. „slepý“ typ, ktorý je špecifický tým, že spája najvyššiu vodivú úroveň s vodivou úrovňou, ktorá sa nachádza vnútri DPS. A posledný typ prepájací otvoru je zabudovaný do DPS a slúži na prepojenie vodivých úrovní ktoré sú zabudované do DPS. [7]



Obr. 1 – Porovnanie oboch technológií osadenia súčiastok a typy prepájacích otvorov

Na zistenie správneho fungovania súčiastky alebo niektorých z jej parametrov sa vo väčšine používajú simulácie, ktoré nahrádzajú dlhotrvajúce ručné merania, ktoré môžu byť ovplyvnené aj inými rušivými faktormi. Na simuláciu elektrických, tepelných a magnetických parametrov sa používa množstvo programov, napríklad aj COMSOL Multiphysic.

Elektrická simulácia sa používa na simulovanie elektrických parametrov ako napríklad prúd, napätie, odpor, vyživa model „elektrické prúdy“. Musí byť ale splnená podmienka, že indukčné účinky sú zanedbateľné. Elektrická simulácia vychádza z elementárnej rovnice Ohmovho zákona

$$J = \sigma * E \quad (1)$$

kde J je hustota elektrického prúdu, σ je merná elektrická vodivosť a E je intenzita elektrického poľa.

Tento model obsahuje tri základné parametre a to „zachovanie prúdu“, ktorý definuje elektricky vodivé časti, „elektrická izolácia“, ktorý definuje elektricky nevodivé časti a „počiatočné hodnoty“, ktorý pridáva počiatočnú hodnotu elektrického potenciálu. Tento model obsahuje množstvo ďalších parametrov, ktoré možno pridať pre potrebu konkrétnej simulácie. Patria sme napríklad parametre „terminál“, ktorý slúži ako zdroj elektrickej veličiny, ďalší parameter je „zem“, ktorý slúži ako definícia nulového potenciálu. [8]

Tepelná simulácia je jedna z najdôležitejších simulácií, pretože teplota ovplyvňuje množstvo iných parametrov súčiastky. Využíva sa model „Prenos tepla v pevnej látke“, ktorý je aktívny vo všetkých častiach súčiastky. Simulácia vychádza z tepelnej rovnice (2).

$$\rho C_p u * \nabla T * \nabla q = Q + Q_{ted} \quad (2)$$

kde ρ je hustota, C_p je špecifická tepelná kapacita pod konštantným namáhaním, T je absolútna teplota, u je vektor rýchlosti translačného pohybu, q je tepelný tok, Q je parameter, ktorý obsahuje dodatočné zdroje tepla (W/m^3), Q_{ted} je parameter, ktorý zodpovedá za termo-elastické účinky v pevných látkach. [9]

Tepelná simulácia obsahuje niektoré predefinované parametre, ktoré sa môžu nastaviť podľa potreby simulácie. Možno zadefinovať aj množstvo iných parametrov, ktoré sú potrebné na dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov. Patrí sem napríklad parameter „teplota“, ktorý sa používa na zadefinovanie teploty tam kde je to potrebné, môže ísť napríklad o zadefinovanie ideálneho chladiča. Ďalší mimoriadne dôležitý parameter je „tepelný zdroj“, ktorý definuje zdroj tepla, môže ísť o napríklad o výkonovú súčiastku, ktorá produkuje najviac tepla. [9]

Ďalšia simulácia je magnetická, ktorá sa používa napríklad na výpočet magnetických polí, transformátorov, vodičov alebo cievok, cez ktoré tečie prúd. Na výpočet cievok alebo vodičov sa používa doplnok modelu „Rozhranie magnetických polí“ a to „Rozhranie magnetických polí, iba prúdy“. Tento doplnok je užitočný z dôvodu, že počíta prúdy z divergenciou ale aj bez. Je dôležité aby pri simulácii bol okolo súčiastky nasimulovaný voľný priestor. Výpočet, z ktorým model pracuje je pomerne zložitý, vychádza z Ampérového zákona pre statické prúdy a predpokladá rovnomernú permeabilitu vo voľnom priestore, z toho plynie rovnica

$$\nabla \times B = \mu_0 * J \quad (3)$$

kde B je magnetická indukcia, μ_0 je permeabilita vákua a J je hustota elektrického prúdu. Rovnica sa ďalej upravuje pridaním definície magnetického potenciálu a uplatnením Coulombovho meradla na

$$-\nabla^2 A = \mu_0 * J \quad (4)$$

kde A je magnetický vektorový potenciál, μ_0 je permeabilita vákua a J je hustota elektrického prúdu. [10]

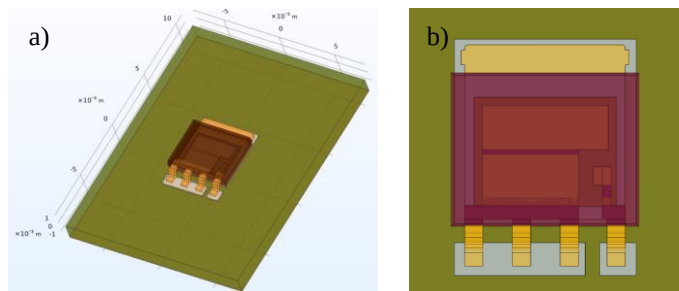
Tento model obsahuje tri predvolené parametre a to parameter „voľný priestor“, ktorý pridáva do rovnice Ampérov zákon vo voľnom priestore a počíta z tým, že magnetická permeabilita sa rovná jedna, a to pre všetky domény. Ďalší parameter je „vonkajšie hranice“, ktorý definuje hraničné podmienky modelu, ktoré pridávajú obmedzenie simulácie. A posledným predvoleným parameter je „počiatočné hodnoty“, ktorý pridáva počiatočnú hodnotu pre potenciál magnetického vektora. Model tak isto ako ostatné simulácie obsahuje množstvo iných parametrov ako napríklad „cievka“, ktorý sa dá použiť na vypočítanie elektrického odporu R alebo indukčnosti L vodičov. [11]

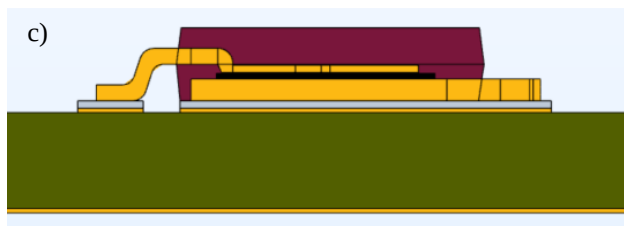
2 Experimentálna časť

Táto časť je zameraná na návrh modelu a na porovnanie výsledkov simulácií elektrických, tepelných a magnetických vlastností výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS a modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS.

2.1 Návrh modelu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS

Tvorba geometrie výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS (obr. 2) prebiehala podľa dát z hárku technických parametrov pre typ tranzistora BUK7Y1R4-40H v puzdre LFPK56.[12] Keďže sme nevedeli z hárku technických parametrov zistiť všetky potrebné informácie pre správny návrh súčiastky, museli sme výkonový MOS tranzistor rozobrať a opticky zistiť niektoré parametre. Išlo hlavne o rozmer čipu a spôsob uchytenia nožičiek, teda elektród na čip. Po dokončení geometrie výkonového MOS tranzistora sme vytvorili model DPS, na ktorú sme následne tranzistor pripevnili.





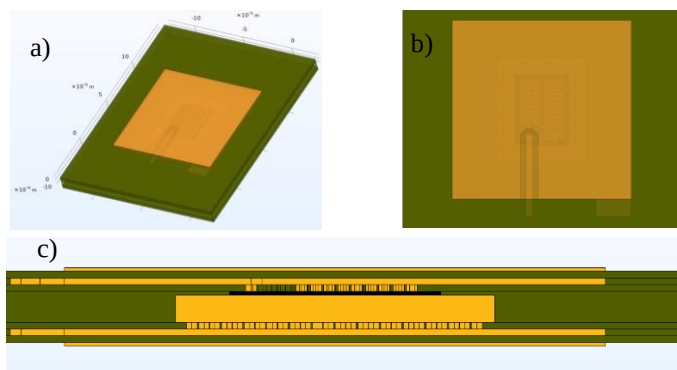
Obr. 2 – Geometria výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS: a) pohľad zhora, b) detail na geometriu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS, pohľad zhora, c) detail na geometriu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS, pohľad z boku

2.1.1 Materiály pre model výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS

Na všetky tri elektródy a to hradlo (G), zdroj (S) a kolektor (D), ďalej na metalizáciu týchto elektród, na metalizáciu čipu a na hornú a spodnú vodivú časť DPS sme použili meď. Na puzdro výkonového MOS tranzistora sme použili materiál kremičité sklo. Pre čip sme použili kremík, ktorého elektrickú konduktivitu σ sme nastavili podľa kalibrácie na hodnotu $5,778 \cdot 10^3$ (S/m). Na spojenie terminálov výkonového MOS tranzistora a hornej metalizácie DPS sme použili spájkú, ktorá obsahovala cín a olovo v pomere 60/40. Na spojenie čipu a elektród sme použili sinterovaciu spájkú zo striebra. Na DPS sme zvolili materiál FR4. V magnetickej simulácii sme pridal ešte materiál vzduch, ktorý reprezentoval voľné prostredie.

2.2 Návrh modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS

Geometriu modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS (obr. 3) sme vytvorili podľa geometrie testovacieho modelu. Z technických parametrov testovacieho modelu sme získali potrebné informácie na návrh modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS, konkrétne celkovú hrúbku, počet jednotlivých vodivých vrstiev, a rozloženie jednotlivých vrstiev.



Obr. 3 – Geometria výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS: a) pohľad zhora, b) detail na geometriu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS, pohľad zhora, c) detail na geometriu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS, pohľad z boku

2.2.1 Materiály na model výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS

Meď sme použili na všetky vodivé úrovne, na všetky tri elektródy a to hradlo (G), zdroj (S) a kolektor (D), ďalej na prepájacie otvory a na podložku pod čip. Pre čip sme zvolili kremík, ktorého elektrickú konduktivitu σ sme nastavili podľa kalibrácie na hodnotu $5,778 \cdot 10^3$ (S/m) tak ako v prípade technológie osadenia výkonového MOS tranzistora na DPS. Pre všetky nevodivé úrovne sme zvolili materiál FR4, ktorý predstavuje dielektrikum. Na spojenie medenej podložky a čipu sme použili tak isto sinterovaciu spájkú zo striebra. V magnetickej simulácii sme pridal ešte materiál vzduch, ktorý reprezentoval voľné prostredie.

2.3 Nastavenie mriežky

Mriežku sme v každej simulácii pre obe technológie nastavovali automatickým vygenerovaním. Aby sme dosiahli správne výsledky, hľadali sme kompromis medzi presnosťou výsledkov a dĺžkou trvania simulácie. Zvolili sme možnosť „jemná“. Pri tejto mriežke bola dĺžka simulácie prijateľne dlhá a výsledky simulácie neboli skreslené veľkosťou mriežky.

2.4 Simulácie

2.4.1 Elektrická simulácia

V tejto simulácii sme simulovali odpor $R_{DS(on)}$ (mΩ), rozloženie elektrického potenciálu U (V) na výkonovom MOS tranzistore a rozloženie prúdovej hustoty J (A/m²). Na simuláciu sme použili model „elektrické prúdy“, ktorý vychádza z elementárnej rovnice Ohmovho zákona (1). Referenčnú impedanciu sme nemerili. Pre tento model sme zvolili všetky časti výkonového MOS tranzistora vrátane DPS okrem puzdra. Do parametrov sme pridal parameter „terminál“ a „zem“. Parameter „terminál“ sme definovali ako hranu hornej metalizácie DPS na ktorú je pripojená elektróda kolektor (D) a nastavili sme mu hodnotu 0,01 (V). Parameter „zem“ sme definovali ako hranu hornej metalizácie DPS, na ktorú je pripojená elektróda zdroj (S), ktorý je podľa definície pripojený na nulový potenciál.

Tab. 1. Výsledky elektrickej simulácie výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS a zabudovaného do DPS

č.	Meraná veličina	Výkonový MOS tranzistor osadený na DPS	Výkonový MOS tranzistor zabudovaný do DPS
1	Prúd I_{DS}	8,7387 A	5,5046 A
2	Odpor v zopnutom stave $R_{DS(on)}$	1,1443 mΩ	1,8167 mΩ

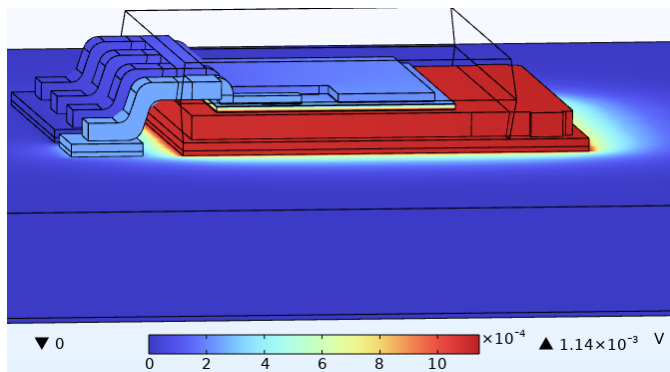
Z výsledkov elektrickej simulácie odporu v zopnutom stave $R_{DS(on)}$ vyplýva, že sa pri modeli výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS neznížil tak ako sme podľa teórie očakávali. Naopak stúpol približne 1,6-krát voči modelu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS. To je spôsobené hrubšími metalizáciami a iným usporiadaním

elektrod ako v prípade modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS.

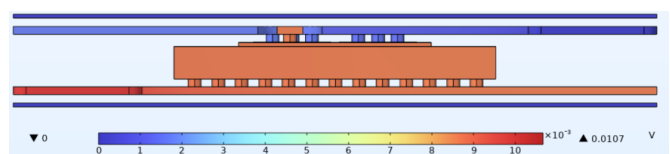
Správnosť simulácie sa dá overiť jednoducho dosadením hodnôt do rovnice Ohmovho zákona (5),

$$U = \frac{R}{I} \quad (5)$$

kde za odpor R dosadíme odpor v zopnutom stave $R_{DS(on)}$ a za prúd I dosadíme hodnotu I_{DS} . Výsledok sa rovná hodnote napätia U , ktorú sme nastavili ako parameter „terminál“, teda 0,01 (V) a to v prípade oboch technológií.

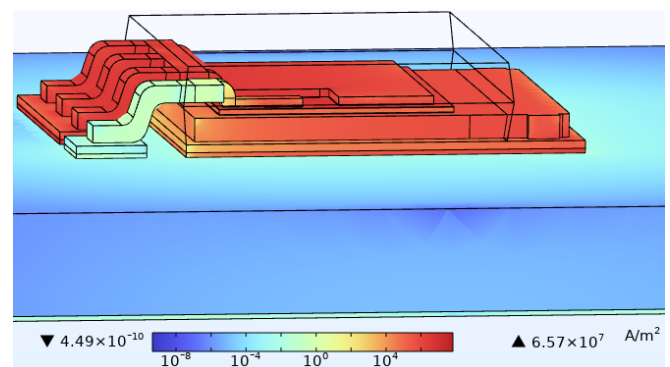


Obr. 4 – Simulácia elektrického potenciálu modelu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS

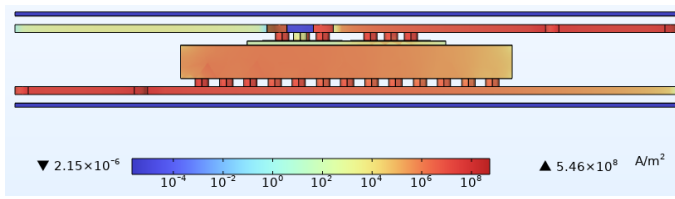


Obr. 5 – Simulácia elektrického potenciálu U (V) modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS

Zo simulácie elektrického potenciálu na obr. 5 a obr. 6 je jasné, že prebehla správne, pretože v prípade technológie povrchovej montáže na DPS je na hornej metalizácii DPS, na ktorú je pripojená elektróda kolektor najvyšší potenciál a na hornej metalizácii DPS na ktorú je pripojený zdroj (S) je najnižší potenciál. V prípade technológie zabudovania do DPS je najvyšší potenciál na elektróde kolektor (D) a najnižší potenciál je na elektróde zdroj (S).



Obr. 6 – Simulácia normovanej prúdovej hustoty J (A/m^2) modelu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS



Obr. 7 – Simulácia normovanej prúdovej hustoty J (A/m^2) modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS

Simulácia normovanej prúdovej hustoty J (A/m^2) na obr. 7 a na obr. 8, zobrazuje jej rozloženie naprieč celou súčiastkou spolu s metalizáciami a v prípade výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS aj jednotlivými vodivými úrovňami.

2.4.2 Tepelná simulácia

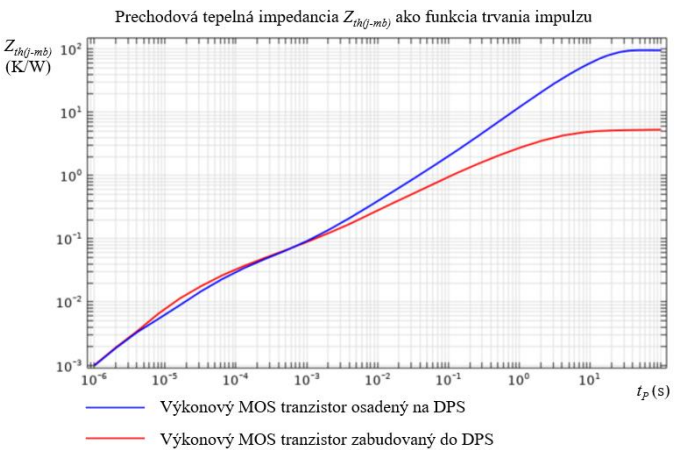
Táto simulácia sa skladala z dvoch častí. Ako prvý sme využili typ simulácie „stacionárna“. Ňou sme simulovali tepelný odpor $R_{th(j-mb)}$ (K/W) a maximálnu povrchovú tepotu T_{MAX} , výsledky sú zobrazené v tabuľke tab.2. Druhý typ simulácie sme použili typ „časovo závislá“. Simulovali sme tak prechodovú tepelnú impedanciu $Z_{th(j-mb)}$ (K/W) zobrazenú na obrázku obr. 9. Pred začatím simulácie bolo potrebné aby sme nastavili jednotlivé parametre v modeli „Prenos tepla v pevnej látke“, ktorý na výpočet používa rovnicu (2). Predvolené parametre sme nechali nastavené na preddefinovanú hodnotu. Pridali sme parameter „tepelný zdroj“, tento parameter slúžil na definovanie zdroja tepla. V prípade oboch technológií sme za zdroj tepla určili kremíkový čip. V parametri „zdroj tepla“ sme museli pre obe technológie definovať ďalší parameter a to „rýchlosť tepla“, jeho hodnotu sme nastavili na 1 (W). Ako ďalší parameter sme zvolili parameter „teplota“. Tento parameter reprezentoval ideálny chladič, ktorý sme v prípade oboch technológií umiestnili na dolnú metalizáciu DPS a nastavili sme mu hodnotu 293,15 (K). A posledný parameter sme len v prípade výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS zvolili „termálny kontakt“. Ten slúžil na termálny kontakt medzi všetkými elektródami a hornou metalizáciu DPS. Tento kontakt sme definovali parametrom „vodivosť vrstvy“, hodnotu sme nastavili podľa kalibrácie súčiastky na hodnotu 355000 ($W/m^2 \cdot K$).

Tab. 2. Výsledok tepelnej simulácie tepelného odporu $R_{(j-mb)}$ v stacionárnom stave

č.	Meraná veličina	Výkonový MOS tranzistor osadený na DPS	Výkonový MOS tranzistor zabudovaný do DPS
1	Tepelný odpor $R_{th(j-mb)}$ v stacionárnom stave	96,082 K/W	5,3578 K/W
2	Maximálna teplota T_{MAX}	389,23 K	298,51 K

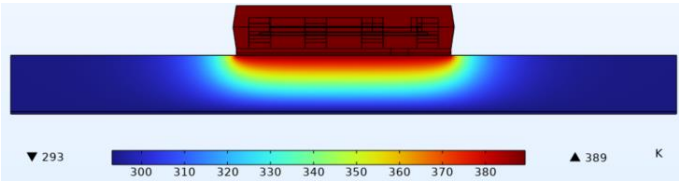
Z výsledkov pre tepelnú simuláciu môžeme konštatovať, že tepelný odpor $R_{th(j-mb)}$ výrazne klesol v prípade výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS a to až približne 18-krát. Tak isto sa znížila aj maximálna teplota T_{MAX} a to až o 90,72 (K). Zo simulácie na obr. 9 a obr. 10 môžeme povedať, že je to kvôli lepšiemu odvodu tepla od chladiča.

Správnosť simulácie sme overili výpočtom, kde sa tepelný odpor $R_{th(j-mb)}$ v stacionárnom stave rovná maximálnej teplote T_{MAX} od ktorej sme odpočítali hodnotu definovanú v parametri „teplota“, rozdiel sme následne predelili hodnotou definovanou v parametri „zdroj tepla“. Výsledok bol v oboch technológiách rovnaký ako simulovaný.

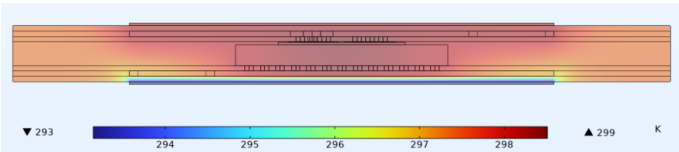


Obr. 8 – Graf prechodovej tepelnej impedancie $Z_{th(j-mb)}$ pre obe technológie ako funkcie trvania impulzu

Rovnako tak sa v prípade výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS znížila aj prechodová tepelná impedancia $Z_{th(j-mb)}$, kde na grafe (obr. 8) v prípade výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS vidíme väčší rozptyl krivky, ale zato je prechodová tepelná impedancia $Z_{th(j-mb)}$ výrazne menšia ako v prípade výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS.



Obr. 9 – Rozloženie tepla v o výkonovom MOS tranzistore osadenom na DPS v priereze súčiastky



Obr. 10 – Rozloženie tepla v o výkonovom MOS tranzistore zabudovanom do DPS v priereze súčiastky

Zo simulácie pre obe technológie (obr. 9, 10) je jasné, že najviac tepla produkuje čip. Môžeme teda povedať, že simulácia prebehla v poriadku, pretože práve čip sme definovali ako parameter „zdroj tepla“.

2.4.3 Magnetická simulácia

V tejto simulácii sme simulovali elektrický odpor R a indukčnosť L jednotlivých elektród, ktorých výsledky sú v tabuľkách (tab. 3) a (tab. 4). Na simuláciu sme použili model „Magnetické polia, iba prúdy“, ktorý počíta podľa rovnice (3) a (4). Z predefinovaných parametrov sme menili len „vonkajšie hranice“, na ich definíciu sme museli do modelu súčiastky pridať objekt (kocku), ktorý simuluje voľný priestor, jeho strany sme určili ako parameter „vonkajšie hranice“. Pridali sme tiež 3 parametre „vodič“, pre každú elektródu, v ňom sme zadefinovali „terminál“ a „zem“. Na simuláciu sme použili dva kroky, prvý bol „inicializácia zdroja“ a následne druhý „stacionárne rozmetanie zdroja“. Tento postup sme použili na simulácie pre oba typy technológie teda aj na simuláciu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS aj na simuláciu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS.

Tab. 3 Výsledok simulácie elektrického odporu jednotlivých elektród pre obe technológie

č.	Elektróda	Výkonový MOS tranzistor osadený na DPS	Výkonový MOS tranzistor zabudovaný do DPS
1	Hradlo (G)	0,7621 mΩ	1,6186 mΩ
2	Zdroj (S)	0,1318 mΩ	0,2693 mΩ
3	Kolektor (D)	0,0191 mΩ	0,2195 mΩ

Tab. 4 Výsledok simulácie indukčnosti jednotlivých elektród pre obe technológie

č.	Elektróda	Výkonový MOS tranzistor osadený na DPS	Výkonový MOS tranzistor zabudovaný do DPS
1	Hradlo (G)	1,4044 nH	3,0014 nH
2	Zdroj (S)	0,5571 nH	2,4074 nH
3	Kolektor (D)	48,933 pH	1,7407 nH

Zo simulácie elektrického odporu R jednotlivých elektród pre výkonový MOS tranzistor zabudovaný do DPS v tabuľke (tab. 3) vidíme, že elektrický odpor R stúpol pri každej elektróde. Rovnaký trend sme sledovali aj pri simulácii indukčnosti L jednotlivých elektród (tab. 4). To je spôsobené tým, že cesta metalizácie k čipu je približne o tretinu dlhšia v prípade modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS a metalizácie sú tiež tenšie ako v prípade modelu výkonového MOS tranzistora osadeného na DPS. Najväčší rozdiel je v prípade kolektoru (D), čo vyplýva aj z geometrie súčiastky.

3 Záver

Z výsledkov simulácií môžeme povedať, že výrazné zlepšenie hodnôt priniesla iba tepelná simulácia, ostatné simulácie sa dokonca zhoršili. To môže byť spôsobené tým, že model výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS bol navrhnutý podľa geometrie testovacieho modelu, ktorý je však navrhnutý tak aby zlepšil len tepelné vlastnosti výkonového MOS tranzistora. Zlepšenie elektrických a magnetických vlastností môžeme získať úpravou geometrie modelu výkonového MOS tranzistora zabudovaného do DPS a to tak, že zmeníme rozloženie a plochu jednotlivých elektród, čo bude súčasťou budúcej štúdie.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená projektom iRel40. iRel40 je európsky spolufinancovaný inovačný projekt, ktorý udelil spoločný podnik ECSEL (JU) na základe grantovej zmluvy č. 876659. Financovanie projektu pochádza z výskumného programu Horizont 2020 a zúčastnených krajín. Vnútroštátne financovanie poskytuje Nemecko vrátane slobodných štátov Sasko a Durínsko, Rakúsko, Belgicko, Fínsko, Francúzsko, Taliansko, Holandsko, Slovensko, Španielsko, Švédsko a Turecko. Túto prácu podporila aj Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0266.

Literatúra

- [1] BARKHORDARIAN, Vrej. *Power MOSFET Basics* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/dgdl/mosfet.pdf?fileId=5546d462533600a4015357444e913f4f>
- [2] *MOSFET – Structure, working principle, symbol and applications* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.electricalclassroom.com/mosfet-symbol-working-structure/>
- [3] *MOSFET Thermal Resistance and Power Dissipation: Packages Capable of Back-Surface Heat Dissipation* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://techweb.rohm.com/product/power-device/si/si-basic/8955/>
- [4] HOLLANDER, Dave. *PACKAGING TRENDS AND MOUNTING TECHNIQUES FOR POWER SURFACE MOUNT COMPONENTS* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=404911>
- [5] HUESGEN, Till. *Printed circuit board embedded power semiconductors: A technology review* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772370422000141>
- [6] CLEMONS, Max. *Use Embedded Components To Improve PCB Performance And Reduce Size* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/embedded-revolution/article/21799095/use-embedded-components-to-improve-pcb-performance-and-reduce-size>
- [7] *How and where use vias in PCB design* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.proto-electronics.com/blog/how-and-where-use-vias-in-pcb-design>
- [8] *AC/DC Module: User's Guide* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf>
- [9] *Heat Transfer Module: User's Guide* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>
- [10] *Theory for the Magnetic Fields, Currents Only Interface* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.acdc/acdc ug theory.05.64.html#736297>
- [11] *The Magnetic Fields, Currents Only Interface* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.acdc/acdc ug magnetic fields.08.095.html>
- [12] *BUK7Y1R4-40H* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/BUK7Y1R4-40H.pdf>

Progresívne senzory ohybu pripravené technológiou atramentovej tlače

Ondrej Kokavec, Juraj Nevrela

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 zaoberá možnosťami prípravy progresívnych senzorov ohybu technológiou atramentovej tlače. Boli preskúmané rôzne alternatívy technológií prípravy aj samotných princípov ich fungovania. Na vytvorených prototypoch zariadení bolo skúmané ich správanie sa, pričom prebehla aj širšia charakterizácia vedľajších vplyvov pre komplexné porozumenie tejto problematike. Všetky úspešne vyhodnotené výsledky poskytujú síce základný, ale za to dôležitý prehľad pre ďalší výskum v tejto oblasti.

1 Úvod

Svetu elektroniky už desiatky rokov dominujú anorganické materiály na čele s kremikom, ktorý bol veľmi výhodnou voľbou vzhľadom na jeho hojné zastúpenie na zemi a výnimočné elektrické vlastnosti po objavení procesu dopácie. Ako čas pokročil, objavili sa nové poznatky ale aj nové potreby pre rozvoj elektronických zariadení a nie všetky sa dajú dosiahnuť doterajšími technológiami. Tu vstupuje organická elektronika, ktorá dokáže v určitých prípadoch niektoré vlastnosti zlepšiť a niekedy aj priniesť úplne nové, ako je napríklad priehľadnosť a ohybnosť. Jej využitie je menej ekologicky zaťažujúce a vzhľadom na možnosti pokročilej syntézy je možné ovplyvňovať materiálové vlastnosti na molekulárnej úrovni. Taktiež je možné implementovať nové a efektívnejšie možnosti výroby, vďaka ktorým sa môže stať elektronika výrazne lacnejšou a dostupnejšou. [1]

Príkladom týchto technologických procesov sú tlačiarenské technológie, ktorých zásadná výhoda je práve jednoduchá a rýchla implementácia do výrobného procesu. Do tejto skupiny technologických procesov patrí aj atramentová tlač (z angl. InkJet printing). Tá funguje na jednoduchom princípe ovládania trysiek pomocou piezoelektrických elementov, na ktoré je privádzaný napäťový impulz požadovaného tvaru. Následná mechanická deformácia piezoelektrických elementov vypudí atrament zo zásobníka na substrát, podľa nastavenej predlohy. Na rozdiel od iných tlačiarenských technológií môžu atramenty byť vodivé, polovodivé aj izolačné, avšak musia byť rozpustné pre vytvorenie roztoku (z toho vyplýva aj ich zaradenie pod tzv. „mokré“ depozičné technológie). Na rozdiel od bežne využívaných „suchých“ depozičných technológií (ako je tepelné naparovanie vo vysokom vákuu alebo naprašovanie) je omnoho menej energeticky, technicky aj materiálovo náročná, je rýchlejšia a lacnejšia. Ponúka možnosť veľkoplošnej výroby aj

veľkú flexibilitu v návrhu vytváraných prvkov. Má však aj svoje nevýhody, ako v začiatkoch dlhšia a náročnejšia optimalizácia, občasné chyby výroby atď. [2]

Senzorika je veľmi dôležitou a rozšírenou oblasťou elektroniky, pretože výrazne uľahčuje ľuďom život. Pôsobí ako spojnica medzi vplyvmi reálneho sveta a ich následnej reprezentácie v tom elektronickom. Nájde ju od priemyselného využitia až po to osobné, ako je napríklad monitorovanie životných funkcií v lekárskej elektronike alebo nositeľnej elektronike. Postupným vývojom dochádza k lepšej a menej invazívnej integrácii týchto zariadení v daných odvetviach. Príkladom môžu byť mnohé komerčne rozšírené telemedicínske zariadenia, ktoré umožňujú zdravotníckemu personálu monitoring pacienta aj bez nutnosti hospitalizácie, za použitia energeticky efektívnych biosenzorov. Okrem komerčne rozšírených riešení je senzorika stále široko žiadanou oblasťou výskumu, kde sa intenzívne pracuje na vývojových konceptoch od inteligentného oblečenia až po pokročilé epidermálne senzory implementované priamo na pokožku [3].

A práve pri tejto téme sa dokonale prelínajú všetky výhody atramentovej tlače a organickej elektroniky, ktoré dokážu zastáť túto náročnú úlohu. Intenzívne sa pracuje na realizácii senzorov rôznych veličín ako je napríklad vlhkosť, teplota a množstvo iných [4]. V tomto článku sa pokúsime o progresívnu verziu senzora ohybu s využitím technológie atramentovej tlače a organických materiálov, ktorý bude slúžiť ako základ pre ďalší výskum a prípadnú praktickú realizáciu. Senzory ohybu môžu nájsť využitie napríklad v oblastiach medicíny a robotiky pri protézach a umelých končatinách, ako ďalšia súčasť nositeľnej elektroniky pre monitorovanie telesných funkcií, alebo v priemysle na registrovanie pohybu rôznych strojových súčastí.

2 Experiment

2.1 Návrh

Ústredným princípom fungovania senzorov ohybu je piezodoporový jav, ktorý označuje zmenu odporu materiálu v závislosti od jeho deformácie [5]. Veľmi často je práve využívaný v kremíku, na ktorom princípe sa robia napríklad senzory tlaku alebo iných vplyvov, ktoré vyúsťia v túto určitú deformáciu. Predpokladom je, že by sa tento jav na podobnom princípe mohol vyskytovať aj v organickom vodivom polyméri poly(3,4-etyldioxytiofén)-poly(styrénsulfonát)

(zn. PEDOT:PSS) [6]. Jedná sa o vo vode rozpustnú polymérnu zmes dvoch ionomérův, kompatibilnú s technologickým procesom atramentovej tlače. V rámci vykonaných experimentov bol optimalizovaný tento proces výroby senzorov ohybu na báze PEDOT:PSS s využitím atramentovej tlače. Tie boli následne porovnávané s ich alternatívami vyrobenými pomocou odstreďovania (z angl. Spincoating) PEDOT:PSS, za účelom zhodnotenia vplyvu aspektův jednotlivých výrobných metód na pripravené senzory. Taktiež boli pripravené referenčné senzory na báze indium-cín-oxidu (zn. ITO) ako anorganickým ekvivalentom tenkého, vodivého a transparentného materiálu.

Pri návrhu senzora ohybu bolo najpodstatnejšie, aby bol dobre a jednoducho ohybný, preto bola ako flexibilný substrát zvolená polyimidová (zn. PI) fólia. Jej mechanické vlastnosti zahŕňajú nízku hmotnosť, tenkú hrúbku a vysokú flexibilitu, ale zároveň výbornú mechanickú, chemickú a tepelnú odolnosť. Na ňu bola nanosená tenká štruktúrovaná vrstva na báze materiálu PEDOT:PSS. Pri návrhu danej štruktúry bol zvolený najvýhodnejší tvar pre detekciu deformácie, ktorý predstavuje dlhé cesty pozdĺž ohybu senzora. Využitím meandrovej štruktúry znázornenej na Obr. 1. bola maximalizovaná aktívna plocha senzora. Šírka cesty bola zvolená 2 mm ako kompromis medzi vysokým počtom ramien a zachovaním spojitosti celej štruktúry, z dôvodu možnej chyby pri tlači. Dĺžka cesty bude závisieť od aktívnej oblasti senzora (časť určená na ohyb). Nakoniec, pre lepšie kontaktovanie boli pomocou tepelného naparovania vo vysokom vákuu pripravené strieborné (zn. Ag) plôšky na koncoch vytlačenej štruktúry. Využitie striebra bolo zvolené pre jeho výstupnú prácu, čo má za následok nízky kontaktný odpor. Oba kontakty sa budú nachádzať len na jednej strane senzora pre praktickejšiu použiteľnosť.



Obr. 1 Navrhnutá štruktúra senzora ohybu technológiou atramentovej tlače.

V prípade odstreďovania bol prístup k návrhu nepatrne pozmenený, nakoľko PEDOT:PSS bol celoplošne deponovaný na substrát. Opäť bola zvolená PI fólia, vďaka už opísaným vlastnostiam a v predchádzajúcich experimentoch zvládanej depozícii PEDOT:PSS na ňu. Pre rovnako výhodné praktické použitie bolo vhodné, aby boli kontakty taktiež len na jednej strane, čo sa zaisťuje úpravou vyrezaním senzora do tvaru U, ako je vidieť na Obr. 2.



Obr. 2. Navrhnutí štruktúra senzora ohybu technológiou odstreďovania.

V neposlednom rade bol realizovaný senzor ohybu so senzitivnou vrstvou na báze materiálu ITO. Tento materiál bol od výroby dodaný ako nanosená tenká vrstva na polyetyléntereftalátovej (zn. PET) fólii. To zaisťuje ako flexibilitu senzora, tak aj anorganický princíp jeho fungovania. Výsledný návrh štruktúry bol zvolený a vytvorený analogicky k senzoru pripravenému pomocou odstreďovania (viď. Obr. 2).

2.2 Príprava

Ako už bolo uvedené, substrátom pre senzory na báze PEDOT:PSS bola PI fólia Kapton od výrobcu DuPont, konkrétne typ 300HN, kde HN označuje klasickú nemodifikovanú verziu pre všeobecné použitie a 300 odkazuje na jej hrúbku 76,2 μm . Tá bola narezaná na substráty o rozmeroch 70 x 20 mm, aby mohla byť pre účely ohybu dostatočne veľká a citlivá. Nasledovalo ich čistenie v ultrazvukovej (skr. UZ) vani, najprv v deionizovanej vode (s merným odporom 18,2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$) po dobu 10 minút pri teplote 39 °C a s druhým krokom v izopropylalkohole po dobu 5 minút pri teplote 39 °C. Po čom bola banka po dobu ďalších 5 minút ešte položená na vyhrevnú piecku s teplotou 82,5 °C (kedy dochádza k varu izopropylalkoholu). Pred, medzi a po každom kroku čistiacieho procesu boli substráty opláchnuté v deionizovanej vode a na konci osušené dusíkom. Toto čistenie zaisťuje, že sa z povrchu odstráni anorganické nečistoty a prípadná mastnota. Polymér PEDOT:PSS bol dodaný v roztoku vhodnom pre proces atramentovej tlače s komerčným označením Clevios P JET X N od výrobcu Heraeus. Časom v tomto atramente dochádza ku agregácii častíc, takže pred začiatkom práce s ním bolo vhodné ho prefiltrovať cez hydrofóbny 0,22 μm filter CF-PTFE-30-0,22. Známu komplikáciou taktiež bola skutočnosť, že aj po kompletnom procese depozície je vrstva stále vo vode rozpustná. Preto bolo nutné ho modifikovať zosieťovacím činidlom. V prechádzajúcich výskumoch sa osvedčilo pridanie 1 %hm (hmotnostného percenta, z angl. %wt) (3-glycidyloxypropyl)trimetoxysilánu (zn. GOPS). Pre dôsledné rozpustenie prídavku bolo do objemu vložené magnetické miešadlo a umiestnené na magnetickú miešačku pri rýchlosti 200 ot./min. po dobu aspoň 1 hodiny [7]. Takto upravený atrament bol naplnený do zásobníka a pripravený na tlač. Pred samotným procesom tlače boli substráty ešte ofúknuté ionizačnou pištoľou pre vybitie elektrostatického náboja z povrchu. Po digitálnom vytvorení a nahratí požadovanej štruktúry (viď. Obr. 1), prebiehala tlač na experimentálnom zariadení FUJIFILM Dimatix DMP-2850. Boli nastavené interné parametre tlače, podložka bola vyhrievaná na 35 °C, hrúbka substrátu (vzdialenosť tlačovej hlavy od podložky) na 300 μm , tlačila sa jedna vrstva. Posledným krokom bolo umiestnenie na vyhrevnú piecku, najprv po dobu 30 min. pri teplote 150 °C pre odstránenie vodného rozpúšťadla a po dobu 15 min. pri teplote 250 °C pre proces zosieťovania [7]. Kontakty o rozmeroch 5 x 5 mm boli vytvorené tepelným naparovaním vo vysokom vákuu pri tlaku rádovo 10^{-6} mbar a nižšom za použitia predtým vytvorenej tieniacej masky. Bola deponovaná tenká vrstva o hrúbke 150 nm.

Pri metóde odstreďovania je najefektívnejšia a najrovnomernejšia depozícia v prípade kruhového alebo štvorcového substrátu. Navrhnuté senzory však majú obdĺžnikový tvar (o rozmeroch 70 x 20 mm), preto bol uvažovaný postup, kedy sa najprv nareže väčší štvorcový

substrát s rozmermi 70 x 70 mm a až po celom procese prípravy sa upraví na 3 samostatné senzory v tvare U (viď. Obr. 2). Aj tu bola použitá PI Kapton fólia 300HN od výrobcu DuPont. Substrát bol čistený rovnakým postupom ako pre metódu atramentovej tlače. Na konci však bol ešte vystavený pôsobeniu UV-O₃ (z angl. UltraViolet-Ozone) po dobu 90 min. pri teplote 200 °C. Tento proces zabezpečil zvýšenie hydrofilnosti povrchu pre lepšie výsledky depozície materiálu a boli odstránené aj prípadné reziduálne organické nečistoty. Polymér PEDOT:PSS je pre proces odstreďovania zarobený s vodnými rozpúšťadlami v komerčne dostupnom roztoku Clevios PH1000 od výrobcu Heraeus. Rovnako aj tu dochádza pôsobením času ku agregácii častíc, preto bolo vhodné ho pred procesom taktiež prefiltrovať hydrofóbnym filtrom. Pipetou bolo nanesené dostatočné množstvo roztoku na substrát. Proces odstreďovania prebiehal v laboratórnej odstredivke SPS Spin 150 s nastaveným dvojfázovým programom: 500 ot./min. po dobu 5 sekúnd pre homogénne rozliatie roztoku po substráte a 2 000 ot./min. po dobu 40 sekúnd pre vytvorenie požadovanej vrstvy a odstredenie nadbytočného materiálu, celý proces s akceleráciou 1000 (ot./min.)/s. Nastali však komplikácie, nakoľko hlava odstredivky je kruhová s priemerom 4,5 cm a teda ju substrát presahoval. Keďže sa jedná o fóliu, pri otáčaní povrch nebol stabilný, čo vyústilo v nehomogénnu až miestami nepokrytú vrstvu. Tento problém bol riešený umiestnením pevnenej podložky (kremikového wafera) pod substrát, pričom udržanie fólie na jej povrchu bolo zaistené medzivrstvou etanolu. Aj cez výrazné zlepšenie stability fólie však výsledky neboli uspokojivé.

Ako ekvivalentná možnosť bol vyskúšaný proces nanášania ponorením (z angl. Dip-coating). Bola vytlačená 3D vaňa pre roztok (podľa rozmerov už narezaného substrátu) z glykolom-modifikovaného polyetyléntereftalátu (zn. PETG), ktorému chemicky neublíži polymérny vodný roztok, ani jemné čistiace chemikálie a rozpúšťadlá. Po pripravení dostatočného množstva roztoku, bol doňho substrát ponorený a veľmi opatrne, pomaly a stabilne vyťahovaný. Vrstva vyzerala celistvo a homogénne a tak nasledoval proces odstránenia rozpúšťadla pri teplote 120 °C po dobu 5 min [8]. Objavil sa však ďalší výrazný problém a to, že nanosená vrstva sa nachádza z oboch strán substrátu. Po položení na piecku s vysokou teplotou začala vodná časť roztoku na spodnej strane okamžite vriť a tak sa pri substráte veľkých rozmerov začala fólia prudko vlniť a deformovať, čo viedlo k dodatočnému nehomogénnemu rozliatiu vrstvy na jej vrchnej strane. Výsledok nebol použiteľný a teda druhá alternatíva prípravy senzorov sa nepodaril.

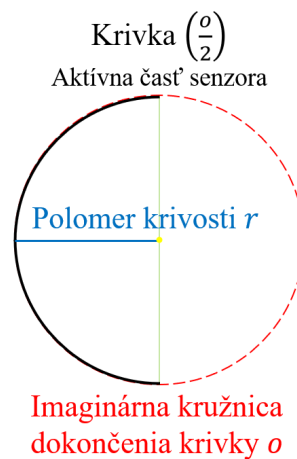
Pre anorganické senzory bola použitá už spomínaná ITO fólia (hrúbky 127 µm), od dodávateľa Sigma-Aldrich, vyrezaná do tvaru U ako na Obr. 2. Proces čistenia v UZ vani bol zredukovaný len na deionizovanú vodu, pre odstránenie výraznejších anorganických nečistôt a ponorenia do banky s izopropylalkoholom, pre odstránenie mastnoty. Ku zjednodušeniu čistenia sa pristúpilo, nakoľko vznikli obavy o chemickú odolnosť PET substrátu. Aj tu boli z dôvodu kontaktného odporu, pre zlepšenie výsledkov a jednoduchosť merania, deponované Ag plôšky rovnakých parametrov a rovnakým procesom.

2.3 Meranie

V predkladanej práci bola zavedená definícia ohybu pomocou vyjadrenia polomeru krivosti. V prípade štruktúry pripraveného senzora ohybu na Obr. 1, aktívna oblasť senzora určená pre ohyb má dĺžku 50 mm. Potom sa dá uvažovať

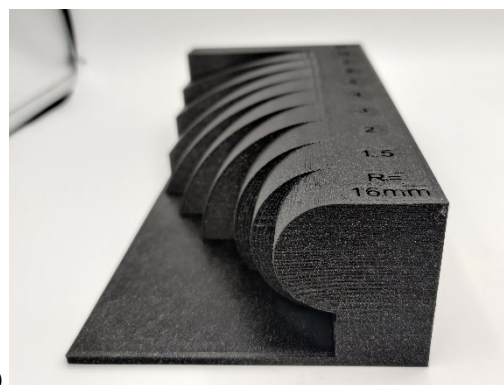
$$o = 2\pi * r \Rightarrow r = \frac{o}{2\pi} = \frac{100}{2\pi} \approx 16 \text{ mm} \quad (1)$$

kde o je obvod (imaginárnej) kružnice, pričom jeho hodnota sa rovná dvojnásobku dĺžky krivky (aktívnej oblasti) pri plnom (jednotkovom) ohybe a teda $o = 2 * 50 = 100 \text{ mm}$. r je polomer takejto kružnice a v tomto prípade aj samotný polomer krivosti, ako je pre názornejšie pochopenie načrtnuté na Obr. 3.

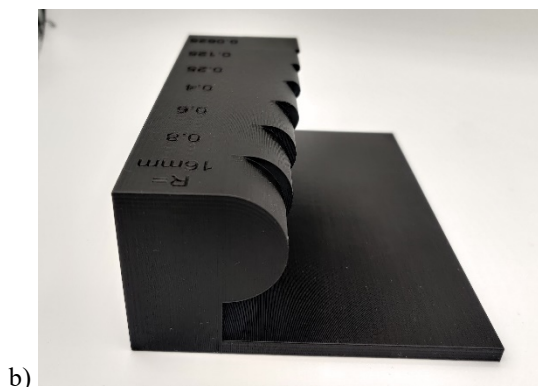


Obr. 3. Nákres opisu polomeru krivosti.

Na základe týchto výpočtov bol navrhnutý a vytlačený 3D merací prípravok, ktorý pozostával z tohto základného polomeru krivosti $r = 16 \text{ mm}$ (reprezentujúci 1) a jeho rovnomerne rozdelených stúpajúcich násobkov 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 12 ($r = 24$; 32; 48; 64; 80; 96; 128; 192 mm) a nekonečna (ozn. Inf), znázorňujúceho vyrovnaný senzor (žiadny aplikovaný ohyb). Ako bude ďalej v článku vysvetlené, musel byť vytvorený ešte jeden obdobný prípravok, tento raz s klesajúcimi násobkami, menovite 0,8; 0,6; 0,4; 0,25 a 0,125 ($r = 12,8$; 9,6; 6,4; 4 a 2 mm). Pre tento účel teda museli byť vytvorené aj verzie senzora s kratšou aktívnou oblasťou, rovnou $o/2$ (spätným prepočtom), korešpondujúcou k danému polomeru krivosti. Fotografie oboch prípravkov sú vidieť na Obr. 4.



a)



Obr. 4. Merací prípravok pre senzory ohybu v intervale násobkov polomeru krivosti a) Inf až 1 a b) 1 až 0,125.

Meranie prebiehalo spôsobom, kedy sa daná vzorka postupne umiestňovala na jednotlivé úrovne prípravku, od najmenšieho ohybu po najväčší, aby sa predišlo prípadnej nezvratnej deformácii. Na plošky boli priložené kontaktovacie ihly a merania boli vykonané parametrickým analyzátorom Keysight B1500A za použitia softvéru Keysight EasyEXPERT. Napätie bolo rozmietať v rozsahu od -1 do 1 V s krokom 10 mV a bol zaznamenávaný pretekajúci prúd. Aktuálna hodnota odporu vzorky bola s každým krokom získaná jednoduchým výpočtom za pomoci Ohmovho zákona

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

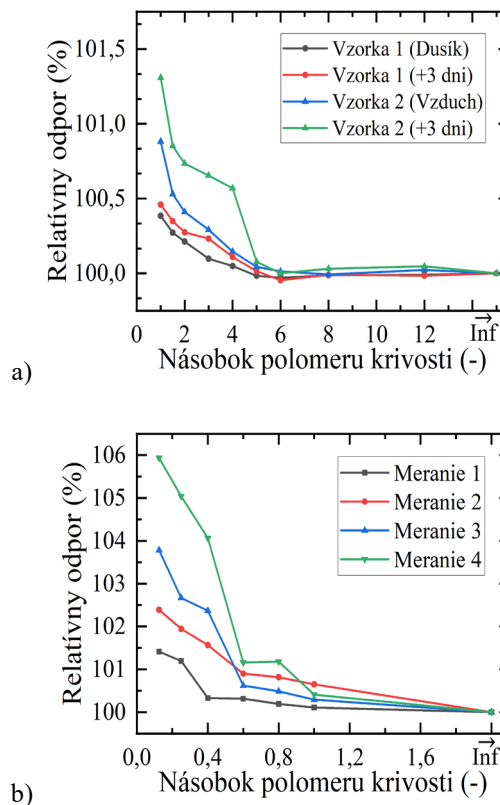
kde R je výsledná hodnota odporu, U je nastavené napätie a I je nameraný prúd. Takto boli všetky prepočítané hodnoty následne spriemerované, aby čo najvýpovednejšie reprezentovali skutočnú hodnotu odporu vzorky pri danom ohybe. Aby bolo možné porovnať trendy rôznych nameraných úrovní, bol vypočítaný odpor na štvorec každej vzorky a zmena odporu bola vyjadrená relatívnym pomerom. Z týchto výsledkov boli následne spracované závislosti prezentované v nasledujúcej kapitole.

3 Diskusia

3.1 Výsledky

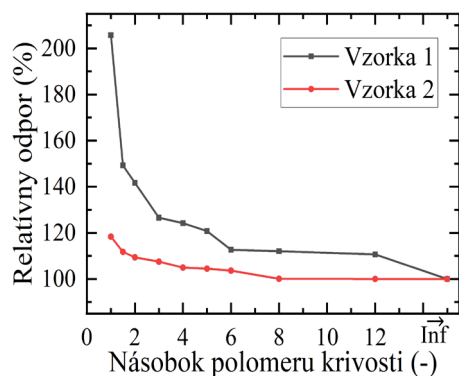
Na Obr. 5 a) sú namerané závislosti vzoriek pripravených technológiou atramentovej tlače. Jedná sa o vzorky skladované v ambientnej atmosfére (vzorka 1) a v dusíkovej atmosfére (vzorka 2), pričom boli vykonané opätovné merania po troch dňoch. Ako sa predpokladalo, so zväčšujúcim sa ohybom odpor naozaj rastie, pričom má exponenciálny charakter. Približne do násobku polomeru krivosti 6 ($r = 96 \text{ mm}$) bola funkcia lineárna a od neho stúpa. Tu však vstupuje fakt, že maximálna zmena odporu, bola len niečo okolo 0,5 % vo vzorke 1 a 1,5 % vo vzorke 2. Vyvstala teda otázka, či bola zmena odporu naozaj spôsobená ohybom senzora, alebo len chybou merania, prípadne inými vplyvmi. Podľa literatúry [9] PEDOT:PSS je v meranej oblasti v podstate neaktívny a ku výraznejšej zmene jeho odporu dochádza až pri väčšom ohybe. Práve preto bol vytvorený druhý merací prípravok popísaný vyššie. Merania na tomto prípravku boli realizované s využitím už spomenutých modifikovaných kratších senzorov, pričom každá vzorka bola určená pre svoju

špecifickú pozíciu. Následne boli realizované ihneď po výrobe 4 po sebe idúce merania celej série v dusíkovej atmosfére. Medzi jednotlivými meraniami nebol časový interval väčší ako 5 min. Tieto namerané závislosti sú na Obr. 5 b). Z predmetných závislostí je zrejmé, že charakteristiky boli podobné ako v prvom prípade, avšak zmena už bola prudšia a výraznejšia ako v (aj tu vykreslenom) intervale od Inf po 1. Práve od základného polomeru krivosti 1 ($r = 16 \text{ mm}$) už odpor znateľne narastá a relatívna zmena dosahuje hodnoty od 1,5 do 6 % medzi minimálnym (nulovým) a maximálnym ohybom senzora.



Obr. 5. Závislosť relatívnej zmeny odporu vzorky od aplikovaného ohybu, v intervale násobkov polomeru krivosti a) Inf až 1 a b) 1 až 0,125, pre materiál PEDOT:PSS.

Pre porovnanie, na Obr. 6 sú ohybové závislosti referenčného anorganického senzora. Ten priniesol výpovednejšie a mierne stabilnejšie výsledky, ako sa aj očakávalo. Boli merané dve vzorky, pričom obe reagujú na ohyb už aj v prvom intervale polomeru krivosti od Inf po 1. Pri vzorke 2 je maximálna relatívna zmena odporu okolo 20 % a pri vzorke 1 až nad 100 %, oproti pôvodnému stavu. Tento výrazný rozdiel mohol byť spôsobený poškodením štruktúry pri samotnom ohybe, ako bude rozobrané ďalej. Závislosti medzi sebou, aj vzhľadom na organické senzory, ale mali veľmi podobný priebeh, takže zmena sa dala s veľkou istotou prisúdiť vplyvu ohybu. Pre menšie polomery krivosti (druhý interval od 1 po 0,125) vzorky už neboli merané, vzhľadom na to že ich reakcie boli zaznamenané v prvom intervale a taktiež, meranie nebolo dobre realizovateľné. Pretože ITO je pevnejší materiál a PET fólia je menej flexibilná ako PI fólia, meranie bolo ťažko uskutočniteľné a zle vyhodnotiteľné.



Obr. 5. Závislosť relatívnej zmeny odporu vzorky od aplikovaného ohybu, v intervale násobkov polomeru krivosti Inf až 1, pre materiál ITO.

Vývoj senzorov je veľmi náročný, pretože okrem ich cieľenej meranej veličiny, ich bez povšimnutia môžu ovplyvňovať aj iné javy. Z toho dôvodu boli vykonané ešte prídavné samostatné merania na novo pripravených vzorkách, s účelom odhaliť tieto prípadné javy a zakomponovať ich do celkového porozumenia činnosti senzorov. Vznikol predpoklad, že sa jedná o dva možné vplyvy.

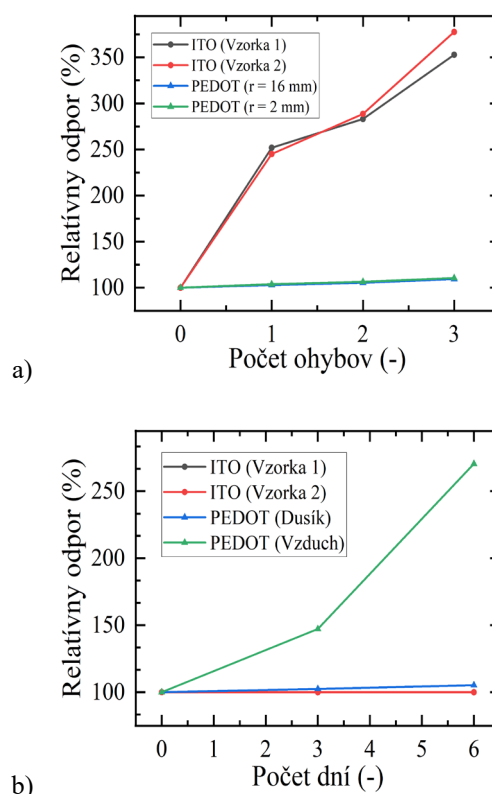
Prvým, ktorý už bol naznačený, je zmena od počtu (úrovne) ohybov. Bolo nutné overiť, či sa s opakujúcim namáhaním štruktúra svojvoľne nepoškodzuje a tak mení svoje elektrické vlastnosti. Pre toto meranie bola pripravená nová séria senzorov. Tie boli merané hneď po príprave, aby do experimentu nevstupoval napríklad taktiež predpokladaný vplyv okolitého prostredia. Meranie prebiehalo opakovane 4 krát za sebou s prestávkami medzi súvisiacimi meraniami, kvôli relaxácii vzorky. Podstata merania spočívala v ohnutí senzora na rôzne násobky jeho jednotkového polomeru krivosti (1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,25 a 0,125), jeho relaxácií a opakovanom ohnutí.

Druhým bol vplyv okolitej atmosféry na elektrické vlastnosti polyméru PEDOT:PSS. Z literatúry sú totiž známe indikácie, že sa jedná o hygroskopický materiál, čo znamená že je schopný na seba viazať molekuly vody z okolitého prostredia, aj napriek jeho zosieťovaniu pomocou GOPS [7] a predstavuje to pravdepodobne jeho najväčšiu nevýhodu. Pre realizáciu tohto experimentu, bola jedna sledovaná vzorka skladovaná v ambientnej atmosfére a druhá v dusíkovej. Vzorky boli merané hneď po výrobe a následne s rozstupom každé 3 dni.

Pre porovnanie vlastností senzorov boli aj pre referenčné senzory z ITO fólie realizované rovnaké merania. Pre každé boli vytvorené 2 vzorky senzorov. Meranie pre vplyv od počtu ohybov bolo vykonávané hneď po príprave 4 krát za sebou (s prestávkami medzi súvisiacimi meraniami, kvôli relaxácii vzorky). Tie boli ohýbané na 1-násobok ich polomeru krivosti ($r = 16 \text{ mm}$) a zase späť na Inf (žiadny aplikovaný ohyb). Meranie pre overenie vplyvu prostredia prebiehalo skladovaním vzoriek len v ambientnej atmosfére hneď po príprave a s následným rozstupom 3 dni.

Namerané závislosti zmeny odporu od počtu ohybov sa nachádzajú na Obr. 7. a). Pre PEDOT:PSS sa odpor vzorky zvyšuje len mierne v hodnote jednotiek % medzi jednotlivými meraniami. Rozdiely v náraste odporu boli väčšie, čím väčší bol

maximálny ohyb, ktorý senzor dosahoval. a konkrétne pri hodnotách násobku polomeru krivosti 0,25 a 0,125 ($r = 4 \text{ a } 2 \text{ mm}$) bola vidieť aj mierna fyzická deformácia. Naopak pre ITO fóliu odpor vzoriek s počtom ohybov výrazne stúpa o stovky %, čo by malo byť spôsobené výraznejším poškodením štruktúry, keďže ako už bolo spomenuté, je výrazne pevnejšia a menej flexibilná. Závislosti zmeny odporu od vplyvu prostredia možno vidieť na Obr. 7 b). V prípade PEDOT:PSS sa preukázalo, že vzduch (resp. molekuly vody, ktoré obsahuje) výrazne pôsobia na vzorku a zvyšujú jej odpor rádovo o desiatky % už aj za veľmi krátky čas. Vzorka v dusíkovej atmosfére narástla len o pár jednotiek %, čo je spôsobené nedokonalou čistotou aj tohto prostredia. V porovnaní je ale táto nedokonalosť zanedbateľná. Anorganické senzory sú vplyvom prostredia stabilné a ich odpor je v podstate konštantný.



Obr. 7. Porovnanie zmeny elektrických vlastností vzorky od a) počtu jednotkových ohybov a b) vplyvu prostredia, pre materiály PEDOT:PSS a ITO.

Pri opätovnom zhodnotení, je na mieste priznať, že závislosť relatívnej zmeny odporu PEDOT:PSS na Obr. 5 a) je výrazne ovplyvniteľná vedľajšími vplyvmi. Vzhľadom na veľmi malú relatívnu zmenu odporu nemôže byť s istotou pripísaná zmena spôsobenej aplikovaním ohybu. Pri Obr. 5 b) však už vplyv prostredia nevystupuje, vzhľadom na meranie realizované ihneď po príprave v krátkom časovom horizonte a v dusíkovej atmosfére. Závislosťou na Obr. 7 a) bolo zistené, že zmena elektrických vlastností je závislá od počtu ohybov len minimálne. Tým pádom, sa teraz možno vyjadriť, že závislosť odporu od aplikovaného ohybu pri PEDOT:PSS bola preukázaná.

3.2 Záver

Podarilo sa potvrdiť teoretické predpoklady a dokázať piezoodporový jav v organickom vodivom polyméri PEDOT:PSS. Aj keď je pomerne slabší než v prípade anorganických ekvivalentov, výrazne to rozširuje možnosti jeho využitia, v tomto prípade pre účely senzorov ohybu.

Tie sa dajú realizovať viacerými spôsobmi, ale najvýhodnejším a najlákavejším je technológia atramentovej tlače. Tá ponúka veľmi jednoduché, rýchle, úsporné, efektívne a flexibilné možnosti prípravy rôznych prvkov, vrátane týchto senzorov. Vo výsledkoch sa preukázalo, že PEDOT:PSS reaguje na ohyb až pri polomere krivosti senzora 16 mm a menej, pričom čím sa tento ohyb zväčšuje, tým väčšia je zmena odporu. Aj pri posune úrovne relatívnej zmeny medzi opakovanými meraniami, priebehy zostávajú zachované a tak je stále rozlíšiteľný stav medzi neohnutým a ohnutým senzorom. S očakávaním tejto zmeny je už ľahšie funkčne integrovať senzory do reálneho zariadenia. Ako veľa organických materiálov je však aj tento citlivý na okolité prostredie, konkrétne molekuly vody, ktoré zo vzduchu nadväzuje a tým sa výrazne menia jeho elektrické vlastnosti (nielen odpor, ale postupne aj samotné priebehy). Preto je v prípade reálneho použitia nutná pasivácia. Treba však myslieť na to, aby senzory zostali stále dostatočne flexibilné.

Druhou alternatívou spôsobu prípravy senzorov ohybu s využitím PEDOT:PSS boli metódy odstreďovania a namáčania. Ako bolo podrobnejšie popísané, obe nakoniec zlyhali. Prinášame však riešenia, ako by bolo možné výrobné procesy úspešne zopakovať. V prípade odstreďovania je to vyhotovenie väčšej hlavy odstredivky, na ktorú by sa väčší substrát celý zmestil, aj s prídavnými plošne rozloženými prieduchmi pre vákuum, ktoré by ho držali rovný a stabilný. V prípade namáčania by bolo vhodnejšie namiesto odstraňovania rozpúšťadla výhrevnou pieckou, ho realizovať napríklad výhrevnou lampou, priamo v zavesenej pozícii po vytiahnutí z depozičnej vane. Tieto výrobné procesy sú však celkovo napriek svojej jednoduchej podstate, komplikovanejšie na optimalizáciu a samotné tvarovanie celoplošnej vrstvy. Treba taktiež poznamenať, že zmienená optimalizácia týchto metód nebola primárnym predmetom výskumu. Zároveň sa dá predpokladať, že správanie sa, vlastnosti, ale aj úskalia by boli podobné ako pri tlačenej verzii a teda, aj ako vyplýva z predošlých tvrdení, potreba pasivácie naberá na význame.

Referenčné senzory na princípe anorganickej elektroniky mali veľmi jednoduchú výrobu (resp. len úpravu) a ich hlavnou výhodou je výraznejšia reakcia na aplikovaný ohyb, reakčný interval aj nad polomer krivosti senzora väčší ako $r = 16 \text{ mm}$ a časová stabilita vplyvom okolitého prostredia. Určite by vďaka tomuto našli svoje využitie v prípadoch, kedy nemožno použiť organické senzory, alebo aspoň do času kým optimalizácia pasivácie nepokročí. Na druhej strane je otázna ich životnosť, nakoľko ako bolo dokázané, štruktúra je výrazne menej flexibilná a ukazovala výraznejšie poškodenie s každým ďalším ohybom.

Vo výsledku, senzory ohybu s využitím vodivého polyméru PEDOT:PSS sú možné a funkčné. Pre integráciu je však potrebné ustriechnuť a ošetriť všetky okolnosti na ne vplývajúce, hlavne pasiváciu a samotnú detekciu. Atramentová tlač sa aj v tomto prípade ukázala ako nadradená výrobná metóda vzhľadom na všetky výhodné vlastnosti ktoré ponúka a

je technológiou s veľkým potenciálom. Ako pri nej, tak aj pri samotných senzoroch ohybu je ale potrebný ešte ďalší, rozsiahlejší a podrobnejší výskum, avšak v tomto článku boli spravené prvé a dôležité kroky na tejto ceste.

Podakovanie

Moje úprimné podakovanie patrí Ing. Jurajovi Nevřelovi, PhD. za odborný dohľad nad touto prácou a všetkým ostatným členom Oddelenia organickej elektroniky, na čele s prof. Ing. Martinom Weisom, DrSc., za cenné rady, vecné pripomienky a neutíchajúcu podporu.

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja, Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR, Pre projekty číslo: APVV-20-0564 a APVV-20-0310.

Literatúra

- [1] MICJAN, M., M. Weis, *Advances in Microelectronics: Reviews 3*, ed. S. Y. Yurish, IFSA Publishing, Bracelona, 19-74 (2021).
- [2] CUI, Zheng. *Printed electronics: materials, technologies and applications*. John Wiley & Sons, 2016.
- [3] KIM, Dae-Hyeong, et al. Epidermal electronics. *science*, 2011, 333.6044: 838-843.
- [4] HARADA, Shingo, et al. Fully printed, highly sensitive multifunctional artificial electronic whisker arrays integrated with strain and temperature sensors. *ACS nano*, 2014, 8.4: 3921-3927.
- [5] SMITH, Charles S. Piezoresistance effect in germanium and silicon. *Physical review*, 1954, 94.1: 42.
- [6] LATESSA, G., et al. Piezoresistive behaviour of flexible PEDOT: PSS based sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 139.2: 304-309.
- [7] VARDZAK, A., J. Nevřela, M. Micjan a M. Weis, Inkjet printing of temperature sensor on a flexible substrate. KOVAC J. jr. *Proceedings of ADEPT: 8th international conference on Advanced in electronic and photonic technologies*, Žilina, 2020.
- [8] NEVŘELA, J., V. Rezo, A. Vardzak a M. Weis, Body temperature sensor based on PEDOT:PSS. *Proceedings of ASDAM: International conference on Advanced semiconductor devices and microsystems*, Bratislava: Slovenská technická univerzita.
- [9] CHO, Chung-Ki, et al. Mechanical flexibility of transparent PEDOT: PSS electrodes prepared by gravure printing for flexible organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95.12: 3269-3275.

Analýza porúch vo výkonovom tranzistore MOSFET na báze SiC

Viktor Málík¹, Matej Matuš¹, Ľubica Stuchlíková¹

¹ Ústav elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave

[xmalikv@stuba.sk](mailto:vmalikv@stuba.sk)

Abstrakt – Elektricky aktívne poruchy majú významný vplyv na spoľahlivosť výkonových súčiastok. Tento príspevok sa zaoberá identifikáciou elektricky aktívnych porúch vo výkonovom MOSFET tranzistore na báze SiC metódou spektroskopie hlbokých hladín. Distribúcia porúch bola skúmaná pred a po aplikovaní elektrického namáhania vo forme elektrického stresu SC I. Boli identifikované poruchy, pravdepodobne zodpovedajúce prítomnosti dusíka, titánu, hliníka a intrinzickým poruchám ID₃, Z_{1/2}, RD₃ a EH³. Vplyvom elektrického namáhania nastala zmena koncentrácie elektricky aktívnych porúch.

1 Úvod

Výkonové elektronické prvky a zariadenia na báze kremíka (Si) dosahujú v súčasnosti už takmer teoreticky dosiahnuteľné výkonové limity [1]. Nástup elektromobility a obnoviteľných zdrojov energie kladie zvýšené nároky na transformáciu energie. Rastie dopyt po zariadeniach, ktoré sú schopné rýchlejšie spínať, prenášať vyššie menovité výkony, znižovať straty a pracovať pri vyšších teplotách.

V posledných rokoch sa upriamila pozornosť na širokopásmový polovodič karbid kremíka (SiC), ktorý má potenciál svojimi vlastnosťami nahradiť kremík (Si) vo výkonových aplikáciách. Medzi zaujímavé vlastnosti SiC (hodnoty pre polytyp 4H-SiC) patrí trojnásobne väčšia šírka zakázaného pásma E_G (3,23 eV) oproti kremíku, desaťnásobne vyššie prierné napätie U_{BR} (2,2 MV/cm), viac ako dvojnásobne väčšia tepelná vodivosť κ (3,7 W/cm.K) ako aj takmer dvojnásobne väčšia saturačná rýchlosť elektrónov v_{sat} (2×10^7 cm/s) [2].

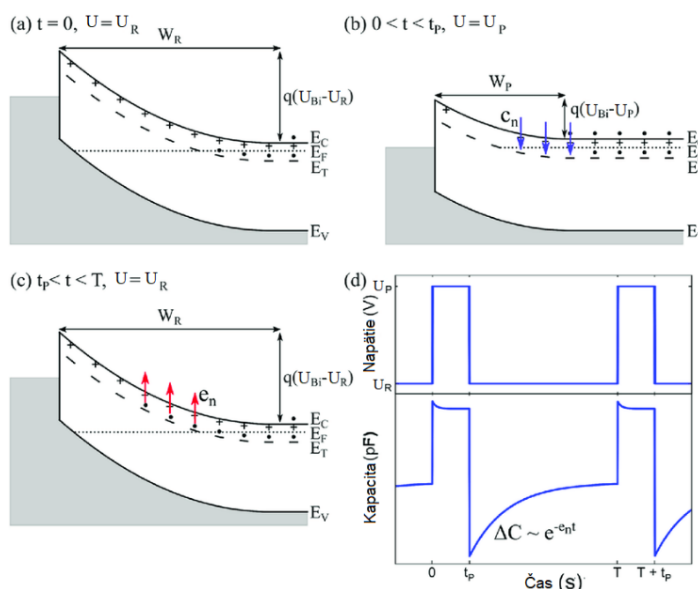
Z praktického porovnania týchto dvoch materiálov vyplýva, že napríklad trakčný systém elektromobilu s MOSFET na báze SiC má o 3 % lepšiu energetickú účinnosť ako systém s IGBT na báze Si [3]. Zároveň trakčný systém s SiC prvkami potrebuje odvádzať o 39 % tepla menej v porovnaní s technológiou Si [4], čo znižuje nároky na použitie chladičov, a znižuje rozmer zariadenia.

Vlastnosti polovodičov sú nežiaduco ovplyvňované hlbokými energetickými hladinami v zakázanom pásme. Takéto hladiny sú spôsobené prítomnosťou porúch v kryštalickej mriežke napr. vakancií, intersticiálnych, resp. substitučných atómov alebo zložitejších priestorových zhľukov porúch [5]. Elektricky aktívne poruchy môžu nepriaznivo vplyvať na dĺžku života nosičov náboja, na rýchlosť spínania, na výšku prierného napätia alebo na celkovú životnosť a spoľahlivosť elektronickej súčiastky [6]. Jednou z najčastejšie používanou metódou na identifikáciu elektricky aktívnych porúch je spektroskopia hlbokých hladín.

1.1 Spektroskopia hlbokých hladín

Spektroskopia hlbokých hladín (Deep Level Transient Spectroscopy - DLTS) je univerzálna štandardná elektrická meracia metóda. Táto relatívna metóda je založená na meraní kapacitnej transiency ochudobnených oblastí v bariérových štruktúrach [7]. Prostredníctvom DLTS metódy sme schopní identifikovať základné parametre elektricky aktívnych porúch: aktivačnú energiu ΔE_T (eV) a zachytý prierez σ_T (cm⁻³) [8].

Základný princíp merania DLTS metódou (Obr. 1) je založený na snímaní kapacitnej odozvy pri periodicky opakovanom zaplňaní a vyprázdňovaní hlbokých energetických hladín (E_T). Po pripojení záverného napätia (U_R) sú v oblasti priestorového náboja (w) energetické hladiny vyprázdnené a štruktúra má kapacitu (C_R). Pomocou plniaceho impulzu (U_P) je oblasť priestorového náboja zúžená a dochádza k zaplneniu hlbokých hladín nosičmi náboja (zachytu nosičov v poruchách). Po uplynutí času (t_p) sa napätie vráti na hodnotu U_R a nastáva termálna emisía nosičov náboja zo zaplnených hladín (uvoľnenie nosičov z porúch). Táto emisía spôsobí exponenciálnu zmenu kapacity s emisnou časovou konštantou τ .



Obr. 1. Princíp DLTS metódy: a) rovnovážny stav po pripojení záverného napätia, b) zaplnenie hlbokých energetických hladín majoritnými nosičmi pri aplikovanom plniacom napätí, c) emisía zo zaplnených hlbokých energetických hladín po skončení plniaceho napätia, d) zmeraná kapacitná odozva v závislosti od času (kapacitná transienca) [9].

Celý proces sa periodicky opakuje pre rôzne teploty počas ktorých je meraná kapacitná transientsia. Nameranú kapacitnú transientsiu je možné ďalej spracovávať pomocou Fourierovej alebo Laplaceovej transformácie a inými matematickými operáciami [10, 11]. Výsledkom je DLTS spektrum a graf Arrheniových závislostí s vypočítanými parametrami porúch.

2 Experiment

V rámci experimentu bol skúmaný výkonový MOSFET tranzistor na báze SiC od spoločnosti STMicroelectronics vyvíjaný pre komerčné účely. Skúmaný tranzistor sa vyznačuje vlastnosťami ako veľmi nízky odpor v zopnutom stave na jednotku plochy (typicky 75 mΩ) a veľmi dobrým spínacím výkonom. Zmena spínacích strát je takmer nezávislá od teploty prechodu. Maximálne operačné napätie tranzistora je $U_{DS} = 1200$ V a prúd $I_D = 33$ A (pri 25 °C) [12]. Tranzistor je určený na použitie v oblasti automobilového priemyslu, pre spínanie vysokého výkonu v meničoch a pre dobíjanie batérie.

Hlavným cieľom experimentu je skúmať vplyv elektrického namáhania - stresu na zmenu distribúcie elektricky aktívnych porúch tranzistora. Skúmaný tranzistor bol podrobený elektrickému stresu "Short circuit I" (SC I.) s parametrami: impulzné napätie $U_p = 200$ V, čas medzi impulzmi $t_p = 2$ μs a 65 000 opakovaných cyklov.

Všetky DLTS merania boli realizované na meracom pracovisku BIO-RAD DL8000, ktoré spracováva merané kapacitné transientsie pomocou Fourierovej analýzy. Namerané DLTS spektra boli vyhodnocované priamou analýzou Fourierových parametrov. Zo zostavených Arrheniových závislostí boli vypočítané aktivačné energie a záchytné prierezy jednotlivých identifikovaných elektricky aktívnych porúch.

3 Výsledky a diskusia

Skúmaný tranzistor bol meraný v zapojení Gate-Drain (High elektróda bola pripojená na Gate a Low elektróda na Drain) v rozsahu teplôt 120 K až 530 K. DLTS merania boli vykonané pred a po aplikovaní elektrického stresu SC I pri rovnakých vstupných podmienkach: plniaci napäťový impulz $U_p = -8$ V, záverné predpätie $U_R = -10$ V, čas snímania $T_w = 10, 20, 50, 100$ ms a dĺžka plniaceho impulzu $t_p = 5$ ms.

Na Obr. 2 je znázornené porovnanie nameraného DLTS spektra pred a po elektrickom strese. Najväčší rozdiel môžeme vidieť v rozsahu teplôt 120 K – 200 K, kde nastal pokles DLTS signálu po strese v porovnaní s meraním pred stresom. Pri teplotách v rozsahu od 200 K až 380 K je DLTS spektrum približne zhodné pre obe merania. Pre vyššie teploty nastáva veľmi mierny rozdiel DLTS signálov, hlavne v okolí teploty 430 K.

Namerané a simulované DLTS spektrum pred použitím elektrického stresu spolu so simuláciami DLTS spektier pre každú identifikovanú poruchu je zobrazené na Obr. 3. V DLTS spektre bolo pomocou priamej evaluácie identifikovaných 9 elektrónových elektricky aktívnych porúch (T1 – T9). V rozmedzí teplôt 100 K až 200 K bolo zistených päť porúch T1 – T5. Tieto poruchy spolu vytvorili maximum v DLTS spektre dosahujúci hodnotu takmer 1 pF. Od teploty viac ako 200 K boli zistené ďalšie 4 poruchy. T6 pri teplote 250 K, T7 a T8 pri teplote 350 K a porucha T9 pri teplote 475 K.

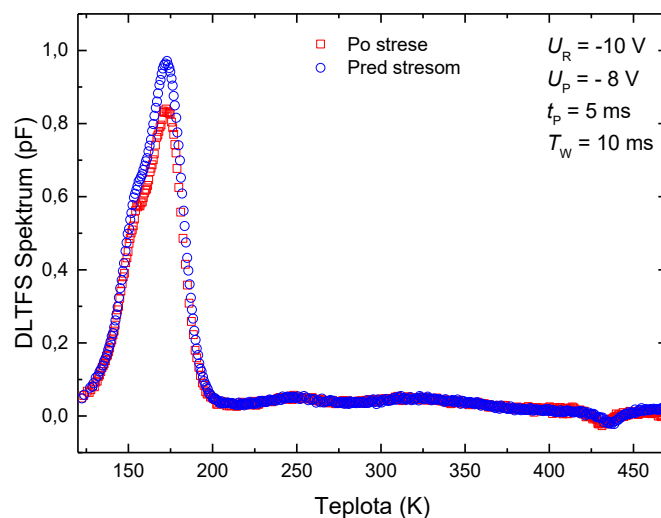
Arrheniove závislosti identifikovaných porúch T1 – T9 sú znázornené na Obr. 4.

Namerané a simulované kompletne DLTS spektrum spolu so simuláciami DLTS spektier pre všetky identifikované poruchy po aplikácii elektrického stresu je zobrazené na Obr. 5. Celkovo bolo identifikovaných 10 elektrónových porúch T10 – T19. Rovnako ako v prípade pred použitím stresu DLTS spektrum dosahovalo maximum v rozsahu teplôt od 100 K do 200 K. Toto maximum tvorilo spolu 5 porúch T10 – T15 s maximálnou hodnotou približne 0,8 pF. Pre vyššie teploty boli identifikované 4 poruchy T16 – T19. Porucha T16 sa nachádza pri teplote 250 K. Zvyšné poruchy T17 – T18 tvoria spolu menšie lokálne maximum pri teplotách od 300 K do 350 K. Arrheniove závislosti porúch T10 – T19 identifikovaných po namáhaní elektrickým stresom sú uvedené na Obr. 6.

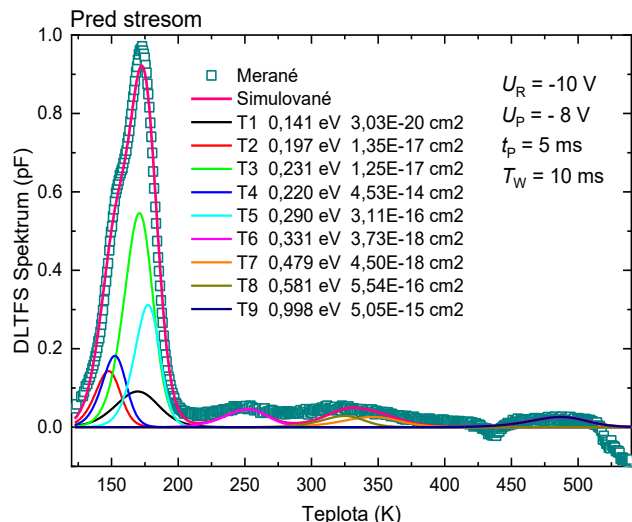
Arrheniove závislosti všetkých identifikovaných porúch pred a po aplikovaní elektrického stresu sú zobrazené na Obr. 7. Z porovnania Arrheniových závislostí vyplýva, že niektoré poruchy majú veľmi blízke poprípade totožné závislosti.

V prípade porúch T2 (0,197 eV) a T10 (0,187 eV) sa Arrheniove závislosti v podstate prekrývajú, aktivačná energia líši iba o 10 meV, záchytný prierez je rovnaký $8,07 \times 10^{-18}$ cm², vďaka čomu predpokladáme rovnaký pôvod týchto porúch. Poruchy T4 (0,220 eV) a T12 (0,223 eV) majú tiež veľmi blízke Arrheniove závislosti, rovnaké aktivačné energie zatiaľ čo ich záchytné prierezy sú značne odlišné ($4,52 \times 10^{-14}$ cm², $5,64 \times 10^{-17}$ cm²).

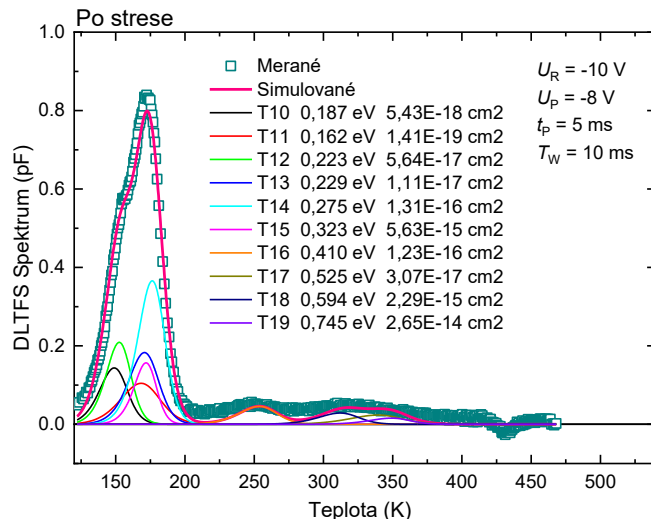
Väčší zhuk tvoria poruchy T1, T3, T5, T11, T13, T14 a T15. Z týchto porúch môžeme považovať za totožné poruchy T3 (0,231 eV, $1,25 \times 10^{-17}$ cm²) a T13 (0,229 eV, $1,11 \times 10^{-17}$ cm²), ktorých veľmi blízke Arrheniove závislosti zodpovedajú takmer rovnakým veľkostiam aktivačných energií a záchytných prierezov. Poruchy T1 (0,141 eV, $3,03 \times 10^{-20}$ cm²) a T11 (0,162 eV, $1,41 \times 10^{-19}$ cm²) majú rozdiel v aktivačnej energii o 21 meV a v záchytnom priereze $1,11 \times 10^{-19}$ cm², preto majú čiastočne posunuté Arrheniove závislosti. Poruchy T6 (0,331 eV) a T16 (0,410 eV) majú veľmi blízke Arrheniove závislosti, ale značne odlišnú aktivačnú energiu o 79 meV a záchytný prierez $1,19 \times 10^{-16}$ cm².



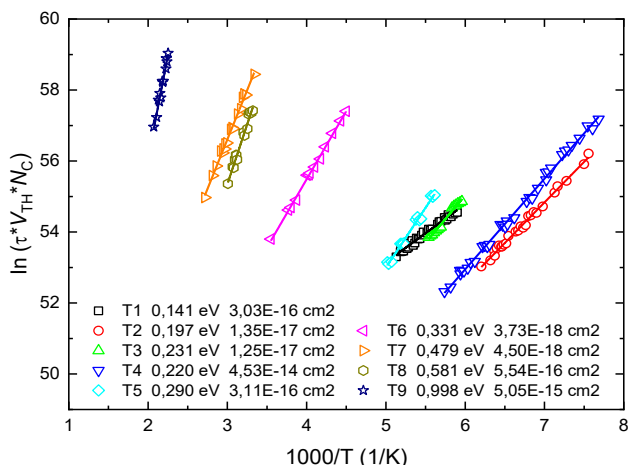
Obr. 2. Namerané DLTS spektra na skúmanej štruktúre pred a po aplikovaní elektrického stresu



Obr. 3. Odmerané a simulované DLTFS spektrum spolu so simuláciami DLTS spektrier pre každú identifikovanú poruchu pred použitím elektrického stresu.



Obr. 5. Odmerané a simulované DLTFS spektrum spolu so simuláciami DLTS spektrier pre každú identifikovanú poruchu po použití elektrického stresu.

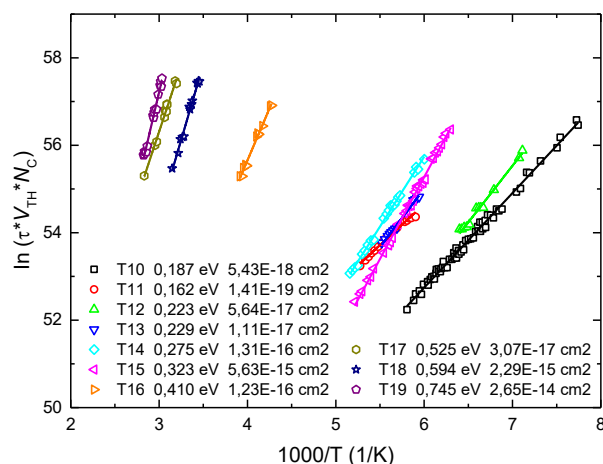


Obr. 4. Arrheniove závislosti elektrónových porúch v meraných štruktúrach pred použitím elektrického stresu

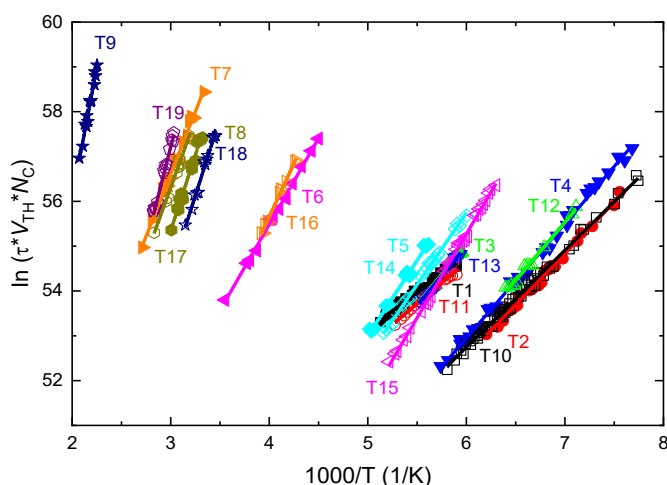
Podobne poruchy T5 (0,290 eV) a T14 (0,275 eV) majú takmer zhodné aktivačné energie, ale rozdiel v záchytnom priereze posúva Arrheniove závislosti. Tieto zmeny sú spôsobené namáhaním elektrickým stresom.

Ďalšie zoskupenie v okolí 300 K je tvorené poruchami T7, T8, T17, T18 a T19, kde poruchy T8 (0,581 eV) a T18 (0,594 eV) majú veľmi blízke aktivačné energie s rozdielom 13 meV a čiastočne odlišný záchytný prierez o $1,74 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, čo má za následok posunutie Arrheniových závislostí. Tento posun je taktiež následok vplyvu elektrického stresu. Poruchy T7 (0,479 eV, $4,50 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$) a T17 (0,525 eV, $3,07 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$) majú napriek rozdielnym parametrom veľmi blízke Arrheniove závislosti.

Porucha T9 (0,998 eV) bola zachytená iba meraním pred aplikovaním elektrického stresu, keďže je identifikovaná pri 500 K. Poruchy T15 (0,323 eV) a T19 (0,745 eV) boli identifikované vo vyšetrovanej štruktúre iba po strese.



Obr. 6. Arrheniove závislosti elektrónových porúch po použití elektrického stresu



Obr. 7. Porovnanie Arrheniových závislostí elektrónových porúch pred a po aplikácii elektrického stresu

Všetky identifikované poruchy a ich parametre sú uvedené v Tab. 1. Pre niektoré identifikované poruchy bol určený ich možný pôvod podľa dostupnej literatúry.

Tab. 1 Porovnanie parametrov porúch určených z Arrheniových závislostí pred a po namáhaní elektrickým stresom

Porucha	ΔE_T (eV)	σ_T (cm ²)	Pravdepodobný pôvod
T1	0,141	$3,03 \times 10^{-20}$	Nečistota N [13]
T2	0,197	$1,35 \times 10^{-17}$	Nečistota Ti [14]
T3	0,231	$1,25 \times 10^{-17}$	Nečistota Al [15]
T4	0,220	$4,53 \times 10^{-14}$	-
T5	0,290	$3,11 \times 10^{-16}$	ID ₃ [14]
T6	0,331	$3,73 \times 10^{-18}$	-
T7	0,479	$4,50 \times 10^{-18}$	Z _{1/2} [16]
T8	0,581	$5,54 \times 10^{-16}$	Z _{1/2} [16]
T9	0,998	$5,05 \times 10^{-15}$	RD ₃ [14]
T10	0,187	$5,43 \times 10^{-18}$	Nečistota Ti [14]
T11	0,162	$1,41 \times 10^{-19}$	Nečistota N [13]
T12	0,223	$5,64 \times 10^{-17}$	-
T13	0,229	$1,11 \times 10^{-17}$	Nečistota Al [15]
T14	0,275	$1,31 \times 10^{-16}$	ID ₃ [14]
T15	0,323	$5,63 \times 10^{-15}$	-
T16	0,410	$1,23 \times 10^{-16}$	-
T17	0,525	$3,07 \times 10^{-17}$	Z _{1/2} [16]
T18	0,594	$2,29 \times 10^{-15}$	Z _{1/2} [16]
T19	0,745	$2,65 \times 10^{-14}$	EH ₃ [16]

4 Záver

Širokopásmový polovodič karbid kremika je, vďaka svojim vlastnostiam, vhodným kandidátom ako náhrada kemika vo výkonových tranzistoroch.

V tomto príspevku bol skúmaný vplyv elektrického namáhania - stresu SC I na distribúciu porúch vo vyvíjanom výkonovom MOSFET tranzistore na báze SiC od spoločnosti STMicroelectronics. Pomocou metódy DLTS bolo identifikovaných spolu 19 elektrónových elektricky aktívnych porúch T1 – T19. Bol určený pravdepodobný pôvod porúch pred a po aplikovaní elektrického stresu. Poruchy sú spôsobené nečistotami dusíka, kovovými nečistotami titánu a hliníka a intrinzickými poruchami ID₃, Z_{1/2}, RD₃ a EH₃.

Elektrický stres aplikovaný na vyšetrovaný tranzistor spôsobil zmenu v koncentrácii elektricky aktívnych porúch. Výrazná zmena nastala hlavne pri teplotách od 120 K po 200 K. Boli identifikované dve nové poruchy pri teplote 180 a 430 K.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla s podporou spoločného fondu ECSEL (JU) na základe dohody o grante REACTION č. 783158. Tento JU dostáva podporu z programu výskumu a inovácií Európskej únie v rámci programu Horizon 2020 a Talianska, Nemecka, Belgicka, Švédska, Rakúska, Rumunska, Slovenska, Francúzska, Poľska, Španielska, Írska, Švajčiarska a Izraela. Táto práca bola podporená aj študentským projektom EMSTUDY 115721.

5 Literatúra

- [1] BALIGA, B. J. "Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 10, no. 10, pp. 455-457, Oct. 1989, doi: 10.1109/55.43098.
- [2] HUDGINS, J. L. Wide and narrow bandgap semiconductors for power electronics: *A new valuation*. *Journal of Electronic Materials*. 2003, 32(6), 471-477. ISSN 0361-5235. doi:10.1007/s11664-003-0128-9
- [3] DING, X., DU, M., ZHOU, T., GUO, H., ZHANG, Ch. a CHEN, F. Comprehensive Comparison between Sic-mosfets and Si-igbts Based Electric Vehicle Traction Systems under Low Speed and Light Load. *Energy Procedia*. 2016, 88, 991-997. ISSN 18766102. doi:10.1016/j.egypro.2016.06.124
- [4] NITZSCHE, M. et al. "Comprehensive Comparison of a SiC MOSFET and Si IGBT Based Inverter," PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2019
- [5] HURLE, D.T.J. a RUDOLPH, P.. A brief history of defect formation, segregation, faceting, and twinning in melt-grown semiconductors. *Journal of Crystal Growth*. 2004, 264(4), 550-564. ISSN 00220248. doi:10.1016/j.jcrysgro.2003.12.035
- [6] MAHAJAN, S. Defects in semiconductors and their effects on devices. *Acta Materialia*. 2000, 48(1), 137-149. ISSN 13596454. doi:10.1016/S1359-6454(99)00292-X
- [7] WEISS, S. a KASSING, R. Deep Level Transient Fourier Spectroscopy (DLTFS)—A technique for the analysis of deep level properties. *Solid-State Electronics*. 1988, 31(12), 1733-1742. ISSN 00381101. doi:10.1016/0038-1101(88)90071-8
- [8] SCHRODER, D. K. Semiconductor material and device characterization, 3rd ed. N. J. Hoboken, Wiley, 2006, p. 779, ISBN 978-0471739067.
- [9] CAPAN, I. a BRODAR, T. Majority and Minority Charge Carrier Traps in n-Type 4H-SiC Studied by Junction Spectroscopy Techniques. *Electronic Materials*. 2022, 3(1), 115-123. ISSN 2673-3978. 10.3390/electronicmat3010011
- [10] DAS, A., SINGH, V. A., LANG, D. V. Deep-level transient spectroscopy (DLTS) analysis of defect levels in semiconductor alloys. *Semiconductor science and technology*, 1988, 3.12: 1177.
- [11] RUSLI, Nazreen a Didier DEBUF. A modular system of Deep Level Transient Spectroscopy. In: 2011 *IEEE*

International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE). IEEE, 2011, 2011, s. 234-239. ISBN 978-1-4577-2059-8. doi: 10.1109/ICCAIE.2011.6162137

- [12] Datasheet SCTW40N120G2VAG. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/sctw40n120g2vag.pdf>
- [13] KAINDL, Winfried, et al. "Experimental characterization and numerical simulation of the electrical properties of nitrogen, aluminum, and boron in 4H/6H-SiC." *Journal of Electronic Materials* 28 (1999): 154-160.
- [14] DALIBOR, T., et al. Deep defect centers in silicon carbide monitored with deep level transient spectroscopy. *physica status solidi (a)*, 1997, 162.1: 199-225.
- [15] MANDAL, Krishna, MUZYKOV, Peter, CHAUDHURI, Sandeep & Terry, James. (2012). Assessment of 4H-SiC epitaxial layers and high resistivity bulk crystals for radiation detectors. *Proc SPIE*. 8507. 85070C-85070C. 10.1117/12.946026.
- [16] ZHOU, Xiang, Gyanesh PANDEY, Reza GHANDI, Peter A. LOSEE, Alexander BOLOTNIKOV a T. Paul CHOW. Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) Study of 4H-SiC Schottky Diodes and PiN Diodes. *Materials Science Forum*. 2019, 963, 516-519 [cit. 2023-04-19]. ISSN 1662-9752. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.963.516.

Skúmanie porúch vo výkonových diódach z karbidu kremíka

Tomáš Táčik¹, Matej Matuš¹, Ľubica Stuchlíková¹

¹ Ústav elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave

xtacik@stuba.sk

Abstrakt – Identifikácia elektricky aktívnych porúch vo výkonových diódach z karbidu kremíka (SiC) umožňuje zistiť kvalitu týchto súčiastok ako aj poskytuje možnosť optimalizácie výrobného procesu. V tomto príspevku predstavujeme výsledky skúmania elektricky aktívnych porúch vo výkonových diódach na báze SiC metódou spektroskopie hlbokých hladín. Zistili sme parametre jednej dierovej poruchy ($0,266 \pm 0,010$ eV) a troch elektrónových porúch ($0,309 \pm 0,002$ eV, $0,561 \pm 0,052$ eV a $0,812 \pm 0,073$ eV). Výsledky potvrdili dobrú reprodukovateľnosť štruktúr pri výrobe.

1 Úvod

Trh s polovodičmi dnes presahuje 200 miliárd USD, pričom približne 10 % príjmov pochádza z výkonových polovodičových prvkov a inteligentných výkonových integrovaných obvodov [1]. Odhaduje sa, že najmenej 50 % elektrickej energie spotrebovanej na svete je riadených výkonovými polovodičovými prvkami a obvodmi. Vzhľadom na rozsah využívania výkonovej elektroniky v spotrebiteľskom, priemyselnom, zdravotníckom a dopravnom sektore majú výkonové prvky veľký vplyv na hospodárstvo, pretože určujú náklady a účinnosť výkonových systémov. Po počiatočnom nahradení vákuových trubíc polovodičovými zariadeniami v 50. rokoch 20. storočia prevzali dominantnú úlohu polovodičové výkonové súčiastky. Základným materiálom je kremík (Si), ale v súčasnosti sa stále viac uplatňujú relatívne nové, progresívne polovodičové materiály, napr. karbid kremíka (SiC), nitrid gália (GaN) alebo oxid gália (Ga_2O_3). Použitie týchto materiálov umožňuje výrazné zvýšenie účinnosti výkonových elektronických súčiastok oproti prvkom na báze Si.

Širokopásmový polovodič karbid kremíka (SiC) je pozoruhodný materiál mimoriadne perspektívny pre výkonové aplikácie, o čom svedčia jeho parametre uvedené v Tab. 1 [2]. Existuje viac ako 220 rôznych polytypov SiC. V závislosti od polytypu kryštálovej štruktúry sa šírka zakázaného pásma SiC pohybuje od 2 až do 3,3 eV. Spomedzi polytypov sú technologicky najviac zaujímavé 3C-SiC, 4H-SiC a 6H-SiC, pretože z týchto materiálov možno vyrobiť substráty s priemerom 150 mm (6 palcové). Pre aplikácie výkonovej elektroniky je najlepší polytyp 4H SiC.

Prechod na väčšie rozmery substrátov patrí medzi päť najznámejších pák, ktorými inžinieri dokážu zabezpečiť medziročný rast produktivity v polovodičovom priemysle. V súčasnosti je preto enormná snaha o vývoj 200 mm (8 palcových) SiC substrátov [3]. Prínosom zväčšenej plochy substrátu je zvýšenie počtu prvkov, alebo matric, ktoré sa z neho dajú vyrobiť. Toto zvýšenie znižuje výrobné náklady na jeden

prvok/matricu, pretože počet krokov technologického procesu zostáva rovnaký.

Tab. 1. Vlastnosti 4H-SiC, 6H-SiC a Si [2]

	4H-SiC	6H-SiC	Si
Zakázané pásmo (eV)	3,26	3,02	1,12
Saturačná rýchlosť ($\times 10^7 \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	2	2	1
Pohyblivosť elektrónov ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1000	400	1400
Pohyblivosť dier ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	115	101	471
Prierné napätie ($\text{MV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	2,2	2,5	0,25
Tepelná vodivosť ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	3,7	4,9	1,5
Dielektrická konštanta	9,7	9,7	11,8

Kvalitu týchto prvkov, ich životnosť a spoľahlivosť, významne ovplyvňuje prítomnosť elektricky aktívnych porúch, ktoré napr. skracujú dĺžku života nosičov náboja, znižujú prierné napätie [4]. Tieto poruchy spôsobujú vznik hlbokých energetických hladín v zakázanom pásme polovodičov.

Na identifikáciu základných parametrov elektricky aktívnych porúch (aktivačná energia ΔE_T (eV) a zachytňový prierez σ_T (cm^{-3})) sa zvyčajne používa spektroskopia hlbokých hladín (Deep Level Transient Spectroscopy – DLTS [5]). Jedná sa o rýchlu a citlivú kapacitnú metódu, pričom jej výsledky sa dajú jednoducho vyhodnotiť. Z nameraných spektier je možné určiť, či sa jedná o poruchy spojené s majoritnými (kladný pík) alebo minoritnými nosičmi náboja (záporný pík) [6].

DLTS metóda meria zmenu kapacity v čase, ktorá nastane kvôli tepelnej emisii nosičov náboja z hlbokých energetických hladín v záverne polarizovanej bariérovej štruktúre. Emisno-zachytňové procesy nastanú po pripojení napäťových plniacich impulzov, ktoré následne spôsobujú zmenu šírky ochudobnenej oblasti polovodičovej bariérovej štruktúry, čo priamo súvisí so zmenou kapacity [5].

Pri skúmaní širokopásmových polovodičov metódou DLTS je energetický rozsah limitovaný na 1,3 eV (v prípade elektrónovej poruchy meraný od dolného okraja vodivostného pásma energetického diagramu). Tento limit je zapríčinený tým, že nosiče náboja musia byť tepelne excitované z hlbokých energetických hladín E_T v zakázanom pásme, zodpovedajúcej elektricky aktívnej poruche, do vodivostného pásma. V dôsledku toho je táto metóda nevhodná na štúdium porúch v strede zakázaného pásma širokopásmových polovodičov. Znamená to, že v závislosti od konkrétneho typu (polytypu)

SiC, určitý rozsah energie uprostred zakázaného pásma nie je pre štandardnú metódu DLTS dostupný. Tu treba dodať, že dostupný energetický rozsah sa môže rozšíriť, ak sú nosiče náboja excitované opticky [7].

Kinetika prenosu náboja sa používa na analýzu emisno-záchytných procesov v hlbkej energetickej hladine, je opísaná pomocou Schokley-Read-Hall štatistiky [8].

Emisnú rýchlosť e_n (obrátenú hodnotu časovej konštanty $\tau_n = 1/e_n$) voľných elektrónov z hlbkej energetickej hladiny môžeme vypočítať zo závislosti (1) [9]:

$$e_n = \sigma_n \cdot v_{th} \cdot N_C \cdot \exp\left(\frac{E_C - E_T}{kT}\right) \quad (1)$$

Kde σ_n – záchytný prierez elektrónov, v_{th} – tepelná rýchlosť, N_C – efektívna hustota stavov vo vodivostnom pásme, E_C – energia vodivostného pásma, E_T – energia hlbkej energetickej hladiny, zodpovedajúcej prítomnosti poruchy, k – Boltzmannova konštanta a T – termodynamická teplota.

Z tejto závislosti sa dopracujeme k vyjadreniu Arrheniovej závislosti (2):

$$\ln(\tau_n T^2) = \left(\frac{E_C - E_T}{kT}\right) - \ln(\gamma_n \sigma_n) \quad (2)$$

kde γ_n – teplotne nezávislý parameter polovodičového materiálu [5]. Pre získanie aktivačnej energie ΔE_T a záchytného prierezu σ_n zapíšeme Arrheniovú závislosť do tvaru rovnice priamky:

$$\begin{aligned} \ln(\tau_n T^2) &= A \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + B \\ \Delta E_T &= E_C - E_T = Ak \\ \sigma_n &= \frac{1}{\gamma_n} \exp(B) \end{aligned} \quad (3)$$

Postup vyjadrenia emisno-záchytných procesov dier je rovnaký, s tým rozdielom, že $\Delta E_T = E_V + E_T$ a efektívna hmotnosť dier je m_p^* [9].

Cieľom tohto príspevku je identifikovať parametre elektricky aktívnych porúch vo výkonových diódach z karbidu kremika narastených na 200 mm (8 palcových) SiC substrátoch v rámci optimalizácie technológie prípravy týchto diód.

2 Experiment

V rámci experimentu boli skúmané emisné a záchytné procesy vo výkonových diódach na báze SiC, od spoločnosti STMicroelectronics vyvíjané pre komerčné účely pomocou metódy kapacitnej DLTS. Všetky DLTS merania boli realizované na meracom pracovisku BIO-RAD DL8000, ktoré sníma celé kapacitné transiency a následne ich spracováva pomocou Fourierovej analýzy. Namerané DLTS spektra boli vyhodnocované priamou analýzou Fourierových koeficientov [6]. Diskrétné Fourierove koeficienty a_n , b_n (zodpovedajú kosínusovým a sínusovým koeficientom n -tého rádu) možno odhadnúť z každej nameranej kapacitnej transiency, pretože časovú konštantu τ definuje vzťah:

$$\tau(a_n, b_n) = \frac{1}{n\omega_0} \frac{a_n}{b_n} \quad (4)$$

kde ω_0 je uhlová frekvencia definovaná ako $\omega_0 = 2\pi/T_w$. T_w je doba snímania kapacitnej transiency.

Zo zostavených Arrheniových závislostí boli vypočítané aktivačné energie a záchytné prierezy jednotlivých elektricky aktívnych porúch (vzťahy 3).

Experimenty zahŕňali sady meraní DLTS za rôznych vstupných podmienok. Prvý súbor podmienok bol nasledovný: šírka elektrického pulzu $t_p = 5$ ms, doba snímania kapacitnej transiency $T_w = 10$ ms, 20 ms, 50 ms a 100 ms, záverné napätie $U_R = -6$ V a napätie plnenia pulzu $U_p = -4$ V. Druhý súbor podmienok bol: šírka elektrického pulzu $t_p = 5$ ms, šírky doby kapacitného prechodu $T_w = 100$ ms, 200 ms a 500 ms a 1 s, záporné napätie $U_R = -8$ V a napätie plnenia pulzu $U_p = -4$ V.

Všetky merania boli realizované v teplotnom rozsahu 120 K až 540 K.

3 Výsledky a diskusia

Typické DLTS spektrá namerané na skúmaných diódach sú znázornené na Obr. 1a,b. Tieto namerané spektrá sú doplnené simuláciami spektier štyroch zistených porúch.

Parametre štyroch identifikovaných porúch T1 až T4 boli určené z Arrheniových závislostí Obr. 2.

Všetky namerané spektrá vykazujú podobný charakter vo všetkých skúmaných štruktúrach. V závislosti od vstupných meracích podmienok sa mení koncentrácia jednotlivých porúch (veľkosť maxim/minim píkov zodpovedajúcich jednotlivým poruchám).

Pri teplote približne 150 K prechádza DLTS signál cez nulu, čo naznačuje emisiu z elektrónových a dierových porúch, ktoré spolu interagujú. V teplotnom rozsahu od 120 K do 200 K boli identifikované dve poruchy (T1 a T2). Parametre oboch porúch boli určené z viacerých nameraných DLTS setov spektier napriek tomu, že v niektorých nie je prítomnosť dierovej poruchy jednoznačne viditeľná.

Porucha T1 je dierová porucha s aktivačnou energiou $0,266 \pm 0,010$ eV a záchytným prierezom od $8,48E-17$ cm² do $5,73E-16$ cm². Predpokladáme, že ide o dierové poruchy súvisiace s prímiesami/nečistotami hliníka/bóru [10].

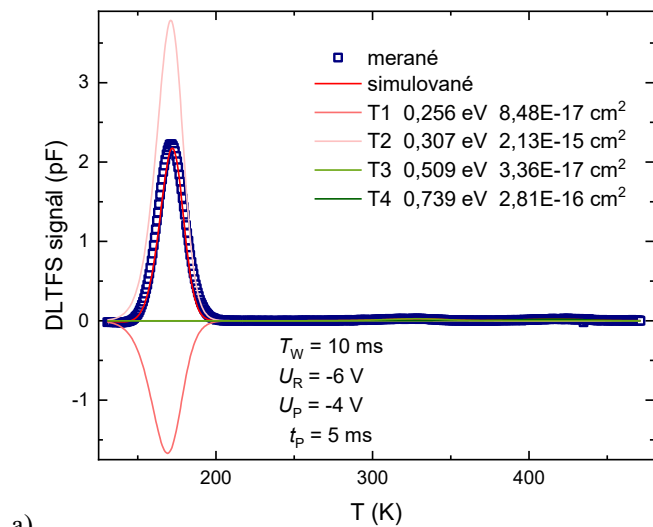
Porucha T2 je elektrónová porucha s aktivačnou energiou $0,309 \pm 0,002$ eV a záchytným prierezom od $2,13E-15$ cm² do $2,94E-15$ cm². Predpokladáme, že ide o elektrónové poruchy súvisiace s intrinzičnou poruchou označovanou ako ID₃ [11].

Koncentrácia porúch T3 a T4 je oveľa nižšia ako v prípade porúch T1 a T2.

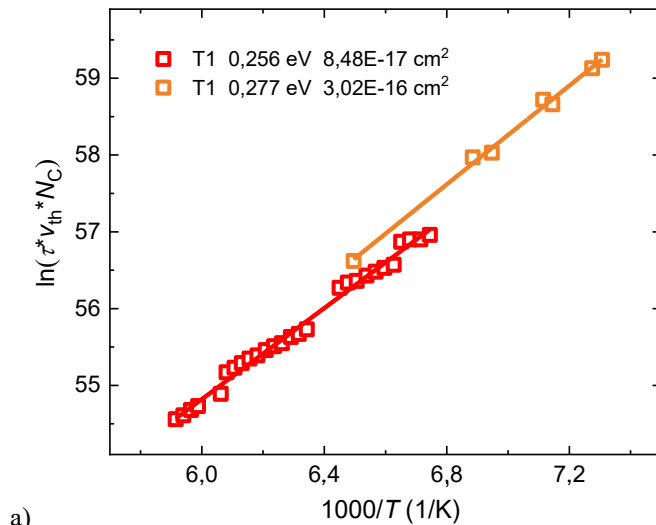
Porucha T3 je elektrónová porucha s aktivačnou energiou $0,561 \pm 0,052$ eV a záchytným prierezom od $3,36E-17$ cm² do $1,51E-15$ cm². Predpokladáme, že ide o elektrónové poruchy súvisiace s intrinzičnou poruchou Z_{1,2} [12].

Porucha T4 je elektrónová porucha s aktivačnou energiou $0,812 \pm 0,073$ eV a záchytným prierezom od $1,55E-17$ cm² do $2,81E-16$ cm². Predpokladáme, že ide o elektrónovú poruchu súvisiacu s EH₃ centrom [12].

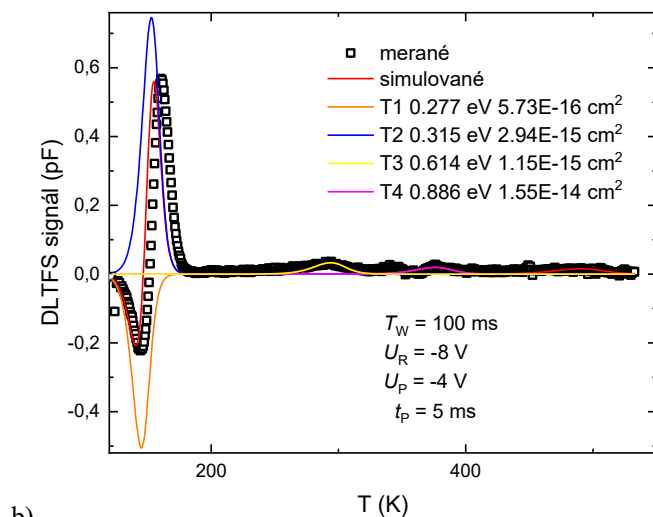
Sumár parametrov štyroch identifikovaných porúch a ich pravdepodobný pôvod podľa dostupnej literatúry je uvedený v Tab. 2.



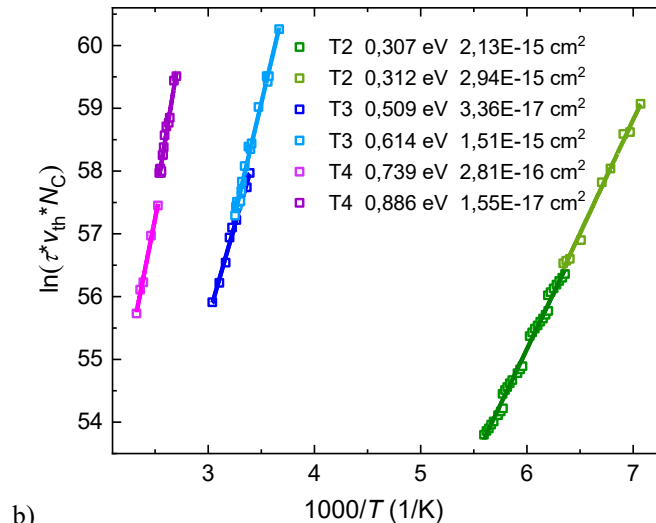
a)



a)



b)



b)

Obr. 1. Namerané DLTS spektrá pri rôznych vstupných meracích podmienkach a) a b) spolu so simuláciami DLTS spektrier pre každú identifikovanú poruchu a súčtovou simuláciou. Všetky štyri poruchy majú uvedené parametre, zistené priamou evaluáciou z Fourierových koeficientov.

Obr. 1. Arrheniove závislosti elektricky aktívnych a) dierových porúch; b) elektrónových porúch vypočítané pomocou Fourierových koeficientov z nameraných kapacitných transient.

Tab. 2 Parametre porúch určených z Arrheniových závislostí

Porucha	Aktivačná energia ΔE_T (eV)	Záchytný prierez σ_T (cm ²)	Možný pôvod
T1	$0,266 \pm 0,010$	$8,48 \times 10^{-17} - 5,73 \times 10^{-16}$	Nečistota Al/B [10]
T2	$0,309 \pm 0,002$	$2,13 \times 10^{-15} - 2,94 \times 10^{-15}$	ID ₃ [11]
T3	$0,561 \pm 0,052$	$3,36 \times 10^{-17} - 1,51 \times 10^{-15}$	Z _{1/2} [12]
T4	$0,812 \pm 0,073$	$1,55 \times 10^{-17} - 2,81 \times 10^{-16}$	EH ₃ [12]

4 Záver

Prechod na väčšie rozmery substrátov (aktuálne pre SiC zo 150 mm na 200 mm) znižuje výrobné náklady na jeden prvok/matricu, keďže počet krokov technologického procesu zostáva rovnaký. Následkom je medziročný rast produktivity v polovodičovom priemysle.

V rámci experimentu, ktorého výsledky sú predstavené v tomto príspevku, boli skúmané záchytné a emisné procesy vo výkonových SiC diódach narastených na 200 mm (8 palcových) SiC substrátoch vyvíjaných v spoločnosti STMicroelectronics.

Pomocou spektroskopie hlbokých hladín boli identifikované parametre jednej dierovej a troch elektrónových elektricky aktívnych porúch. Pravdepodobný pôvod dierovej poruchy súvisí s prímiesami Al alebo B. Pravdepodobný pôvod elektrónových porúch súvisí s intrinzičnými poruchami ID₃, Z_{1/2} a EH₃.

Výsledky potvrdili rovnaký charakter rozloženia defektov v meraných diódach v DLTS spektrách nameraných pri všetkých použitých meracích podmienkach. Naznačuje to dobrú reprodukovateľnosť vyvíjaných štruktúr pri výrobe na 200 mm SiC substrátoch.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla s podporou spoločného fondu ECSEL (JU) na základe dohody o grante REACTION č. 783158. Tento JU dostáva podporu z programu výskumu a inovácií Európskej únie v rámci programu Horizon 2020 a Talianska, Nemecka, Belgicka, Švédska, Rakúska, Rumunska, Slovenska, Francúzska, Poľska, Španielska, Írska, Švajčiarska a Izraela. Táto práca bola podporená aj študentským projektom EMSTUDY 115721.

Literatúra

- [1] BALIGA, J. B. Breakdown voltage. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*, 2019, 89-170.
- [2] ABDERRAZAK, H. a HADJ HMI, E. S. B. Silicon Carbide: Synthesis and Properties. In: GERHARDT, Rosario, ed. *Properties and Applications of Silicon Carbide* [online]. InTech, 2011, 2011-04-04 [cit. 2023-04-08]. 361-388, ISBN 978-953-307-201-2. Dostupné z: doi:10.5772/15736.
- [3] PARTHASARATHY, S., Shifting to 200 mm silicon carbide, *Compound Semiconductor*, 27, 7, 2021, 20-24, https://data.angel.digital/pdf/Compound_Semiconductor_Issue_7_2021_3.pdf.
- [4] MAHAJAN, S., Defects in semiconductors and their effects on devices. *Acta Materialia*. 2000, 48(1), 137-149. ISSN 13596454. doi:10.1016/S1359-6454(99)00292-X.
- [5] LANG, D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45.7: 3023-3032.
- [6] WEISS, S. a KASSING, R. Deep Level Transient Fourier Spectroscopy (DLTFS)—A technique for the analysis of deep level properties. *Solid-State Electronics*. 1988, 31(12), 1733-1742. ISSN 00381101. doi:10.1016/0038-1101(88)90071-8.
- [7] DALIBOR, T., et al. Deep defect centers in silicon carbide monitored with deep level transient spectroscopy. *Physica status solidi (a)*, 1997, 162.1: 199-225.
- [8] SHOCKLEY, W. a READ, W. T., Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. *Physical Review* 1952, 87(5), 835-842 [cit. 2023-04-08]. ISSN 0031-899X. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRev.87.83587.
- [9] SCHRODER, D. K. *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons, 2015.
- [10] KAINDL, W., LADES, M., KAMINSKI, N., NIEMANN, E. a WACHUTKA, G. Experimental characterization and numerical simulation of the electrical properties of nitrogen, aluminum, and boron in 4H/6H-SiC. *Journal of Electronic Materials*. 1999, 28(3), 154-160. ISSN 0361-5235. doi:10.1007/s11664-999-0006-1.
- [11] MANDAL, K. C., MUZYKOV, P. G., CHAUDHURI, S. K., TERRY, J. R., et al. *Assessment of 4H-SiC epitaxial layers and high resistivity bulk crystals for radiation detectors*. In: Proc SPIE. 8507. 2012-10-24, 85070C. doi:10.1117/12.946026.
- [12] ZHOU, X., PANDEY, G., GHANDI, R., LOSEE, P. A., BOLOTNIKOV, A a CHOW, T. P. Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) Study of 4H-SiC Schottky Diodes and PiN Diodes. *Materials Science Forum*. 2019, 963, 516-519. ISSN 1662-9752. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.963.516.

Sekcia 5

Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I

Šumy a ich prejavy v astronomických polovodičových fotodetektoroch

Kateryna Buzko

¹ Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

xbuzko@stuba.sk

Abstrakt –Projekt bol zameraný na pozorovanie tepelne závislých šumov astronomickej CMOS kamery. Pomocou zatemnenej kamery sme pri rôznych teplotách merali šumy spôsobené tmavým prúdom. Dosiahnuté výsledky sme interpretovali pomocou grafickej závislosti počtu pixelov od miery ich zašumenia a tak určili priemernú efektívnu excitačnú energiu použitého senzora.

Úvod

V tejto práci sa zameriavame na možnosti pozorovania a kvalitatívneho určenia niektorých základných šumových charakteristík astronomickej kamery, využívanej na pozorovania v rámci predmetu „Kozmické prístroje“. Ide o komerčnú kameru Omegon veTEC16000M, čo je monochromatická 16 M pixelová CMOS astronomická kamera s možnosťou chladenia citlivého senzora. Podrobnejšie sú jej známe parametre sumarizované v priloženej Tab. 1.

Tab. 1. Dôležité parametre kamery Omegon veTEC 16000M

CMOS Senzor	Panasonic MN34230
Rozmery senzora	17.6 mm x 13.3 mm
Rozlíšenie	4640 x 3506
Veľkosť pixelov	3.8 μm x 3.8 μm
Interný ADC	12 bit
Prevádzková teplota	-10°C až +50°C
Minimálna teplota senzora	do 40°C pod vonkajšou
Taktovacia frekvencia	54 MHz
Saturačný náboj (na pixel)	20 000 e
Interné zosilnenie	1 až 20 x

Ako každý merací prístroj, aj táto astronomická kamera vykazuje istú mieru nepresností, ktoré môžeme zjednodušene zhrnúť pod zovšeobecňujúci pojem – šum.

1 Šum ako nepresnosť pozorovania

Šum (v elektronike) sa používa pre označenie nežiaducej časti elektronického signálu, ktorý je superponovaný na meraný,

resp. pozorovaný signál. Typickým prejavom vizuálneho šumu je napríklad tzv. zrnenie na obrazovke televízora ak je televízny signál veľmi slabý alebo úplne absentujúci. Vo všeobecnosti, šum reprezentuje nezmyselné údaje, ktoré sa nepoužívajú na prenos signálu a vznikajú iba ako nechcený vedľajší produkt použitej elektroniky.

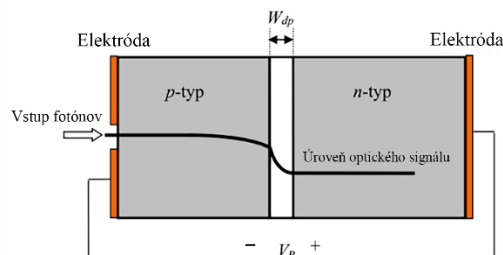
Fotodetektory, ako základné komponenty prijímačov optických signálov, pretvárajú vstupný optický signál na elektrický, pričom ako každé elektronické zariadenie pritom nevyhnutne generujú aj istý šum.

2 Polovodičové fotodetektory

V súčasnosti najpoužívanejším druhom fotodetektorov sú polovodičové fotodetektory, ktoré zvykneme označovať aj ako fotodiódy. Tieto sú predominantným typom hlavne vďaka ich malej veľkosti, vysokej rýchlosti a taktiež vysokej účinnosti detekcie. Nasledujúca časť je preto venovaná ich typológii a konštrukcii.

2.1 Základné princípy činnosti polovodičových fotodetektorov

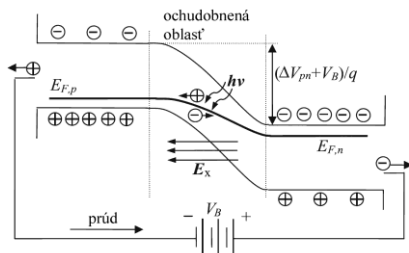
Polovodičové fotodetektory sa z hľadiska mikroskopickej štruktúry delia na dva hlavné druhy, tzv. PN a PIN fotodiódy. PN, teda dióda s čistým p-n prechodom je dvojelektrodové polovodičové zariadenie, ktoré vďaka usmerňovaciemu efektu p-n prechodu umožňuje tok elektrického prúdu iba v jednom (otvorenom) smere ale bráni toku prúdu pri zapojení v závernom smere. Je to priamy dôsledok toho, že v polovodičoch typu N sú hlavnými nosičmi náboja voľné elektróny, zatiaľ čo v polovodičoch typu P sú hlavnými nosičmi náboja diery. Keď sa polovodič typu N vodivo spojí s polovodičom typu P, vytvorí sa p-n prechod.



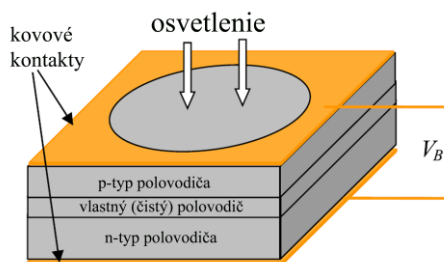
Obr. 1. Ilustrácia absorpcie fotónov v dióde

Svetlo dopadajúce na p-n prechod môže pri vhodnom zapojení generovať aj prúd na generovanie energie, čo je vlastne princíp činnosti fotovoltaičných panelov. Ide pritom o v podstate rovnaký elektrický prúd ktorý v našom prípade využívame na detekciu svetla.

PN prechodové diódy sa vyrábajú z polovodičových materiálov akými sú kremík, germánium, arzenid gália atď. V konštrukcii fotodiód sa uprednostňuje kremík pred germánium, lebo vďaka vyššej šírke zakázaného pásma vedia pracovať pri vyšších teplotách. V súčasnosti sa však priame fotodiódy PN veľmi nepoužívajú a sú nahradzované PIN fotodiódami.

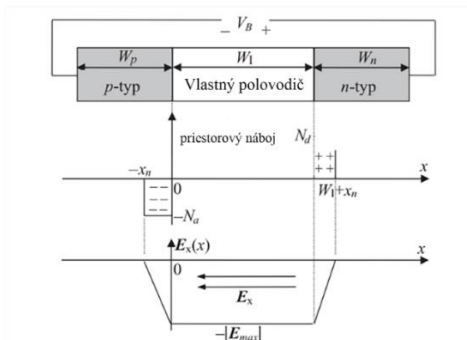


Obr. 2. Schéma energetických hladín p-n prechodu a schéma základného elektrického zapojenia fotodiódy



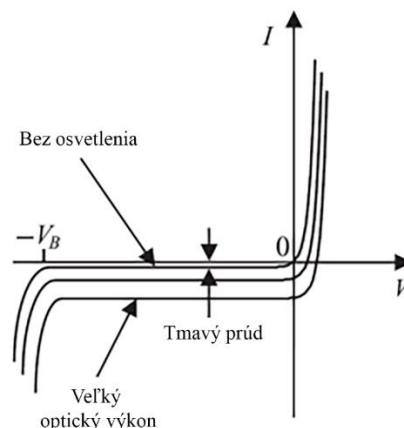
Obr. 3. Náčrt geometrického usporiadania polovodičového fotodetektora na báze PIN fotodiódy

Z hľadiska konštrukcie sú PIN fotodiódy doplnené o vrstvu vlastného polovodiča (angl. intrinsic), ktorá je situovaná medzi P a N vrstvy dopovaných polovodičov. Aj keď je činnosť fotodiód typu PIN je takmer identická, poskytujú rýchlejšiu odozvu, čo je mimoriadne žiaduce pri použití vo vysokorychlostných aplikáciách. Ďalším dôvodom využitia vrstvy vlastného (nedopovaného) polovodiča je zvýšenie účinnosti zachytu fotónov a s týmto spojený nárast prúdu minoritných nosičov náboja.



Obr. 4. Znázornenie rozloženia priestorového náboja a elektrického poľa v PIN dióde.

Z pohľadu činnosti sú fotodiódy vždy prevádzkované v závernom smere, čo demonštrujú Obr. 4 a 5.



Obr. 5. Volt-ampérová charakteristika polovodičovej fotodiódy s naznačeným efektom jej osvetlenia, resp. zatemnenia

2.2 Niektoré dôležité parametre fotodiódových detektorov

V praktických aplikáciách sa PIN fotodiódy prevádzkujú v dvoch základných typoch usporiadania senzorov a to ako CCD (Charge-coupled device) resp. CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) senzory. Vzájomne sa líšia spôsobom výroby, spôsobom ukladania náboja od registrovaného optického signálu a tiež spôsobom čítania tohto náboja z multipixelových 2D senzorov. V profesionálnej astronómii sa používajú prevažne CCD senzory, zatiaľ čo v amatérskej prevažujú podstatne (rádovo) lacnejšie CMOS senzory. Oba typy majú svoje prednosti aj nedostatky, avšak pre obe kategórie sú spoločné nasledovné hlavné faktory.

- **Faktor zaplnenia (Fill Factor)**
Miera (percento) plochy senzora citlivého na svetlo sa nazýva faktor naplnenia. V ideálnom prípade by mal byť faktor plnenia 100 percent. Obrazové CCD snímače dosahujú faktor naplnenia blízky 100 %, zatiaľ čo CMOS iba 60-70 %. To ovplyvňuje kvalitu obrazu pri snímaní aj množstvo potenciálne získateľnej informácie.
- **Šum od tmavého prúdu (Dark Current Noise)**
Je to nechcený ale nevyhnutný vedľajší jav činnosti fotodiód, spojený s procesom odčítania signálu. CCD obrazové snímače sú opäť menej ovplyvnený šumom tmavého prúdu, než snímače CMOS. Tento šum je dominantne závislý od teploty snímača.
- **Kvantová účinnosť (Quantum Efficiency)**
Kvantová účinnosť je pomer počtu detekovaných elektrónov a počtu dopadajúcich fotónov. Kvantová účinnosť (QE) je teda miera účinnosti s akou sú dopadajúce fotóny registrované.
- **Účinnosť prenosu náboja (Charge Transfer Efficiency)**
CTE vyjadruje percento elektrónov, ktoré sa stratia počas procesu prenosu náboja. Moderné CCD majú CTE okolo 99,999 %. CTE pri CMOS senzorov je oproti CCD nižšia.

2.3 Hlavné zdroje (typy) šumu v polovodičových fotodetektoroch

Rozlišujeme tri hlavné typy šumu v polovodičových fotodetektoroch: tepelný šum, výstrelový a šum od tmavého prúdu.

Tepelný šum, tiež známy ako Johnsonov-Nyquistov šum, je generovaný odporom zaťaženia. Spektrálna hustota tepelného šumu je nezávislá od frekvencie, preto ho označujeme aj ako biely šum. Tepelný šum sa riadi Gaussovou štatistikou a je charakterizovaný ako

$$\frac{I_{RMS}^2}{\Delta f} = \frac{4kT}{R_L} \quad (1)$$

kde R_L je odpor proti zaťaženiu, k je Boltzmannova konštanta a T je absolútna teplota. Pretože miera tepelného šumu je nepriamo úmerný zaťaženiu R_L , veľká záťažová odolnosť pomáha redukovať tepelný šum, avšak v kombinácii s parazitickou kapacitou môže podstatne znížiť frekvenčný rozsah (rýchlosť) detektora prostredníctvom RC časovej konštanty. Vo väčšine vysokorýchlostných optických zariadení sa preto volí kompromisné odporové zaťaženie $R_L = 50 \Omega$.

Výstrelový šum (shot noise), známy aj ako kvantový šum, vyplýva zo štatistickej povahy fotodetekcie. Ako príklad predpokladajme, že $1 \mu W$ optický výkon pri vlnovej dĺžke 1550 nm je zachytený fotodiódou. To znamená, že štatisticky asi $7,8 \times 10^{12}$ fotónov zasiahne fotodiódu každú sekundu. Registrované fotóny ale nie sú synchronizované a prichádzajú náhodne a generovaný fotoprúd bude preto tiež kolísať. Výstrelový šum je tiež biely šum a jeho spektrálna hustota môže byť vyjadrená ako

$$\frac{I_{RMS}^2}{\Delta f} = 2eI_f \quad (2)$$

kde e je náboj elektrónu a I_f registrovaný fotoprúd.

Šum od tmavého prúdu sa tiež dá považovať za druh výstrelového šumu, keď v rovnici (2) nahradíme fotoprúd prúdom tečúcim cez fotodiódu v zvolenom pracovnom bode (v závernej časti I-V charakteristiky, viď Obr. 5) pri jej úplnom zatienení. Dostávame

$$\frac{I_{RMS}^2}{\Delta f} = 2eI_D \quad (3)$$

kde I_D je práve tmavý prúd (dark current).

V podmienkach našich experimentov je dominantným zdrojom šumu práve šum spôsobený tmavým prúdom a jeho pozorovaniu je venovaná experimentálna časť tejto práce.

3 Experimentálna časť

Dostupný CMOS senzor Panasonic MN34230, integrovaný v tepelne regulovateľnej monochromatickej astronomickej kamere Omegon veTEC 16000M, je skoro ideálny nástroj na štúdium šumov, spojených s tmavým prúdom v PIN fotodiódových detektoroch svetla. Pri jeho úplnom zatemnení,

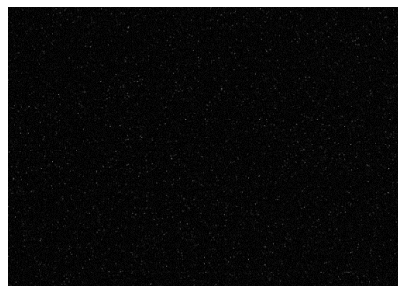
teda pri nulovom signále, sa dá variáciou teploty senzora skúmať efektívna excitačná energia spojená s pozorovaným šumom od tmavého prúdu. Tento, ako nakoniec u všetkých polovodičových detektorov, je dominantne určený exponenciálnym faktorom

$$I_D \sim \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) \quad (4)$$

kde Δ je hľadaná efektívna priemerná excitačná energia jednotlivých pixelov (PIN fotodiód) použitého senzora. V ideálnom prípade vysokokvalitných detektorov ionizujúceho žiarenia (napr. HPGe detektorov) sa hodnota efektívnej excitačnej energie blíži k šírke zakázaného pásma, čo v prípade Si detektorov je $1,1 \text{ eV}$. V prípade CMOS fotosenzorov má ale podstatne nižšiu hodnotu, pretože výrobné technológie výroby CMOS senzorov a integrácia obslužnej (zosilňovacej a čítacej) elektroniky priamo na čipe výrazne zhoršuje šumové podmienky, teda znižuje priemernú efektívnu excitačnú energiu senzora. Navyše je oprávnené predpokladať, že hodnota priemernej efektívnej excitačnej energie bude funkciou použitého analógového zosilnenia aplikovaného na každý pixel senzora.

3.1 Namerané výsledky

Meranie prebehlo pri uzatvorenej (zatemnenej) kamere, teda pri nulovom optickom signále. Cieľom bolo vykonať merania v rozsahu teplôt od -30° C do $+30^\circ \text{ C}$ s odstupom približne 5° . Hodnoty pri záporných teplotách boli namerané v exteriéri fakulty, keď vonkajšia teplota klesla k 0° C a elektronika (chladič) kamery umožňoval ochladiť senzor na nízke záporné teploty. Pri týchto meraniach bola kamera inštalovaná na teleskope a zatienená bola apertúra teleskopu. Merania pri kladných teplotách sa realizovali v interiéri. Postup merania bol taký, že kameru Omegon veTEC 16000M so zatvoreným objektívom sme pripojili k počítaču a s pomocou riadiaceho program ToupSky, presnejšie s pomocou funkcie "cooling", bol senzor na kamere ochladený do zadaných nami hodnôt. Taktiež sme nastavili požadované analogové zosilnenie, citlivý čas, binárnu hĺbku záznamu a raw (FITS) formát výsledku. Pri stlačení tlačidla "start" sa spustilo meranie šumov počas určitého nami citlivého času. Príklad toho, ako vyzerali obrázky sledovaných šumov je uvedený nižšie.



Obr. 6. Obrázok sledovania šumu kamery pri teplote $+29.5^\circ \text{ C}$.

Je zrejmé, že vizuálne nie je možné, okrem čiernej farby zodpovedajúcej prakticky nulovému signálu, nič rozlíšiť. Na samotné vyhodnotenie šumov preto použili astronomický formát FITS Liberator (alternatívne programový balík

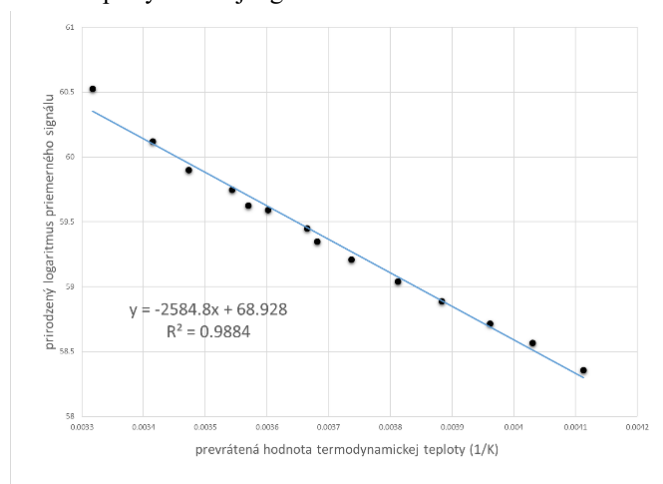
Mathematica) pomocou ktorého sme dokázali odčítať „mieru čiernosti“ obrázkov, konkrétne minimálny, maximálny, ale hlavne priemerný zaznamenaný signál. Týmto spôsobom sme vyhodnotili obrázky šumov pre každú hodnotu teploty. Výsledky a parametre meraní sú sumarizované v Tab. 2.

Tab. 2. Sumarizácia vykonaných meraní

teplota podla senzora v °C	citlivý čas (s)	analogove zosilnenie	Minimalna intenzita	Maximalna intenzita	Priemerna intenzita
28.3	25	20x	32	65504	2672.17
19.7	25	20x	16	65504	1777.82
14.8	25	20x	16	65504	1427.49
9.1	25	20x	16	65504	1226.51
7	25	20x	16	65504	1083.5
4.5	25	20x	16	65504	1049.64
-0.3	25	20x	16	65504	909.629
-1.5	25	20x	16	65504	821.38
-5.5	25	20x	16	65504	714.437
-10.8	25	20x	16	65504	604.771
-15.6	25	20x	16	65504	518.71
-20.7	25	20x	16	65504	437.193
-25	25	20x	16	65504	376.447
-30	25	20x	16	65504	304.507
20.5	500	1x	784	54352	1144.32
14.8	500	1x	720	53744	976.105
4.9	500	1x	656	52896	822.62
-0.1	500	1x	656	52432	786.738

Aby sme overili, či šumy závisia aj od niečoho okrem teploty, pre štyri vybrané hodnoty teploty sme zmenili citlivý čas a zosilnenie. Aj tieto výsledky sú zahrnuté v tabuľke 2.

Na určenie efektívnej priemernej excitačnej energie použitého senzora v zmysle rovnice (4) sme najskôr spravili graf závislosti logaritmu priemernej intenzity od prevrátenej hodnoty termodynamickej teploty, z ktorého vyplýva, že pri klesaní teploty klesá aj signál šumov.

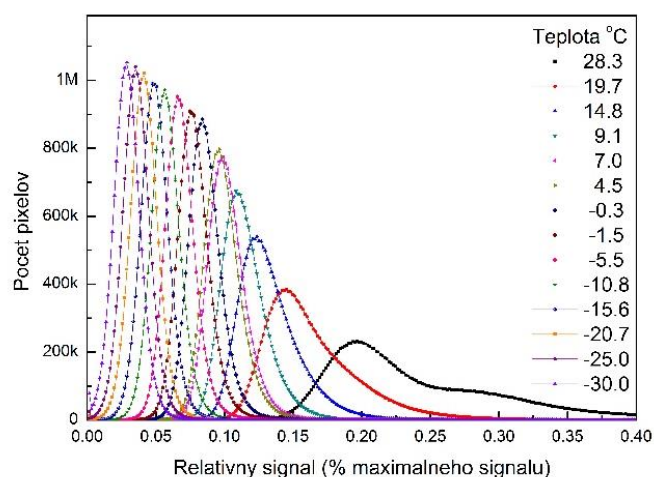


Obr. 7. Graf závislosti logaritmu priemernej intenzity od prevrátenej hodnoty teploty.

3.2 Dosiahnuté výsledky

Cieľom projektu bolo zistiť závislosť miery šumu od faktoru teploty. Prišli sme k výsledku, že čím vyššia je teplota, tým viac

silne zašumených pixelov budeme pozorovať. Závislosť (histogram) počtu pixelov od miery signálu šumu je najlepšie zrejmá z grafu na Obr. 8, ktorý bol zostrojený s pomocou programu Origin. Ako vidíme, pri vyššej teplote nielen vzniká omnoho viac šumov, ale líšia sa aj svojou distribúciou.

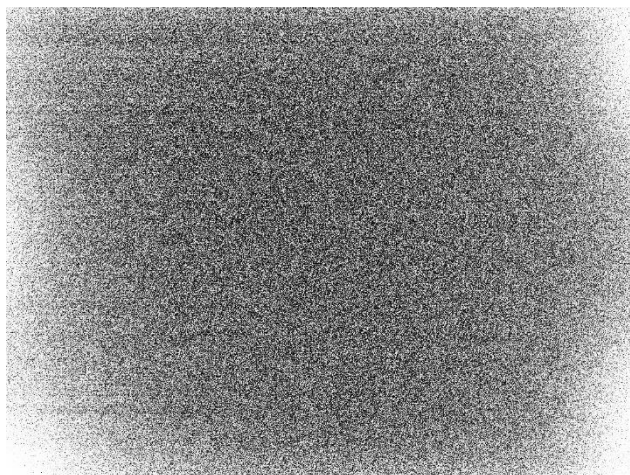


Obr. 8. Graf závislosti počtu pixelov od signálu šumu.

Podstatným výsledkom ale je, že zo smernice grafu na Obr. 7 vieme určiť hodnotu efektívnej priemernej excitačnej energie, ktorá je, pri použitom analógovom zosilnení 20x a expozičnom čase 25 s, $\Delta E = 2584 \times k_B = 0,22$ eV.

Ako sme uviedli v predošlej časti, pre vybrané hodnoty teploty sme výrazne zmenili zosilnenie aj citlivý čas s cieľom dosiahnuť aspoň približne rovnakú mieru šumu (20x menšie zosilnenie ale 20 x dlhší citlivý čas). Ako je z Tab. 2 vidieť, pri rovnakej teplote, ale rôznych podmienkach (expozičného času a zosilnenia), mení sa aj priemerná intenzita šumu. Napríklad, pri teplote 14.8°, zosilnení 20x a citlivom čase 25s priemerná intenzita sa rovnala 1427.49, ale pri zosilnení 1x a čase 500s priemerná intenzita bola len 976.105. Vykonaním identickej analýzy ako v predošlom prípade, teda zostrojením identického grafu ako na Obr. 7 sme zistili, že za týchto podmienok (zosilnenie 1x a expozičný čas 500 s) je efektívna hodnota priemernej excitačnej energie $\Delta E = 1444 \times k_B = 0,12$ eV. Z toho vyplýva, že miera šumu použitého senzora je síce podľa predpokladu dominantne určená jeho teplotou, je samozrejme menšia ako energetická medzera čistého kremíka, ale je relevantne ovplyvňovaná aj ďalšími faktormi. Je veľmi pravdepodobné, že vysoká citlivosť použitého senzora spôsobuje, že počas merania je registrovaný aj reálny signál, napr. od sekundárnych efektov mäkkej zložky kozmického žiarenia, ktorý pri týchto meraniach tiež interpretujeme ako šum. Pre overenie tejto hypotézy bude v budúcnosti potrebné vykonať rozsiahlu sériu podrobných meraní pri fixovanom zosilnení a viacerých expozičných časoch.

V tomto kontexte pripájame nasledujúci obrázok, ktorý demonštruje známy „okrajový“ efekt, keď pixle na okrajoch senzora sú vplyvom čítacej a obslužnej elektroniky senzora podstatne viac zašumené ako centrálné.



Obr. 9. Pozorovanie okrajového efektu senzora Panasonic MN34230.

Na Obr. 9 biela farba na okrajoch zodpovedá viac zašumeným pixelom, zatiaľ čo v strede senzora je pozorovaný menší šum. V skutočnosti je však aj Obr. 9 rovnako čierny ako Obr. 6 a rozlíšenie rozdielu šumov v strede a na okraji je dosiahnuté len vďaka digitálnemu spracovaniu obrázka, konkrétne výberu úzkej časti signálového histogramu merania, pri zosilnení 1x, expozičnom čase 500 s a teplote 0°C.

4 Záver a diskusia

Cieľom projektu bolo zistiť závislosť signálu šumov od teploty kamery. Pomocou meraní sme zistili a overili, že čím vyššia je teplota, tým vyšším bude aj signál šumov. Okrem toho, je pozorovaná aj závislosť od zosilnenia a citlivého času kamery.

Aby kamera pracovala pri optimálnych parametroch je potrebné úplne kompletne zmapovať pole jej parametrov a prevádzkovať ju pri takých vybraných parametroch, aby výsledky (obrázky) z nej boli čo najmenej ovplyvnené šumami.

Súčasne naše pozorovania upozorňujú na skutočnosť, že sa nedá “slepo veriť” každému obrázku, ktorý môžeme vidieť v médiách (internet). Dokonca aj snímky z vlastnej kamery vieme pomocou súčasných digitálnych technológií upraviť tak, aby sme úplne nerealisticky zdôraznili vlastnosti kamery, v našom prípade jej šumov.

Výsledky tohto projektu môžu byť užitočné pri zlepšení kvality akýchkoľvek fotografií, od všedných osobných do profesionálnych astronomických. Avšak, okrem teploty senzora a prostredia, treba dávať pozor aj na ďalšie charakteristiky kamery, najmä jej rozsah citlivého času a zosilnenia.

Podakovanie

Autori ďakujú predovšetkým Nadácii Tatra Banky, ktorá sa prostredníctvom projektu . 2022VZDinst021, 2022 „Podpora vzdelávania budúcich odborníkov pre kozmické aktivity SR a ESA“, poskytnutému Občianskemu združeniu „My, sme niekto iní“, podieľala na spolufinancovaní prístrojov využitých pri príprave tejto práce. Veľká vďaka patrí vedúcemu práce doc. RNDr. Pavlovi Valkovi, CSc. za odbornú pomoc pri

vypracovaní projektu a poskytnutí všetkých potrebných zdrojov a cenných rád.

Literatúra

- [1] Rongqing Hui 2020 Introduction to Fiber-Optic Communications. s. 125-154
- [2] Wikipedia
- [3] <https://www.blog.vikiwat.com/photodatchici/>
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00004-4>
- [4] <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/pn-junction-semiconductor-diode.html>

Pozorovanie difrakcie svetla a testovanie rozlišovacej schopnosti teleskopu Celestron EdgeHD 925

Filip Viest

Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

xviestf@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zameriava na pozorovanie difrakcie svetla a testovanie rozlišovacej schopnosti teleskopu. V teoretickej časti sa preberajú základné pojmy difrakcie, ktoré sa potom využívajú pri skúmaní tohto javu.

1 Úvod

V tomto projekte sme si stanovili za úlohu overiť teóriu difrakcie a skúmať správanie svetelných (a všeobecne) vln a dokázať správny výber kombinácie teleskopu a astronomickej kamery. Pridanou hodnotou bola pritom jedinečná príležitosť pracovať s teleskopom a pozorovať nočnú oblohu. Nezanedbateľným prínosom projektu je aj skúsenosť s písaním akademických prác, ktoré budú určite vhodné pri budúcom štúdiu.

2 Difrakcia svetla

Difrakcia je jav, ktorý pozorujeme keď vlnenie prechádza cez nejakú prekážku, zvyčajne vo forme štrbiny alebo iného otvoru. V tomto kontexte sa každý bod štrbiny, ktorým v tej chvíli vlnenie prechádza, stáva v zmysle Huygensovho princípu novým bodovým zdrojom šírenia vlnenia. V prípade svetla, teda svetelnej vlny, sa preto svetlo dostáva aj za geometrický tieň prekážky. Ak by sme pozorovali svetlo, ktoré prešlo cez štrbinu a dopadlo na tienidlo, videli by sme pruhy so znižujúcimi sa intenzitami od stredu smerom do strán, tzv. difrakčný obrazec. V geometrickom strede difrakčného obrazca pozorujeme centrálné maximum s najvyššou intenzitou a do oboch strán postupne sekundárne maximá s nižšou intenzitou, oddelené minimami.

Každý optický pozorovací prístroj je difrakčnými javmi ovplyvnený a tieto limitujú uhlovú rozlišovaciu schopnosť týchto prístrojov. Práve pozorovaniu difrakčných javov a overeniu teoretických difrakčných limitov rozlíšenie menšieho optického teleskopu je venovaná táto práca.

2.1 Teória difrakcie svetla

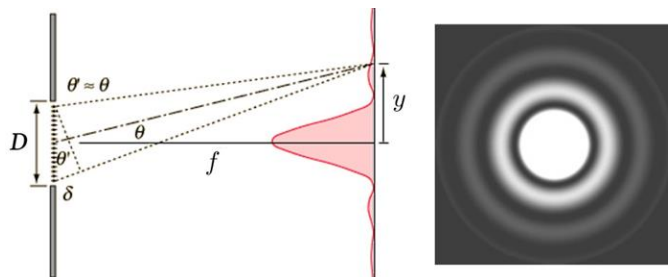
Z pohľadu fyziky rozoznávame dva druhy difrakčných javov, ktoré označujeme podľa mien fyzikov ktorí sa významne podieľali na ich štúdiu. Označením Fresnelova difrakcia označujeme difrakčné efekty pozorované v zbiehavom zväzku vlnenia (svetla). Pre účely tejto práce je ale dôležitejšia tzv. Fraunhoferova difrakcia, ktorá sa zaoberá difrakčnými efektmi v rovnobežnom zväzku, keďže svetlo od vzdialených hviezd

alebo iných veľmi malých zdrojov sa dá považovať za rovnobežný zväzok.

Absolútna väčšina pozorovacích prístrojov má okrúhlu apertúru, ktorou vchádza svetlo do teleskopu. Hypotetickú plochu vstupnej apertúry považujeme za vlnoplochu, od ktorej prostredníctvom Huygensovho princípu vzniká v ohniskovej rovine jej difrakčný obraz. Matematicky sa tento obraz vypočíta skladaním elementárnych, nekonečne malých plošných segmentov a výsledok integrovania cez tieto segmenty vo forme špeciálnej Besselovej funkcie prvého druhu vyjadruje nasledujúca rovnica (1).

$$I(w) = A^2 \left[\frac{2 J_1 \left(2\pi \frac{a\theta}{\lambda} \right)}{2\pi \frac{a\theta}{\lambda}} \right]^2 \quad (1)$$

kde a je polomer vstupnej apertúry, θ je sínus uhla medzi smerom prichádzajúceho a difraktovaného (ohnutého) svetla, λ je vlnová dĺžka pozorovaného svetla a A jeho amplitúda na vstupe [1]. Graficky je výsledkom tzv. Airyho obrazec, viď Obr. 1.



Obr. 1. Schéma difrakcie na kruhovej apertúre a Airyho disk.

Rovnica (1) aj obr. 1 demonštrujú, že v dôsledku difrakčných javov má každý optický prístroj definovaný principiálny limit rozlíšenia, keďže dva príliš blízke zdroje môžu v dôsledku difrakcie splyvať a nebudú rozlíšené. Existuje viacero kritérií podľa ktorých definujeme experimentálne rozlíšenie, napr. Rayleigh-o, Dawes-ovo, etc. avšak všetky majú spoločnú podstatu, keď uvádzajú limitné uhlové rozlíšenie ako funkciu pomeru vlnovej dĺžky pozorovaného svetla a priemeru apertúry prístroja, viď rovnica (2).

$$\Delta\alpha \cong \frac{\lambda}{2a} \quad (2)$$

2.2 Experimentálna časť

Podľa pripojenej tabuľky č. 1, má mať náš teleskop podľa údajov výrobcu uhlové rozlíšenie na úrovni menšej ako 1 uhlová sekunda (as), čo mienime v tejto práci overiť.

Tab. 1. Tabuľka hlavných parametrov teleskopu Celestron EdgeHD 925

Parameter	Hodnota parametra podľa výrobcu
Priemer apertúry	235 mm
Ohnisková vzdialenosť	2350 mm F/10
Primárny okulár a zväčšenie	23 mm – 2 palce (102x)
Hľadáčik	9x50
Diagonálny hranol	90° - 2 palce s 1,25 palcovým adaptérom
Najvyššie využiteľné zväčšenie	555x
Limitná hviezdna citlivosť	14,4 magn.
Rozlíšenie: Rayleigh Dawesov limit	0,59 uhlových sekúnd 0,49 uhlových sekúnd
Schopnosť zhromažďovania svetla	1127x voľného oka
Zorné pole: štandardný okulár	0,8°
Rozmer obštrukcie sekundárneho zrkadla	3,35 palca
podľa plochy	13%
podľa priemeru	36%
Dĺžka optickej trubice	22 palcov

Zamýšľané merania predpokladali využitie hviezd aj miniatúrnej laserovej diódy ako bodových zdrojov svetla. Aby sa červená laserová dióda dala na tento účel použiť, najskôr z nej bola odstránená kolimačná optika. Týmto sa aktívna oblasť jej p-n prechodu s typickou veľkosťou 5-10 μm dá pozorovať zo vzdialenosti väčšej ako dva metre pod uhlovým rozmerom 1 as. Pri experimentoch samotných sme využili vzdialenosti väčšie ako 50 m, pri ktorých sú vlastné rozmery diódy nepodstatné a dá sa považovať, podobne ako ľubovoľná hviezda, samozrejme s výnimkou Slnka, za bodový zdroj.



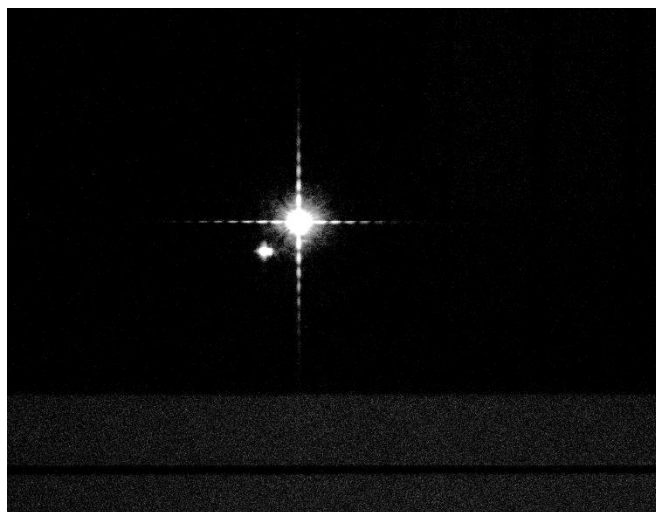
Obr. 2. Podstavec so zabudovanou laserovou diódou a zeleným filtrom pre zníženie jej intenzity.

Prvým experimentom bolo pozorovanie difrakčných javov pomocou hviezd zo strechy bloku C. Na Obr. 3 je znázornený použitý teleskop pri tomto pozorovaní



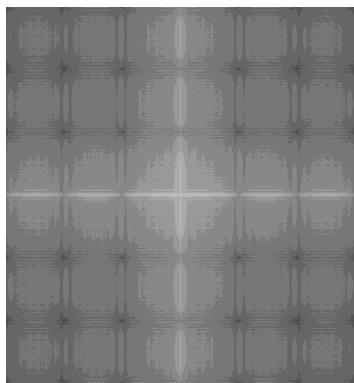
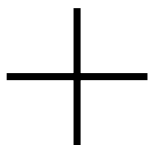
Obr. 3. Teleskop Celestron CPC Deluxe HD, pripravený na pozorovanie.

Na Obr. 4. je prvé pozorovanie difrakčných javov naším teleskopom umiestneným na streche bloku C. Ako zdroj svetla bola použitá červená laserová dióda s odstránenou kolimačnou optikou, znázornená ako jasný objekt v strede difrakčného kríža, umiestnená v otvorenom okne bloku A. Okrem samotnej laserovej diódy je rozpoznateľná aj bežná žltá LED použitá ako prúdový obmedzovač (vľavu nižšie od stredu) a parapet pred oknom samotným (spodná časť obrázka). Pri expozičnom čase 116 ms a teplote senzora 8.6°C je signál zjavne saturovaný a dominantný difrakčný príspevok pochádza od mrieže oplatenia učebnej hydroelektrárne na treťom poschodí strechy bloku C, ktorá prekáža v priamej viditeľnosti zdroja (na 6. poschodí bloku A).



Obr. 4. Prvé pozorovanie difrakčného javu naším teleskopom.

Pre porovnanie a dôkaz, že dominantný difrakčný kríž pochádza od tejto pravouhlej mriežky, je na Obr. 5 znázornený teoretický difrakčný obrazec od takejto prekážky, vypočítaný pomocou funkcie ImagePeriodogram v programe Mathematica.



Obr. 5. Numericky určený difrakčný obrazec (vpravo) vyvolaný prechodom svetla (vlnenia) cez pravouhlú drôtenú prekážku (znázornená vľavo).

Počas externého pozorovania laserovej diódy boli nepríjemné meteorologické podmienky. Kvôli silnému vetru, boli obrazce neostre a nedala sa na nich pozorovať difrakcia od apertúry. Kvôli nízkej vonkajšej teplote sme tiež zaznamenali tepelné diferencie medzi konektormi kamery a počítača, čo spôsobovalo znehodnotenie (korupciu) záberov. Pri dlhšom používaní sme museli často meniť využívaný konektor na ovládacom notebooku. Vzhľadom na extrémne veterné podmienky v čase pozorovania a všeobecne nevhodné počasie, sme ďalšie pozorovania presunuli do interiéru a obmedzili sme sa na laserovú diódu ako zdroj svetla.

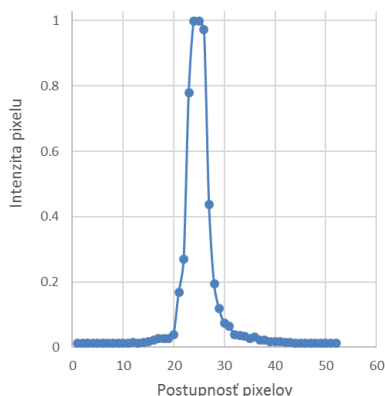
Podľa vzťahu (2) a priemeru vstupnej apertúry ďalekohľadu z Tab. 1 je teoretický limit rozlíšenia nášho teleskopu

$$\Delta_{\alpha} \cong \frac{\lambda}{2a} = \frac{600 \text{ nm}}{235 \text{ mm}} = 2,6 \times 10^{-6} \text{ rad} \quad (3)$$

čo je cca. 0,5 as. Vztiahnuté na použitý teleskop s ohniskovou vzdialenosťou 2350 mm (viď Tab.1) tento uhol zodpovedá lineárnej vzdialenosti v ohniskovej rovine

$$\Delta x = f \Delta_{\alpha} = 6,1 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (4)$$

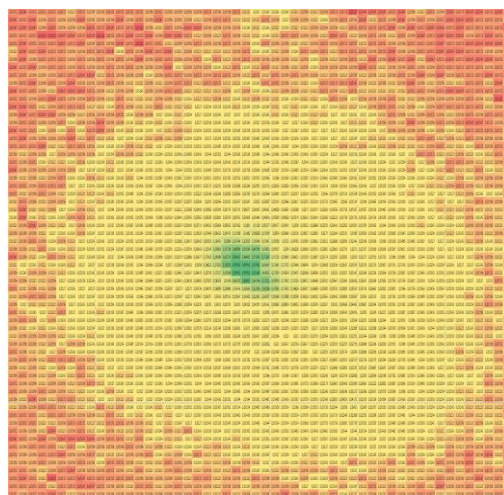
Použitý senzor Panasonic MN34230 implementovaný v použitej astronomickej kamere Omegon veTEC 16000M má podľa manuálu kamery lineárny rozmer štvorcových pixelov 3,8 μm . Očakávané rozlíšenie tak predpokladá, že celé prvé maximum difrakčného obrazca apertúry sa zobrazí v jednom, maximálne dvoch pixeloch.



Obr. 6. Graf závislosti intenzity obrazca od počtu pixelov prechádzajúcich cez stred obrazca, získaný pri expozičnom čase 0,04 sekundy.

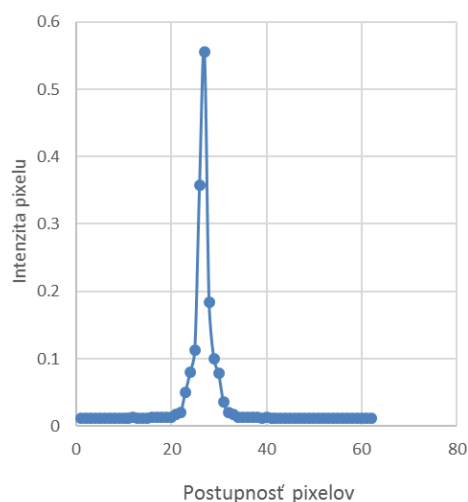
Nasledujúca séria meraní bola uskutočnená na chodbe tretieho poschodia bloku C a to tak, že laserová dióda bola umiestnená na okraji východnej strane chodby a bola pozorovaná z opačnej strany, krížom cez respírium, zo vzdialenosti viac ako 50 m. Pri prvom experimente, viď Obr. 6, bol signál úplne saturovaný (hodnota 1 celá) a šírka difraktogramu je viac ako 5 pixelov, teda podstatne viac ako predpokladá teória.

Napriek relatívne krátkemu expozičnému času (v zmysle astronomických pozorovaní) je centrálné maximum počas pozorovania nestabilné, okrem toho že je saturované, čo zjavne vplýva na dosiahnuté uhlové rozlíšenie. Nasledujúci Obr. 7 tiež demonštruje, že jednoduchý priamočiary rez maximum nemá úplne výpovednú hodnotu, pretože voľbou jeho orientácie ovplyvňujeme presný tvar grafu na Obr. 6.



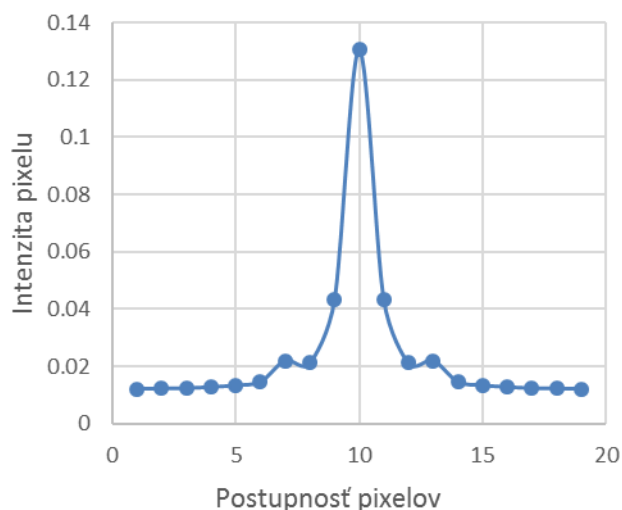
Obr. 7. Podmienené formátovanie 2D hodnôt pozorovaného difrakčného obrazca v exceli.

Pre zlepšenie pozorovania a potlačenie časovej nestability sme zvolili kratší expozičný čas, pri inak identických pozorovacích podmienkach, a dosiahli sme podstatne lepší výsledok, viď Obr. 8.



Obr. 8. Graf závislosti intenzity obrazca od počtu pixelov prechádzajúcich cez stred obrazca získaný pri expozičnom čase 0,0055 sekundy.

Z grafu na Obr. 8 vidieť, že pri znížení expozičného času je maximum „ostrejšie“, už nie je saturované, a dá sa predpokladať (vytúšiť) aj prítomnosť sekundárnych maxím v okolí 24. a 30. pixela. Pre finálne overenie sme využili vlastnosti riadiaceho programu kamery (ToupSky) a automaticky nechali priemerovať desať za sebou idúcich expozícií. Výsledok sme následne numericky spracovali tak, že sme v exceli určovali priemernú intenzitu pixelov rovnako vzdialených od centrálného (pixela s najvyššou intenzitou). Dosiahnutý výsledok je znázornený na obr. 9.



Obr. 9. Graf závislosti intenzity obrazca vytvorený z numerického spočítavania signálu okolo stredu spriemerovanej expozície.

Aj keď zjavná symetria grafu je v istom zmysle „umelá“, keďže vzdialenosť pixelov použitej v bodovej symetrii numerického spracovania je identická vpravo aj vľavo, demonštruje prítomnosť sekundárnych maxím ako to predpokladá Airyho obrazec (viď Obr. 1)

2.3 Diskusia

Na začiatku skúmaní sme chceli pozorovať difrakciu svetla na hviezdach ale kvôli neprívetivému fungovaniu zabudovanej funkcie SkyAlign v teleskope na automatické zameriavanie sme sa museli uskromniť pozorovaním laserovej diódy, pretože v dôsledku meteorologických podmienok neboli externé pozorovania vyhovujúce. Nastal problém v tepelnej diferencií medzi konektormi a zároveň obrazce vznikli priveľmi saturované. Kvôli týmto problémom sme neboli schopní s istotou merať v exteriéry a presunuli sme teleskop a merania do interiéru, pričom sme dosiahli očakávané výsledky.

3 Záver

Cieľom pozorovaní a výpočtov bolo overenie výberu správnej astronomickej kamery pre použitý teleskop a overenie difrakčných javov.

S pomocou laserovej diódy sme úspešne namerali difrakčný obrazec kruhovej apertúry teleskopu a potvrdili, že náš teleskop

skutočne dosahuje výrobcom udávané uhlové rozlíšenie. Priebeh intenzity znázornený na Obr. 9 potvrdzuje, že za ideálnych podmienok má hlavné interferenčné maximum šírku max. 2 pixely, teda $7,6 \mu\text{m}$, čo pri ohniskovej vzdialenosti 2350 mm zodpovedá $3,2 \times 10^{-6} \text{ rad}$ (0,8 as).

Keď sme pred nákupom teleskopu a kamery použitím vzťahov (3) a (4) určili, že hlavné difrakčné maximum sa zmestí do jedného, max. dvoch pixelov, týmto sme tento zámer experimentálne overili. Ak by sme použili kameru s nižším rozlíšením tak by sme nemohli dôveryhodne pozorovať difrakčné javy svetla. Na druhú stranu, ak by bola použitá kamera s vyššou rozlišovacou schopnosťou, tak by bola zbytočne presná na použitý teleskop.

Podakovanie

Autori ďakujú predovšetkým Nadácii Tatra Banky, ktorá sa prostredníctvom projektu . 2022VZDinst021, 2022 „Podpora vzdelávania budúcich odborníkov pre kozmické aktivity SR a ESA“, poskytnutému Občianskemu združeniu „My, sme niekto iní“, podieľala na spolufinancovaní prístrojov využitých pri príprave tejto práce.

Literatúra

- [1] <http://www.st.fmph.uniba.sk/~markos3/prednasky/emo.pdf> na strane 62

Modelling an Anisotropic Neutron Source Using the SCALE6 system

Matej Kleštinec¹, Jakub Lúley¹

¹Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Institute of Nuclear and Physical Engineering, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovakia

xklestinec@stuba.sk

Abstract – This paper presents a developed accelerator-based neutron source that simulates neutron anisotropy of the tandem accelerator in SAV Piešťany using the SCALE6 system developed by Oak Ridge National Laboratory. Anisotropy provides the directional and energetic distribution of the neutron source around a set direction. The developed neutron source incorporates specifications for the Tandetron's energy distribution and directional distribution using precalculated theoretical values of anisotropy calculated by the DROSG-200 program. The developed neutron source can find use in many fields, such as optimization of activities connected to the Tandetron, R&D activities, detector calibrations, safety calculations, neutron activation analyses, non-destructive neutron defectoscopy and neutron radiography.

1 Introduction

Neutrons as well as their sources do not occur naturally on the earth. To produce neutrons for experimental, educational or industrial applications, conversion reactions are utilized such as radiative capture of other types of particles (radionuclide sources), controlled (reactors) or spontaneous (Cf source) fission, spallation or fusion [1]. The last two options are primarily based on an accelerator, where accelerated heavy ions bombard target material and high energy neutrons are produced. This is the case of the 6 MeV Tandetron accelerator of Slovak Academy of Science (SAS) operated by Laboratory of Nuclear Physics in Piešťany. The Tandetron accelerator has all necessary capabilities to generate high energy neutrons based on D-D fusion reaction, and thus can be utilized in several applications such as neutron activation analyses, neutron radiography, detector calibrations and shielding analyses. Depending on the beam energy, the Tandetron accelerator is capable generate the quasi-monoenergetic neutrons with energies in the range between 3 – 6 MeV. The gas target system, developed at the Institute of Physics SAS, allows the use of the gaseous pure deuterium as a target material. For optimization of all activities connected to generation of the neutrons by the accelerators, R&D and safety, a computational simulation is the most effective way how the experiment can be designed, or the equipment and personnel can be protected. Crucial part of each simulation is to have the neutron source properly defined [2]. The distribution of emitted neutrons from the accelerator-based neutron sources is usually modelled as isotropic and for many

applications this simplification is acceptable. Nevertheless, the yield and energy of emitted neutrons is angle dependent and this dependency increases with the energy of deuterium beam. This anisotropy results partly from the design of internal components, but the main contribution is coming from the double differential cross section of the fusion reaction. Neutron source anisotropy is therefore device-specific and must be considered [3]. This requirement rises during evaluation of the dosimetry situation around this kind of neutron source and in applications where relatively large objects are investigated using fast neutron flux.

Neutron radiography employing fast neutrons is currently developed for in-situ defectoscopy, where gamma and X-ray sources cannot be used [4]. Fast neutrons can pass through materials and objects in industrial scale and can provide information about the internal structure. The defectoscopy is based on scattering of fast neutrons on light nuclei and the spatial and energy distribution of used neutron source is high of interest this application. Therefore, this paper is devoted to the development of accelerator-based neutron source anisotropy definition in SCALE6 system [5] and its validation.

2 Methods and technique

Definition of the neutron source anisotropy developed for SCALE6 system calculations is based theoretical values calculated by the DROSG-2000 program available at <http://www-nds.iaea.org>. DROSG-2000 is a freeware program available through the International Atomic Energy Agency that contains reaction data for 60 neutron producing accelerator reactions [6]. The code was used to calculate spatial dependent neutron yields and spectra for five energies (0.5 – 2.5 MeV) of the deuterium beam. Results of DROSG-2000 calculations are presented in Fig. 1.

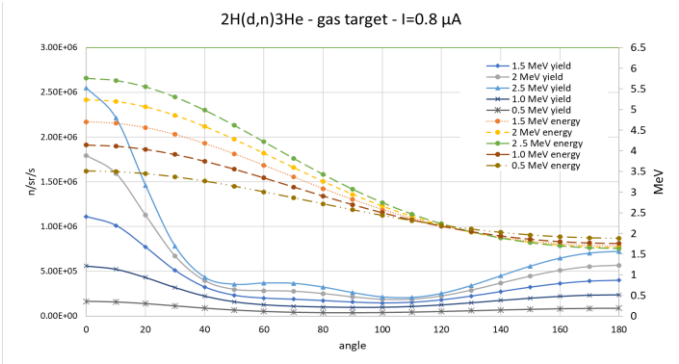


FIGURE 1. Theoretically calculated neutron anisotropy

As can be seen in Fig. 1, both neutron yield and neutron spectrum are spatially dependent. Unfortunately, the neutron source definition in SCALE6 system is not able to accommodate this kind of definition. Therefore, the custom definition was developed for each segment derived from the theoretical anisotropy to simulate neutron anisotropy correctly in the SCALE6 system.

The neutron source is defined as multiple point sources with angular and energetic distributions. There are 18 sources as there are 18 segments. Strength of each point source is defined as an average value of neutron yield and neutron energy at boundary angles for each segment calculated by DROSG-200 program. Neutron yields are set as the average values calculated by DROSG-200 program adjusted according to the steradian to represent the total count of neutrons in each segment. Each point source has an assigned energetic and angular distribution around the defined direction. Neutron energies set in energetic distributions are set as the average of boundary values taken calculated by DROSG-200 program. Angular distributions assigned to each source are used to define segments via the cosine function values.

Table 1: Definition of the neutron sources and detectors of the developed model for 2 MeV deuteron beam energy.

Segment number	Neutron yield (n/s)	Neutron energy (MeV)	Detector position (°)
1	1.62E+05	5.217775	5
2	3.86E+05	5.130445	15
3	4.16E+05	4.962130	25
4	3.34E+05	4.724745	35
5	2.68E+05	4.434345	45
6	2.61E+05	4.109255	55
7	2.78E+05	3.768105	65
8	2.79E+05	3.428000	75
9	2.53E+05	4.103190	85
10	2.18E+05	2.804315	95
11	1.98E+05	2.538265	105
12	2.05E+05	2.308595	115

13	2.30E+05	2.116245	125
14	2.54E+05	1.960395	135
15	2.56E+05	1.839265	145
16	2.21E+05	1.750765	155
17	1.51E+05	1.692970	165
18	5.34E+04	1.664445	175

A set example of neutron source strength definitions and neutron energy definitions are shown in Table 1, where the neutron source yields and energies are shown for each of the 18 segments for energy of 2 MeV of the deuterium beam. Detectors used in determining the validity of the developed neutron source are placed in the middle of each segment at positions described in Table 1 relative to the set direction.

Point detectors were placed in the middle of each segment with a defined response. Defining a custom response ensures that the detector responds to only one given neutron energy. Each response corresponds to a defined segment. To ensure that the detectors only respond to the energy of the segment, the custom response sets energy boundaries around the energy in the segment (see Table 1).

3 Results and discussion

For the purpose of verifying the correctness of the anisotropic source, the simulation was run in a vacuum without any interfering factors. Five simulations were run for five different deuteron beam energies (see Fig.1) to determine whether or not the proposed neutron source definition represents neutron source anisotropy of the Tandetron accelerator correctly. By setting the response of detectors around the energy of the segment they are placed in helps determine the yield of the neutron source for the given segment.

Spatial distribution map shown in Fig. 2 displays the anisotropy of the defined neutron source as the neutron flux is distributed around the source unevenly with a bias toward the set direction around which the anisotropy is modelled. The neutron flux distribution shown in Fig. 3 shows how the neutron flux weakens around the neutron source.

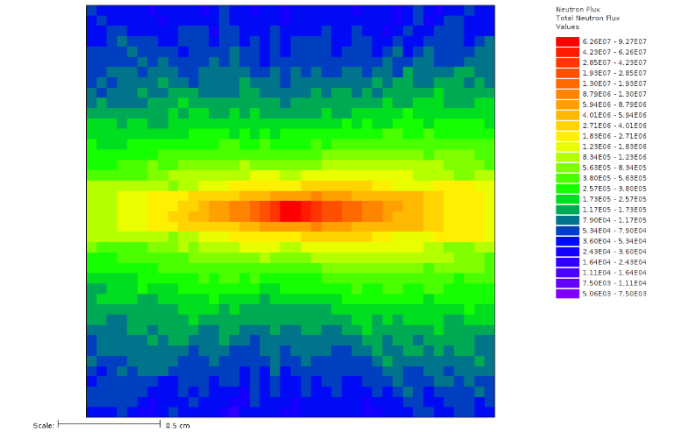


Figure 2. Top view of spatial distribution of the total neutron flux in the model midplane

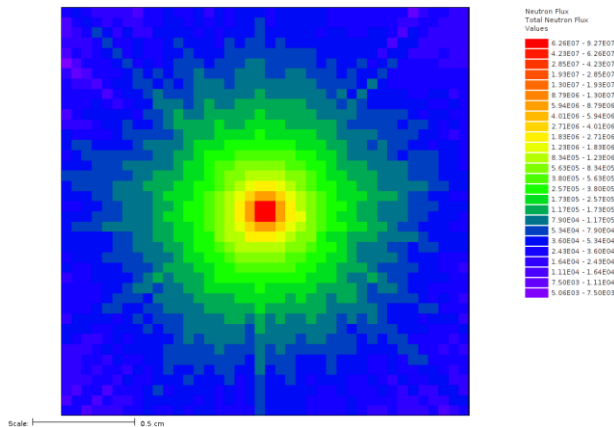


Figure 3. Front view of spatial distribution of the total neutron flux in the model midplane

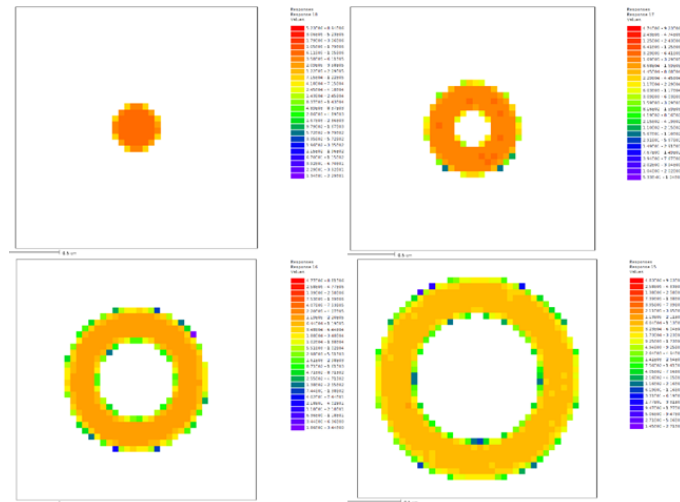


Figure 4. Spatial distribution of the segmented neutron flux in the model front plane, upper-left segment #1, upper-right segment #2, lower-left segment #3, lower-right segment #4

Fig. 4 shows how the neutron flux is distributed in each segment. There are certain spots, which contain a decreased neutron flux. This is caused by how the SCALE6 system simulates the angular distributions. This results in certain regions on the boundary between segments to be either overlapping with the next segment, or for the segments to have a gap between them. Overlapping segments cause an increase in the detected neutron flux, whereas a gap causes a decrease. This is the main reason for the placement of detectors to be in the middle of each segment to minimize errors and uncertainties caused by this phenomenon. This can be prevented by designing a source that would incorporate the whole integral function of the neutron anisotropy calculated by DROSG-200 program.

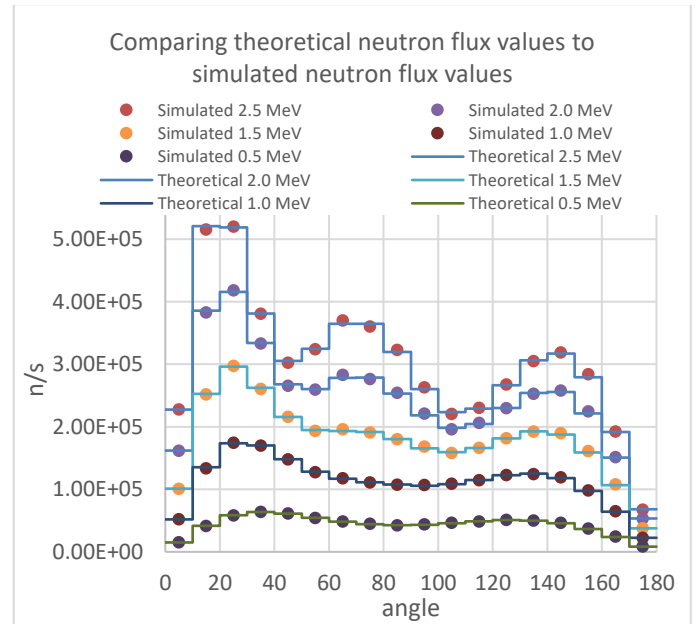


FIGURE 5. Comparison between theoretical neutron flux values and simulated neutron flux values

Displayed values in Fig. 5 are the total neutron flux values for each segment. Simulated values are shown as points to make it easier to discern between theoretical and simulated results. The simulated neutron flux values displayed as points show the neutron flux for the whole segment. Detectors used in the process of measuring neutron yields were point detectors and the resulting responses were adjusted to total neutron fluxes for each segment. Simulated values of the neutron yields for each segment are displayed without error bars, as they are too small. However, all displayed simulated neutron yields are within the relative uncertainties caused by the statistical nature of the simulated neutron flux value.

Comparing the theoretical values calculated by DROSG-200 program of the neutron anisotropy with the simulated results from the SCALE6 system, it can be determined that the defined neutron source simulates the anisotropic neutron flux of the Tandetron with relatively good accuracy. Certain inaccuracies can be expected, as not the whole integral function of the neutron anisotropy was simulated and reference points used were limited. To achieve better accuracy, an increased amount of reference points is necessary or the development of a new design of the neutron source that would incorporate the integral slope between reference points.

4 Conclusion

The developed neutron source can simulate the anisotropic neutron flux around the Tandetron with relative accuracy as has been shown in Fig. 5. This allows for its use in simulations regarding many activities that take place at the Tandetron, such as simulations regarding the safety of personnel, optimization of activities connected to the Tandetron, detector calibrations, different R&D activities, neutron activation analyses, neutron radiography and non-destructive neutron defectoscopy. The developed neutron source can also be used to help design experiments that are to take place at the Tandetron by using the

developed neutron source in a computational simulation. Such simulations will be used to design an experiment for fast neutron defectoscopy, which is currently in development. To achieve higher accuracy of the neutron source, more reference points are needed.

Acknowledgments

This study has been financially supported by FEI STU through the project NERAKO.

Literatúra

- [1] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Byrne P, Coyne M, Nie LH, Improved MCNP Simulation Considering Neutron Angular Distribution and its Experimental Verification. *Int J At Nucl Phys* 5:021, (2020)
- [3] M. Sharma, J. Nattress a I. Jovanovic, „Impact of neutron flux anisotropy from DT generator on radiation shielding effectiveness,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, pp. 37 - 44, 2018.
- [4] B. Vrban, S. Čerba, J. Lúley, V. Filová a V. Nečas, *Printed circuit heat exchangers and fast neutron radiography*.
- [5] W. A. Wieselquist, et al., "SCALE Code System," ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2020.
- [6] M Drosog (2016) DROSG-2000: Codes and database for 60 neutron source reactions. International Atomic Energy Agency, IAEA-NDS-87 Rev. 10.

Deterministické vyhodnotenie digitálnych snímok pasívnych detektorov žiarenia

Matúš Kornhauser¹ Ing. Štefan Čerba, PhD.¹ Ing. Vendula Filová¹

¹Ústav Jadrového a fyzikálneho inžinierstva

xkornhauser@stuba.sk

Abstrakt – Pri spracovaní a analýze snímok v bežnom živote sa často stretávame s identifikáciou a opisom tvarov, farieb alebo pozícií objektov, ktoré sa na nich vyskytujú. Niekedy stačí malý detail a obraz nadobudne rozdielnu štruktúru. Príkladom je jadrová energetika, kde pri detekcii ionizujúceho žiarenia sú použité detektory pre tvorbu takýchto snímok. To isté bolo obsahom nášho výskumu. TASLImage vytvára snímky z detektora CR-39, na ktorých následne analyzuje tvary a získava z nich parametre. V tejto práci si opíšeme návrh programu, ktorý bude slúžiť rovnako ako TASLImage na vyhodnocovanie digitálnych snímok. V ďalšej časti práce sa dozvieme prečo je užitočné takýto program vytvoriť.

1 Úvod

Na ústave Jadrového a fyzikálneho inžinierstva sa na analýzu detektorov stôp v pevnej fáze využíva prístroj TASLImage, ktorý z povrchu detektorov typu CR-39 vytvára digitálne snímky a vyhodnocuje ich na základe charakteristických parametrov.

Alfa častice a neutróny po interakcii s materiálom detektora vytvárajú rôzne stopy, najčastejšie tvar elipsy alebo kruhu. TASLImage dokáže tieto tvary analyzovať a identifikovať parametre, ako sú napr. súradnice stredov, hlavnú a vedľajšiu os, odtieň sivej, plochu tvaru atď. Na základe veľkosti identifikovaných parametrov môže byť stopa zamietnutá, čo znamená, že tvar alebo objekt, ktorý TASLImage našiel nie je vytvorený žiadnou časticou a bude to s veľkou pravdepodobnosťou len nečistota, ale sú aj stopy nezamietnuté, ktoré sú považované za tvary spôsobené časticami. Tieto zamietnuté a nezamietnuté stopy, TASLImage vyhodnocuje podľa parametrov týchto tvarov. Keďže TASLImage je komerčným nástrojom, jeho zdrojový kód je uzavretý, čiže presný algoritmus implementácie nie je jasný a nie je možné vykonať ani úpravy v zdrojovom kóde.

Našou náplňou práce je vytvoriť program, ktorým sa dokážeme priblížiť k analyzovaniu snímok ako to robí TASLImage. Program by sa dal modifikovať, pridávať nové funkcie a tým by sa zlepšilo vyhodnotenie snímok.

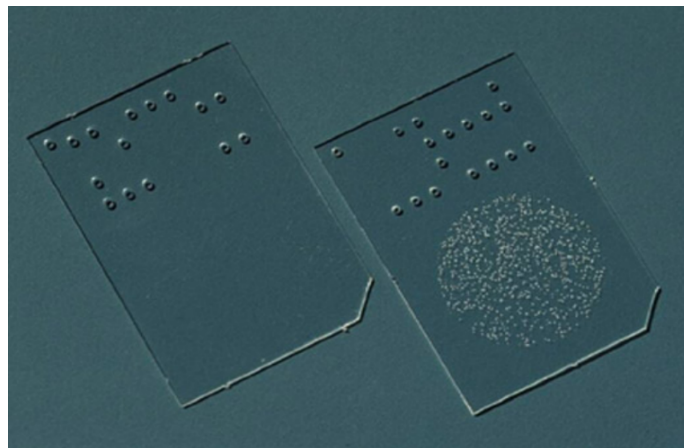
2 Opis riešenia úlohy

V tejto časti si opíšeme detektor CR-39, ktorý sme používali pri našej práci s digitálnymi snímkami a postup práce.

2.1 Detektor CR-39

Ide o vysoko kvalitný plast s veľmi dobrou priepustnosťou svetla. Pri detekcii žiarenia sa CR-39 používa ako detektor stôp v pevnej fáze (SSNTD) na detekciu prítomnosti ionizujúceho žiarenia.

Energetické častice narážajúce na polymérnu štruktúru zanechávajú v detektore stopy prerušených chemických väzieb. Pri ponorení do koncentrovaného alkalického roztoku (zvyčajne hydroxidu sodného) napadnú ióny roztoku a rozbijú štruktúru polyméru, čím odleptajú väčšinu plastu čo napomáha k zviditeľneniu štruktúry, keďže miesta, kde sa nachádzajú stopy sú leptané rýchlejšie ako miesta, ktoré sú neporušené. [2]



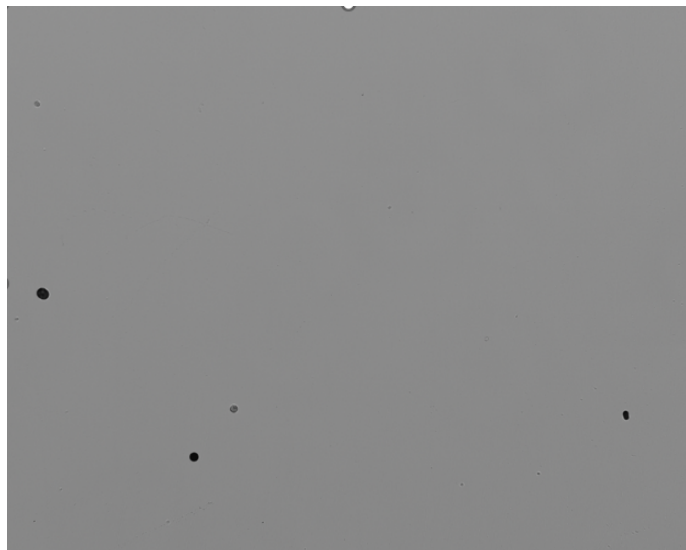
Obr. 1: Detektor CR-39 [1]

2.2 Návrh riešenia a postup práce

Hlavnou časťou práce bolo vytvoriť program, ktorý dokáže vyhodnocovať digitálne snímky podobným spôsobom ako je to v prípade systému TASLImage. Preto bolo potrebné použiť nástroje na detekciu tvarov z daných snímok ďalej na detekciu parametrov ako sú hlavná a vedľajšia os, osi x a y, uhol hĺbky atď. Aby sme mohli dosiahnuť tieto ciele, využili sme

programovací jazyk Python a jednu z jeho knižníc, ktorá má názov OpenCV.

Program, ktorý vyvíjame analyzuje sadu snímok detektora CR-39. Program postupne spracováva sadu snímok, ktoré sú zoradené podľa dátumu úpravy. Sada pozostáva z 80 snímok detektora CR-39. Na obr. 2. môžeme vidieť ukážku snímky.



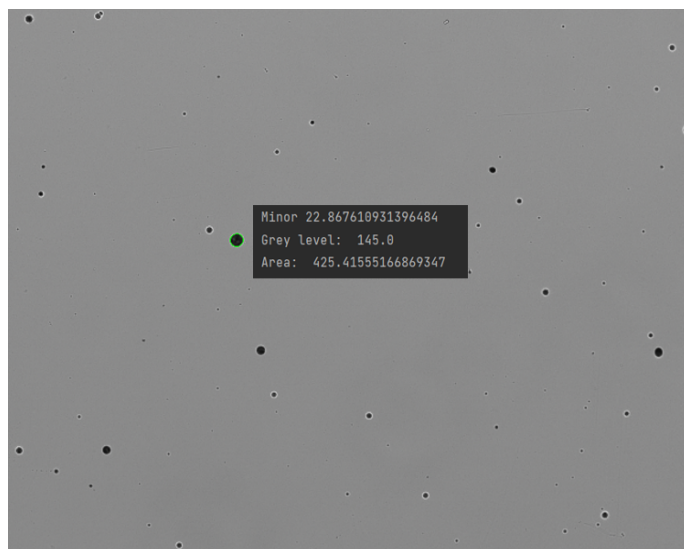
Obr. 2: Snímka stôp po neutrónovom žiarení

Po načítaní sa na každú snímku aplikuje filter masky, ktorá nám umožní nájsť všetky tvary, keďže tvary ktoré hľadáme sú čierne, vieme konvertovať pozadie obrázku na čiernu a tvary na biele, ako môžeme vidieť na obr. 3.



Obr. 3: Maska snímky

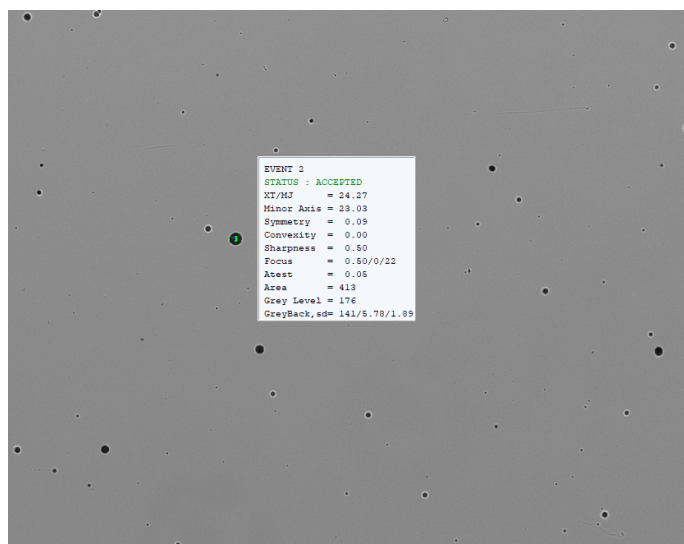
Po vytvorení masky sa použije funkcia cv2.findContours, ktorá nám nájde a uloží všetky tvary na obrázku, aby sa sme s nimi mohli ďalej pracovať. Po nájdení tvarov aplikujeme funkciu cv2.fitEllipse, ktorá nám na tvar prispôsobí elipsu a nájde parametre týchto tvarov ako sú osi stredov, hlavnú a vedľajšiu os a uhol hlavnej osi. Na základe týchto parametrov ktoré nám funkcia cv2.fitEllipse našla, vieme ďalej dopočítat parameter plochy a stupeň šedej.



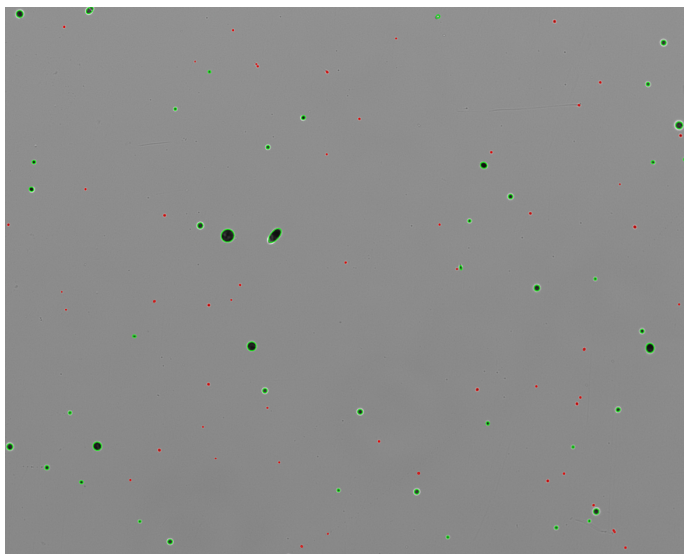
Obr. 4: Meranie tvaru pomocou programu

Na obr. 4 je nájdenie tvaru naším programom a na obr. 5 je nájdenie tvaru za pomoci TASLImage. Môžeme vidieť, že program ktorý implementujeme, vie zatiaľ nájsť vedľajšiu os, odtieň sivej a plochu. Oproti TASLImage, ktorý vie nájsť podstatne viac parametrov a vlastností tohto tvaru. Rovnako môžeme vidieť, že hodnoty nájdené programom, ktorý vyvíjame nie sú totožné s tými od TASLImage.

Táto chyba je spôsobená tým, že je chybné označená elipsa. Vieme o tejto chybe a je naším cieľom navrhnuť program tak, aby sme sa priblížili k hodnotám čo najbližšie k TASLImage alebo až na rovnaké hodnoty.



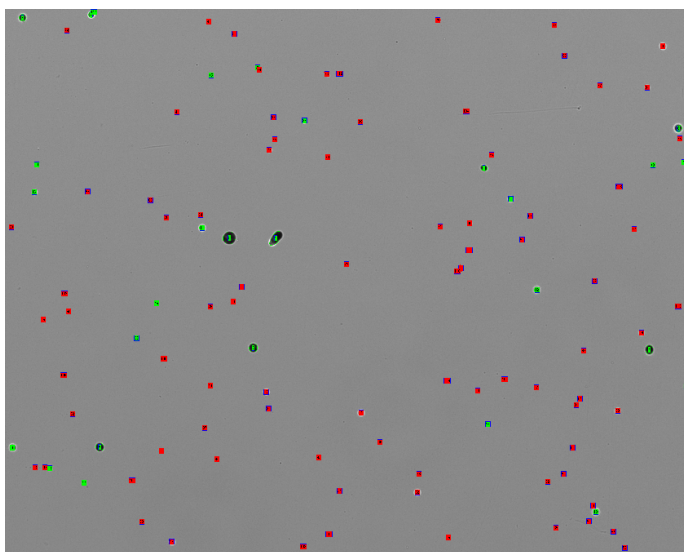
Obr. 5: Meranie tvaru pomocou prístroja TASLImage



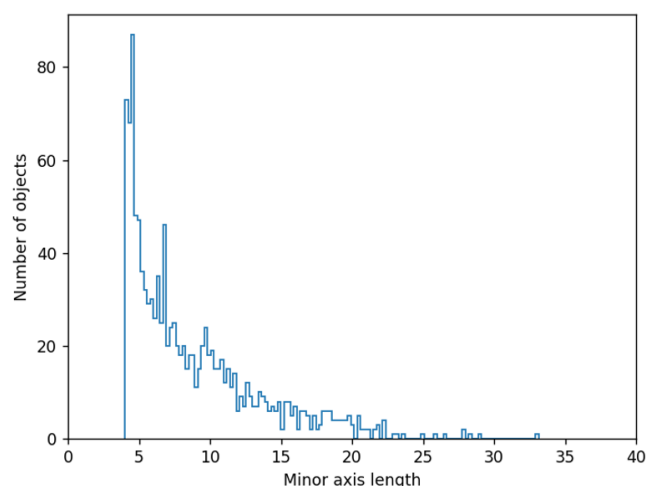
Obr. 6: Nájdenie stôp pomocou programu

Môžeme si pozrieť ukážky na ktorých vidíme výstup z nášho programu obr. 6. a z TASLImage obr. 7. Červené stopy hovoria o tom, ktoré stopy sú zamietnuté, nesplňajú požiadavky ako napr. veľkosť stopy ak je menšia alebo väčšia ako je predpísaný rozsah, zaoblenie stopy atď. Zelené stopy sú podľa programu a TASLImage korektnými stopami po neutrónovom žiarení. Môžeme vidieť, že TASLImage, dokázal nájsť a zamietnuť viac stôp. Domnievame sa, že prístroj má implementovaných viacero zamietacích kritérií, ktorými dokáže vylúčiť nájdené stopy.

V súčasnosti sa na hodnotenie snímok používa jediné kritérium, a to veľkosť vedľajšej osi. Pri neutrónoch je tento rozsah od 4 – 40 mikrometrov a pri alpha časticiach to je od 3 – 30 mikrometrov.



Obr. 7: Nájdenie stôp pomocou TASLImage



Obr. 8: Histogram počtu stôp a vedľajšej osi

Jedným z ďalších výstupov, ktorý nám program dáva je aj histogram na obr. 8. V histograme sú zaznamenané počet stôp na sade snímok a dĺžka vedľajšej osi.

3 Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť program, ktorý by sa priblížil k spracovaniu snímok na takej úrovni ako TASLImage. Na snímkach sa zobrazovali bežné tvary, ale aj rôzne nesymetrické tvary.

Po preštudovaní niektorých funkcií sme si zvolili najvhodnejšie a s použitím jazyka Python otestovali na sade snímok z neutrónového žiarenia. Program na snímkach vyhľadáva tvary a ich parametre. Následne tieto parametre ďalej používame pri výpočtoch. Vzhľadom na to, že častice nie vždy dopadajú na povrch detektora kolmo, často je potrebné určiť priemet stopy do X resp. Y osi. Táto funkcionality vyžaduje lepšie pochopenie mechanizmu tvorby stôp, preto do programu ešte nebola implementovaná, čo má za následok nepresné hodnoty, ako sme mohli vidieť aj v kapitole 2.2.

Ďalším postup v práci bude odstránenie tejto chyby, ktorá by mohla napomôcť k lepšiemu vyhodnoteniu snímok a priblížilo by sa to k vyhodnocovaniu pri TASLImage. Po vyhodnotení snímok sa následne vygeneruje excel súbor v ktorom sú uložené všetky informácie o elipsách, ktoré sme našli a histogram kde je zaznamenaný počet nájdených tvarov k pomeru vedľajšej osi.

Literatúra

- [1] Instrument Plastics Limited UK Dosimeter Grade PADC (CR39) <https://www.instrumentplastics.co.uk/products/cr39-dosimeter-grade-padc>
- [2] CR-39 Plastic Nuclear Track Detector, <https://physics.okstate.edu/news/93-pages/544-benton->

Študentská vedecká a odborná činnosť

Fakultná prehliadka prác, 26. apríl 2023

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Sekcia 5. Jadrové a fyzikálne inžinierstvo I

rpl-cr-39-plastic-nuclear-track-detector, College of Arts and
Sciences, Department of Physics,

Computational analysis of VR1 reactor

Juraj Valluš¹, Jakub Lüley¹

¹ Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Institute of Nuclear and Physical Engineering, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovakia

xvallus@stuba.sk

Abstract – The use of different neutron cross-section libraries may yield different results in calculations of multiplication coefficient of the same reactor core configuration. This article will look at the differences of using built-in ENDF/B7.1 and a new JEFF3.3 libraries for calculations of multiplication coefficient of VR-1 reactor using KENO6 code and implementing it for determination of its absorption rod worths.

1 Introduction

JEFF3.3 is a new neutron cross-section library released in 2017, optimized for calculations of fast and fusion reactors. Its new implementation for use with KENO6 code in SCALE allows its simple comparison with older built-in ENDF/B7.1 library optimized for calculations of thermal reactors.

In this case, the comparison will be done by calculating absorption rod worths of VR-1 (thermal) reactor using the rod drop method.

2 Method description

2.1 Cross section libraries [1]

There are many applications of prepared evaluated nuclear data, also known as neutron cross-section libraries in nuclear reactor calculations. Throughout history, different laboratories created many neutron cross section libraries depending on their own needs for materials, energy ranges, types of cross sections and applications, each with their own methods of storage and retrieval of the data. As a result, these cross-section libraries were mostly incompatible and could not be modified, which resulted in an inability for reactor designers to utilize new available cross-section data. Moreover, different libraries gave different results for calculations of the same reactor configurations, but different internal formats of these libraries made it difficult to understand why these differences occurred.

A solution for this problem would be the creation of a standard format for evaluated nuclear data which would allow for translation of existing libraries and incorporation of future data, and which would be a link between data libraries and processing codes. This gave rise to the Evaluated Nuclear Data File (ENDF) project, responsible for collection and distribution of data.

2.1.1 ENDF [1]

There are two versions of the ENDF.

ENDF/A is a storage system for partial evaluations and their formation into a fully evaluated sets of nuclear data in standard format for a given material. The main feature of this system is its flexibility to accept nuclear data in various arrangements and representations.

ENDF/B is a format of fully evaluated nuclear data files ready to be used in reactor design calculations. Main features of the ENDF/B are simplicity to allow usage of the data by processing programs, and rigorous interpolation schemes between tabulated points to allow for repeatable results. Codes used in processing are written in FORTRAN to allow for computer interchangeability.

Each material is defined as a single isotope or a collection of isotopes, with data divided into seven files, which are subdivided into sections containing data for specific reaction.

- File 1: general information
- File 2: resolved and unresolved resonance parameters
- File 3: smooth cross-sections
- File 4: secondary angular distributions
- File 5: secondary energy distributions
- File 6: secondary energy-angle distributions
- File 7: thermal neutron scattering law

In this article, we will focus on the SCALE built-in ENDF/B7.1 library released in 2011. [2]

2.1.2 JEFF – Joint Evaluated Fission and Fusion nuclear data library [3] [4]

JEFF3.3 is a general-purpose library released in 2017, with main focus on neutron transport calculations used for performance and safety assessment of nuclear reactors and criticality safety analyses.

JEFF3.3 library is targeted towards reactor development programs ASTRID, MYRRHA, ITER and DEMO. Previous releases of JEFF cross-section library are also known for their performance in PWR and BWR reactor calculations. The library contains reaction data files for incident neutrons, protons, deuterons, tritons, helions, alpha particles, photons, decay data file, fission data file, thermal neutron scattering file, activation file and displacements per atom file. While this library is built on its previous versions, it also contains new evaluations for major actinides and some other isotopes, new evaluation of

fission yields, prompt neutron spectra and average number of neutrons per fission.

In benchmark testing JEFF3.3 library proved to be better than its previous versions (JEFF3.2, JEFF3.1.1 and JEFF3.1.2), and yielded results comparable to ENDF/B7.1 library. [5]

2.2 Method for determining reactivity worth of an absorption rod with SCALE calculations

For determining reactivity worth of absorption rods in VR-1 reactor by KENO6 code [9], a Rod drop method [6] was chosen, as one of the most common experimental methods used to evaluate the worth of control and safety rods in all reactor types. The Rod drop method approach can be easily implemented within the calculations.

Reactivity of a reactor is defined as:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (1)$$

Fundamentals of the Rod drop method is the evaluation of the reactor in two states, the first state is typically a critical reactor and the second is a reactor after the control rod insertion, the multiplication coefficient and reactivity of the reactor decreases. Difference in reactivity before and after control rod insertion is therefore the reactivity worth of the control rod, which can be calculated as:

$$\rho_0 = \frac{k_{eff1} - k_{eff2}}{k_{eff1} \cdot k_{eff2}} \quad (2)$$

where ρ_0 is the reactivity worth of the control rod and k_{eff1} and k_{eff2} is multiplication coefficient of the reactor before and after the rod drop. Using propagation of uncertainty, the uncertainty of the reactivity worth of the control rod is calculated as:

$$\sigma_{\rho_0} = \sqrt{\frac{\sigma_{k_{eff1}}^2}{k_{eff1}^4} + \frac{\sigma_{k_{eff2}}^2}{k_{eff2}^4}} \quad (3)$$

Implementing this method with SCALE means calculating the k_{eff} for the reference model, which needs to be as close to criticality as possible, and for models where a particular rod is fully inserted.

2.2.1 Disadvantages

Theoretical calculations assume reference model (reactor before the rod drop) to have $k_{eff} = 1$, which is impossible to achieve in real calculations with two different neutron cross section libraries, without changing the reference model. Therefore, in our calculations the reference model of the reactor core will be either slightly supercritical or subcritical depending on the library used.

The criticality of reference model is achieved by partially inserting one of the control rods (b1 control rod, in this case) which makes it impossible to measure the reactivity worth of this particular rod without changing the configuration of the reactor core. To measure the reactivity worth of b1 control rod, criticality of the reactor would need to be achieved by partial insertion of another control rod. However, this is unfavorable, as the reactivity worth of control rods is slightly dependent on the configuration of the reactor core.

2.3 Description of VR-1 training reactor model

VR-1 is a zero power, lightwater, pool type reactor with operating temperature of 20°C. Light water surrounding the core acts as coolant, moderator, neutron reflector and biological shielding. The reactor uses IRT-4M fuel with 19,7 % ^{235}U enrichment and UR-70 control rods. [7]

2.3.1 IRT-4M fuel assemblies

IRT-4M fuel assembly is composed of either 4, 6 or 8 tubular fuel elements (figure 1). Each element has 0,7 mm thick plate of fuel mixture made of $\text{UO}_2\text{-Al}$, sandwiched between aluminum cladding with a thickness of 0,47 mm. The space between rectangular fuel elements is 1,81 mm wide and is filled with free-flowing light water. The central channel in 6 - tube fuel assembly has an inner diameter of 12 mm and the wall thickness of 1 mm.

Each fuel assembly has a horizontal cross-section of 69,64 × 69,64 mm (outer dimensions of the largest fuel element) and is 882 mm high. The section containing fuel mixture is 588,05 mm high.

The fuel mixture in the fuel elements has an average ^{235}U enrichment of 19,7 % and density of 5,53 g/cm³. The enrichment in individual fuel elements varies by up to 0,128 %, where the fourth fuel element from the outside contains fuel mixture with the highest enrichment.

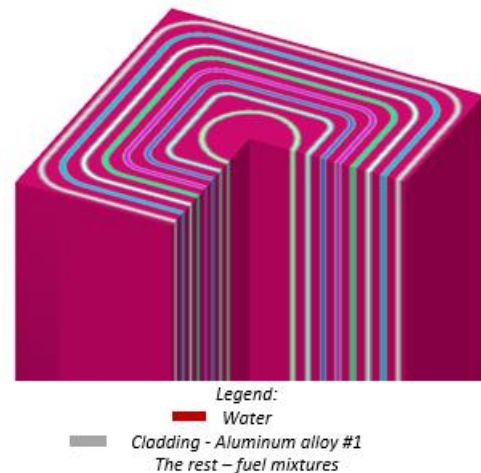


Figure 1. Model of an 8 - tube fuel assembly.

2.3.2 UR-70 absorption rods

All absorption rods in the VR-1 reactor are the same and their reactivity worth is determined only by their position. The UR-70 absorption rods (figure 2) are contained inside an aluminum tube with an inner diameter of 26 mm located in the center of 6 – tube fuel assembly. They have a diameter of 24,5 mm and are 1275,02 mm long. The rod itself consists of steel cladding under which is the cadmium absorption layer. The center of the rod is filled with aluminum alloy and the bottom end of the rod is capped with steel head.

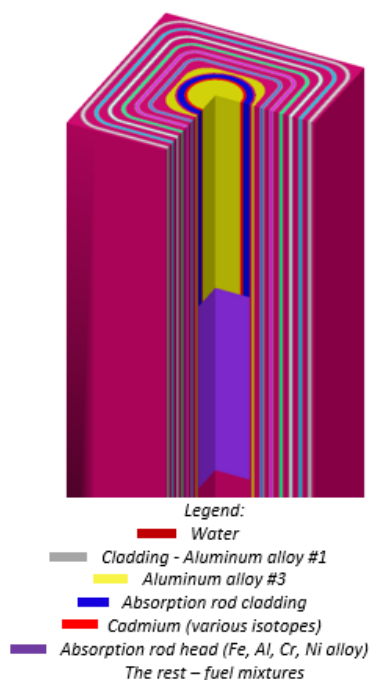


Figure 1. Model of a 6 – tube fuel assembly with UR-70 absorption rod.

2.3.3 Core configuration

The reactor core is assembled on a core support plate with a geometry of 8×8 cells in a square lattice. Depending on the core configuration, 16 to 24 fuel assemblies are used along with 5 to 7 absorption rods. [8]

In the configuration used for our calculations (figure 3), there are all 7 absorption rods. Rods b1, b2 and b3 serve as safety rods, e1 and e2 serve as experimental rods, and r1 and r2 serve as control rods.



Figure 3. Horizontal cross section of the VR-1 reactor core.

3 Results

For calculating the multiplication coefficient, 40 000 neutrons per generation and 1 000 generations were used, with 40 generations skipped. One calculation took approximately 15 days to complete.

Figure 4 is comparing multiplication coefficients of reference models (ref) and models with a particular rod dropped (b2, b3, e1, e2, r1, r2), calculated using the two libraries. Multiplication coefficient is in all cases higher by about 0,0013 on average, when ENDF/B7.1 library is used.

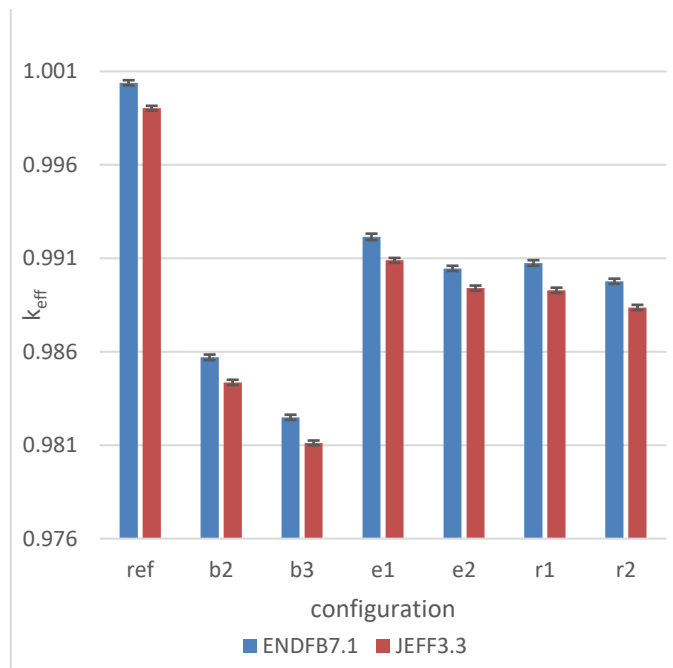


Figure 4. Comparison of the multiplication coefficient using two different libraries.

Table 1 shows rod worths calculated using the two libraries and their difference. Rod worths calculated using JEFF3.3 library are larger by 8 % to 13 %, which is significant considering that uncertainty of the calculations is less than about 2 %.

Table 1: Comparison of the control rod worths using two different cross-section libraries.

Absorption rod	ENDF/B-VII.1 ρ (pcm)	JEFF3.3 ρ (pcm)	$\Delta \rho$ (pcm)
b2	1489,73 ± 20,83	1627,83 ± 20,11	138.10 ± 40.94
b3	1821,19 ± 20,15	1963,32 ± 19,44	142.12 ± 39.59
e1	830,20 ± 22,23	958,36 ± 19,26	128.16 ± 41.47

e2	1002,17 ± 19,98	1110,34 ± 20,01	108.17 ± 39.99
r1	972,62 ± 20,72	1121,58 ± 20,01	148.96 ± 40.73
r2	1072,56 ± 20,00	1215,67 ± 20,03	143.11 ± 40.03

4 Conclusion

JEFF3.3 is a new neutron cross-section library optimized for calculations of fast and fusion reactors, while older built-in ENDF/B7.1 library is optimized for thermal reactors. The new implementation of JEFF3.3 library data into SCALE allows comparison of these two libraries for calculations of VR-1 (thermal) reactor.

Differences between results acquired by using a SCALE built-in ENDF/B7.1 and newer JEFF3.3 neutron cross section libraries are significant compared to calculation uncertainties.

Multiplication coefficients of reference models and models with one rod fully inserted, calculated using the ENDF/B7.1 library are in all cases higher by about 0,0013 on average, which is roughly ten times more than uncertainty of the calculations.

Rod worths calculated by rod drop method using ENDF/B7.1 library are lower by 8 % to 13 %, while uncertainty of the calculations is less than about 2 %.

Acknowledgement

This study has partially been financially supported by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education of Slovak Republic No. VEGA 1/0615/21.

Literature

- [1] National Nuclear Data Center. (2017). History of the Evaluated Nuclear Data File (ENDF). [online] Available at: <https://www.nndc.bnl.gov/endl/history.html> [Accessed 7 Mar. 2023].
- [2] Wikipedia contributors. (2023, February 28). Nuclear data. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 12:00, March 7, 2023, from https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_data
- [3] Plompen, A.J.M., Cabellos, O., De Saint Jean, C. et al. The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF-3.3. Eur. Phys. J. A 56, 181 (2020). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00141-9>
- [4] OECD Nuclear Energy Agency. (2022). JEFF: Joint Evaluated Fission and Fusion File. Retrieved March 7,

2023, from <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/jeff33/index.html>

- [5] Plompen, A. (2016). The Joint Evaluated Fission and Fusion nuclear data library - JEFF [PDF document]. Madrid, Spain. Retrieved March 7, 2023, from <https://agenda.ciemat.es/event/3201/contributions/3198/attachments/2579/4023/Plompen.pdf>
- [6] CONNER, Leslie Roger, Shutdown reactivity worth of reactor control rods by a subcritical multiplication method (1967). Masters Theses. 5158. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5158
- [7] Svetozár MICHÁLEK, Ján HAŠČÍK, Gabriel FARKAS. "MCNP5 delayed neutron fraction (β_{eff}) calculation in training reactor VR-1." Journal of Electrical Engineering, vol. 59, no. 4, 2008, pp. 221-224. Available at: http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/4_108-08.pdf.
- [8] VR-1 Training Reactor. (n.d.). [online] reaktor-vr1.cz. Available at: <http://www.reaktor-vr1.cz/en/about-us/vr-1> [Accessed 14 Mar. 2023].
- [9] W. A. Wieselquist, et al., "SCALE Code System," ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2020.

Sekcia 6

Jadrové a fyzikálne inžinierstvo II, Elektrotechnika

Vplyv umiestnenia výhrevného telesa na koeficient prestupu tepla

Karolína Kovalčíková

Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

xkovalcikova@stuba.sk

Abstrakt – Príspevok je zameraný na zistenie vplyvu umiestnenia výhrevného telesa vnútri dušej trubice na koeficient prestupu tepla a experimentálne určenie jeho hodnoty pre rôzne úseky pomocou prispôsobovania teoretického modelu k nameraným údajom.

$$\alpha_r = \varepsilon \sigma_{SB} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) = 5,83 \text{ W/m}^2\text{K}$$

kde σ_{SB} je Stefanova-Boltzmannova konštanta a ε je emisivita povrchu. Koeficient prestupu tepla radiáciou je väčší pri vyšších teplotách a veľkých teplotných rozdieloch. Číselný výsledok je vypočítaný pre $T_1 = T_2 = 297,15 \text{ K}$ a $\varepsilon = 0,98$.

1 Úvod

Koeficient (súčiniteľ) prestupu tepla α udáva množstvo tepla, ktoré prestúpi zo steny tuhej látky do prúdiacej tekutiny jednotkou plochy pri jednotkovom rozdieli teplôt medzi touto stenou a tekutinou. Predstavuje konštantu úmernosti medzi hustotou toku tepla a rozdielom teplôt látok na rozhraní, no nie je konštantou materiálovou. Rovnicu:

$$\alpha = \frac{j_q}{(\vartheta - \vartheta_\infty)}$$

nazývame Newtonov ochladzovací zákon, kde j_q je hustota toku tepla, ϑ je teplota povrchu a ϑ_∞ je teplota okolitej tekutiny. Pri prestupe tepla do objektu ($\vartheta_\infty > \vartheta$) je rozdiel teplôt záporný a naopak, pri prestupe tepla z objektu ($\vartheta_\infty < \vartheta$) je rozdiel teplôt kladný. Jednotkou koeficientu prestupu tepla je watt na meter štvorcový na kelvin.

$$[\alpha] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Koeficient prestupu tepla pri teplotných rozdieloch telesa a prostredia rádovo 10^1 pozostáva z dvoch príspevkov, a to koeficient prestupu tepla radiáciou a koeficient prestupu tepla konvekciou.

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_r$$

2 Koeficient prestupu tepla radiáciou

Radiácia (žiarenie) je prenos energie prostredníctvom elektromagnetického vlnenia. Nevyžaduje materiálne prostredie. Z hľadiska prenosu tepla nás bude zaujímať len časť elektromagnetického žiarenia, ktorá sa šíri ako dôsledok rozdielu teplôt tzv. tepelné žiarenie.

Radiačný odvod tepla medzi tuhou látkou a tekutinou charakterizujeme vzťahom:

3 Koeficient prestupu tepla konvekciou

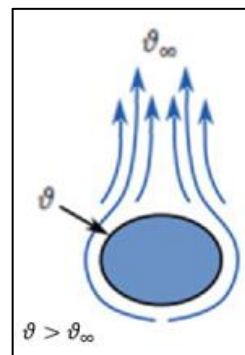
Konvekcia (prúdenie) tepla je dej, pri ktorom dochádza k prenosu tepla v dôsledku pohybu látky. Častice tekutiny, ktoré prijali teplo od telesa stúpajú proti smeru gravitačnej sily, kde sa miešajú s časticami studenšími a odovzdávajú im časť vnútornej energie. Nevyhnutnou podmienkou pre to, aby sa tento fyzikálny dej uskutočnil je prítomnosť tekutiny, existencia hmotného prostredia a teplotného spádu.

Konvektívny odvod tepla medzi tuhou látkou a tekutinou charakterizujeme vzťahom:

$$\alpha_k = - \frac{\lambda \vec{n} \cdot \nabla \vartheta(\vec{r})}{\vartheta(\vec{r}) - \vartheta_\infty}$$

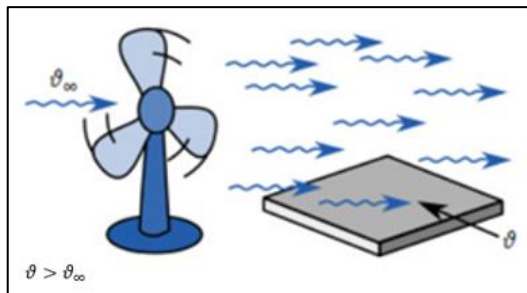
Rozlišujeme dva typy konvekcie: prirodzená konvekcia a nútená konvekcia.

Prirodzená konvekcia je produkovaná rozdielmi hustoty v tekutine spôsobenými teplotnými rozdielmi v tekutine.



Obr. 1. Zjednodušené zobrazenie prirodzenej konvekcie podľa [7], upravené.

Pri nútenej konvekcii je tekutina uvedená do pohybu prostredníctvom kompresora, čerpadla alebo ventilátora.



Obr. 2. Zjednodušené zobrazenie vynútenej konvekcie podľa [7], upravené.

Podľa nasledujúcich tabuliek si vieme vytvoriť predstavu o správaní sa koeficientu prestupu tepla vzhľadom na rýchlosť prúdenia tekutiny.

Tab. 1. Približné hodnoty koeficientov prestupu tepla - prirodzené prúdenie [1]

Situácia	$\frac{W}{m^2K}$
Vertikálna doska s dĺžkou 0,3 m vo vzduchu	4,5
Vodorovný valec s priemerom 5 cm vo vzduchu	6,5
Vodorovný valec priemerom 2 cm vo vode	890

Tab. 2. Približné hodnoty koeficientov prestupu tepla - nútené prúdenie [1]

Situácia	$\frac{W}{m^2K}$
Vzduch prúdiaci rýchlosťou 2 m/s vo výške 0,2 m nad štvorcovou doskou	12
Vzduch prúdiaci rýchlosťou 35 m/s vo výške 0,75 m nad štvorcovou doskou	75
Vzduch prúdiaci rýchlosťou 50 m/s cez rúru s priemerom 5 cm	180
Voda tečúca cez rúru s priemerom 2,5 cm (prietok 0,5 l/s)	3500

Hodnota koeficientu závisí od veľkého počtu činiteľov. Všeobecne je funkciou fyzikálnych vlastností tekutiny v hraničnej vrstve pri povrchu telesa (viskozita, tepelná vodivosť, rýchlosť prúdenia, hustota tekutiny, merná tepelná kapacita tekutiny, atď.), charakteru konvekcie a jej rýchlosti, jej geometrických parametrov (dĺžka a zakrivenie obtekaného povrchu) a. i.. Hraničná vrstva predstavuje typicky úzku oblasť tekutiny, kde sa jej lokálna rýchlosť a teplota výrazne mení v závislosti od vzdialenosti od povrchu telesa. [3] Všeobecný vzťah uvedených závislostí vyjadruje sústava rovníc: Fourierova-Kirchhoffova rovnica, Navierova-Stokesova rovnica a rovnica kontinuity. V praxi sa pri výpočtoch koeficientu prestupu tepla používajú kritériálne

vzťahy alebo rovnice. Pomocou rozmerovej analýzy možno počet premenných znížiť a pracovať s bezrozmernými parametrami: Nusseltovo číslo Nu , Prandtlovo číslo Pr a Grashofovo číslo Gr .

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (1)$$

$$Re = \frac{v_{av} D}{\nu}$$

$$Pr = \frac{c_p \rho \nu}{\lambda}$$

$$Gr = \frac{\beta g \Delta \vartheta_0 l^3}{\nu^2}$$

kde v_{av} je priemerná rýchlosť prúdenia tekutiny, D je priemer trubice, λ je koeficient tepelnej vodivosti tekutiny, z ktorého je trubica zhotovená, ρ je hustota tekutiny, c_p je merná tepelná kapacita tekutiny, ν je kinematická viskozita tekutiny, β je koeficient objemovej tepelnej rozťažnosti tekutiny, g je gravitačné zrýchlenie, l je dĺžka trubice a $\Delta \vartheta_0$ je oteplenie obtekannej steny voči referenčnej teplote. Zavedený je aj parameter zvaný geometrický pomer:

$$\xi = \frac{D}{l}$$

Nusseltovo číslo možno vyjadriť pomocou ostatných zavedených čísiel prostredníctvom všeobecnej kritériálnej rovnice:

$$Nu = f(Re, Pr, \xi)$$

Jej konkrétny tvar sa hľadá prispôbovaním na merané dáta. Pre tento experiment stačí uvažovať tvar:

$$Nu = C Re^m Pr^n \xi^k \quad (2)$$

Na rozdiel od vynúteného prúdenia, pri prirodzenom prúdení nie je typická veľkosť rýchlosti nastavená okrajovou podmienkou, a jej voľba je na nás. Preto si zvolíme typickú rýchlosť predpisom $Re = 1$. Výsledkom bude tvar:

$$Nu = C (Gr Pr)^m$$

Kombináciou kritériálnej rovnice (2) a definičnej rovnice pre Nu (1) dostávame vzťah pre koeficient prestupu tepla.

Pre vzduch, vertikálnu stenu valca pri štandardných podmienkach (p_a , $\vartheta_{\infty} = 25^\circ C$) platí [6]:

$$\alpha_k = 1,42 \left(\frac{(\vartheta - \vartheta_{\infty})}{l} \right)^{1/4} = 3,93 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3)$$

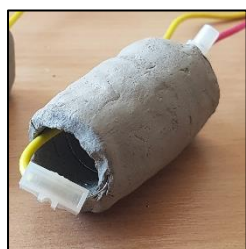
4 Charakter experimentu

Pozornosť bola smerovaná na prirodzenú konvekciu tepla z povrchu dutej hliníkovej trubice do vzduchu. Oba konce trubice boli uzavreté, aby mohla byť zanedbaná konvekcia tepla vzduchom z vnútra trubice a teplota v danom mieste vo vnútri trubice bola približne rovná teplote trubice v danom mieste.



Obr. 3. Skúmaný objekt [5].

Vyhrievanie trubice bolo zabezpečené vodičom z kanthalu, ktorý bol navinutý na pomocný valček a rovnomerne obalený vyvalkanou hlinou, ktorú sme nechali zaschnúť a následne pomocný valček odstránili. Pre zaistenie homogénneho prestupu tepla sme na hlinu navinuli vrstvu alobalu.



Obr. 4. Výhrevné teleso.

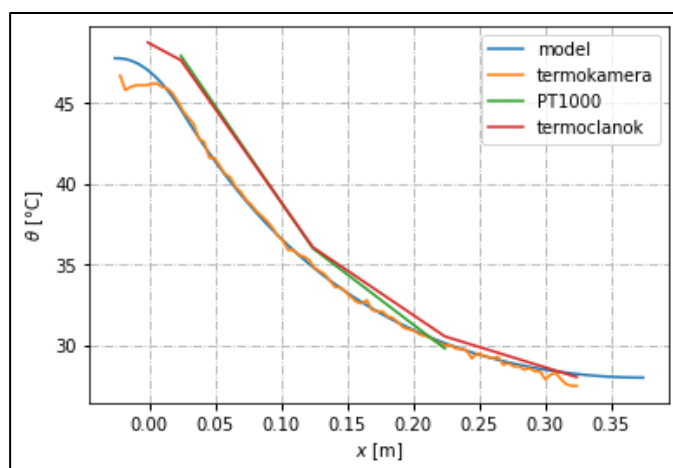
Meranie prebiehalo termokamerou FLUKE PTi120 Pocket Thermal Imager, odporovým teplotným snímačom PT1000 a termočlánkom typu K. Nasnímané údaje termokamerou boli použité na určenie parametrov teoretického modelu, konkrétne koeficientov prestupu tepla pre jednotlivé úseky trubice a zistenie vplyvu umiestnenia výhrevného telesa vnútri dutej trubice na tieto koeficienty. Presnosť termokamery bola overovaná pomocou nameraných hodnôt z termočlánku a odporových teplotných snímačov. Skúmané boli dve umiestnenia výhrevného telesa, a to umiestnenie v dolnom a hornom okraji trubice vo vertikálnej polohe.

Tab. 3. Rozmery skúmanej trubice

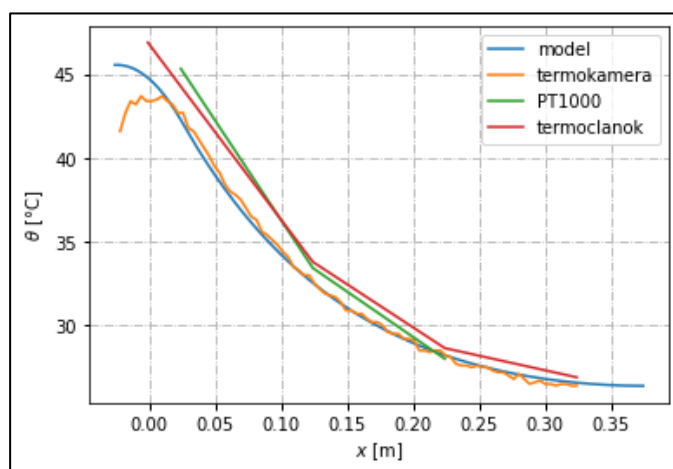
Rozmery	cm
l	40,0
R	1,9
z	0,1
d	5,0

5 Meranie

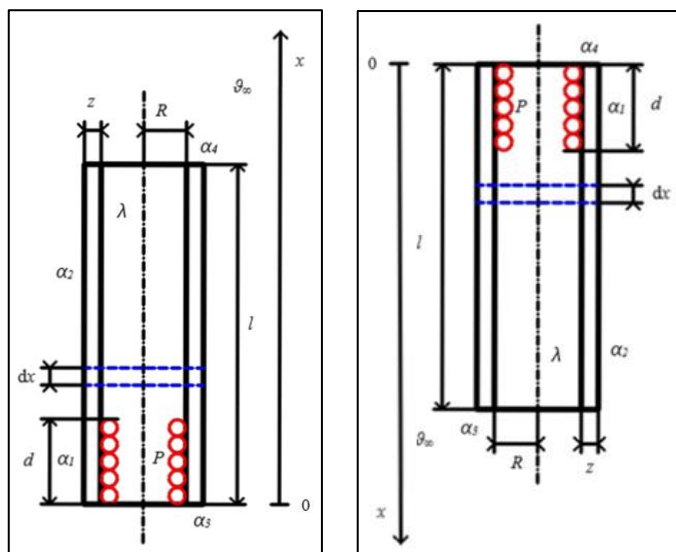
Meranie bolo realizované pri dvoch výkonoch s umiestnením výhrevného telesa v dolnej a následne v hornej časti. Prispôbovanie modelu bolo realizované zmenami koeficientov prestupu tepla α_1 a α_2 , zmenami koeficientu tepelnej vodivosti λ a zavedením účinnosti η prestupu generovaného Joulovho tepla do steny trubice. Počiatočným prispôbovaním modelu na namerané dáta, bol koeficient tepelnej vodivosti určený ako $\lambda = 210 \text{ W/mK}$ a účinnosť výhrevného telesa $\eta = 0,99$. Pri tomto nastavení sme hľadali hodnotu koeficientu prestupu tepla α_1 a α_2 . Teplota okolia v čase merania $\vartheta = 24^\circ\text{C}$.



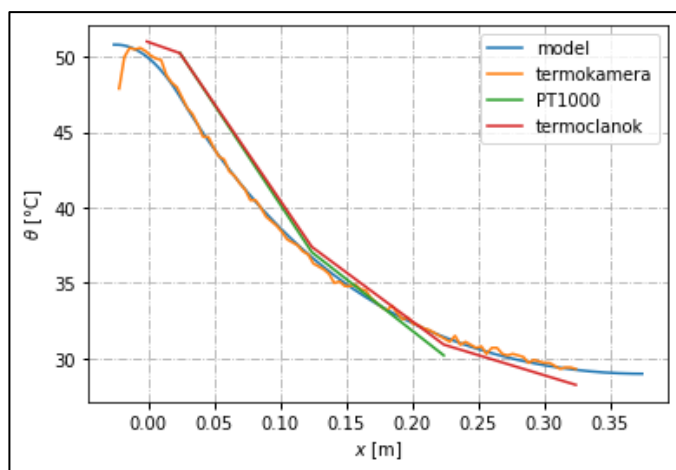
Obr. 7. Porovnanie meraní pri $P \approx 5,37 \text{ W}$ - dole.



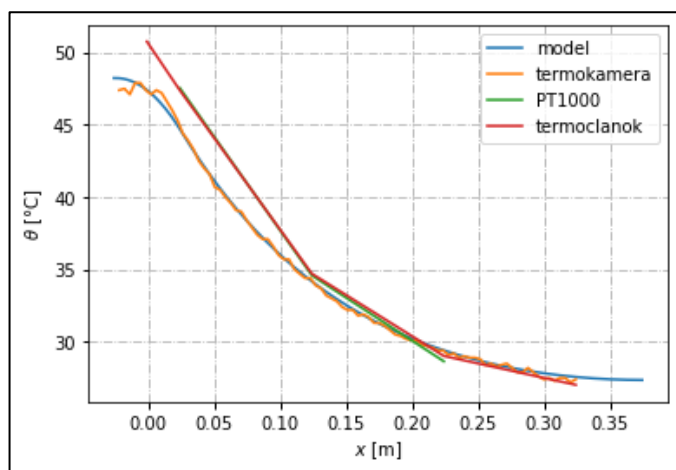
Obr. 8. Porovnanie meraní pri $P \approx 5,37 \text{ W}$ - hore.



Obr. 5,6. Teoretický model vertikálny - výhrevné teleso v dolnej a hornej časti trubice [5].



Obr. 8. Porovnanie meraní pri $P \approx 5,91$ W - dole.



Obr. 9. Porovnanie meraní pri $P \approx 5,91$ W - hore.

Tab. 4. Zistené koeficienty prestupu tepla

P [W]	umiestnenie	α_1 [W/m ² K]	α_2 [W/m ² K]
5,37	dole	8	11
5,37	hore	10	14
5,91	dole	8	10
5,91	hore	9	13

6 Záver

Z meraní sme zistili, že koeficient prestupu tepla je závislý od polohy umiestnenia výhrevného telesa. Avšak vplyv na hodnotu koeficientu α_2 (nevýhrievaná časť trubice je výraznejší ako vplyv na hodnotu koeficientu α_1 (vyhrievaná časť). Pri výkone $P \approx 5,37$ W bol nárast koeficientu α_1 pri obrátení z orientácie trubice "dole" do orientácie "hore" 25 % a nárast koeficientu α_2 27 %. Pri výkone $P \approx 5,91$ W bol nárast koeficientu α_1 13 % a koeficientu α_2 až 30 %.

Predpokladom bol minimálny resp. žiadny rozdiel medzi koeficientmi α_1 a α_2 , čo sa pri prispôbovaní modelu

nepodarilo dosiahnuť. Správny model by asi mal mať plynule meniacu sa funkciu $\alpha(x)$ a v tejto práci vyjadrené dve hodnoty α_1 a α_2 tento jav len v nejakom priemernom zmysle opisujú. Pri výkone $P \approx 5,37$ W bol relatívny rozdiel koeficientov $\Delta\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2)/\alpha_1$ pri orientácii "dole" 38 % a pri orientácii "hore" 40%. Pri vyššom výkone $P \approx 5,91$ W bol tento relatívny rozdiel medzi koeficientmi prestupu tepla pri orientácii "dole" 25 % a 44 % "hore".

Rovnica (3) by nabádala, že pri vyššej teplote povrchu by mal byť koeficient prestupu tepla väčší, čo sa meraním nepotvrdilo.

Z grafov je možné vyčítať, že namerané hodnoty termoclanokom a odporovými teplotnými snímačmi sa zhodujú, ale termokamera resp. model, ktorý na ňu prispôbujeme je v prvej polovici odchylený. Rozdiel môže byť spôsobený nepresným sklonom trubice prípadne nepresnou analýzou termogramu v programe FLUKE Connect. Model sme napriek tomu prispôbovali na dáta z termokamery, pretože pôvodný zámer bolo určovanie termofyzikálnych parametrov pomocou termokamery.

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu práce doc. Ing. Petrovi Bokesovi, PhD. za jeho odborné vedenie a cenné rady.

Literatúra

- [1] VESELSKÝ, J. *Fyzikálne princípy merania*. Bratislava : STU, 2009.79 s. ISBN 978-80-227-3118-8.
- [2] KALOUSEK, M., HUČKO, B. *Prenos tepla*. Bratislava : STU, 1996.186 s. ISBN 80-227-0881-X.
- [3] BOKES, P. *Termomechanika*.
- [4] FÜRI, B., KURČOVÁ, M. *Termomechanika*. Bratislava : STU, 2014.350 s. ISBN 978-80-227-4132-3.
- [5] KOVALČÍKOVÁ, K. *Modelovanie a meranie vedenia tepla v kvázi-1D sústavách*. Bratislava : STU, 2021.46 s.
- [6] HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. New York : McGraw-Hill, 2010.462 s. ISBN 978-0-07-352936-3.
- [7] KOSKY, P. *Exploring Engineering*. Cambridge : Academic Press, 2013.486 s. ISBN 978-0-12-415891-7.

ELEKTROCHEMICKÁ IMPEDANČNÁ SPEKTROSKOPIA S ENERGETICKÝM ROZLIŠENÍM

Natalia Kamila Calvo¹

¹Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave

xcalvo@stuba.sk

Abstrakt – Vývoj optoelektroniky založenej na organických polovodičoch vyžaduje objavovanie nových materiálov a lepšie porozumenie prenosu náboja v týchto materiáloch. Dôležitou súčasťou charakterizácie organických polovodičov je zistenie elektrónovej hustoty stavov (DOS). Vhodnou metódou na určenie DOS v širokom energetickom rozsahu je elektrochemická impedančná spektroskopia s energetickým rozlíšením (ER-EIS). Táto metóda je schopná detegovať zmeny v DOS, na úrovni $10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$, pričom interpretácia dát je priama a jednoduchá. V tejto štúdii sme zisťovali vplyv veľkosti molekúl podporného elektrolytu a vplyv podložky na DOS organického polovodiča MEH-PPV (Poly[2-metoxi-5-(2'-etylhexyloxy)-1,4-fenylénvinylén]).

1 Úvod

Organická elektronika sa v posledných rokoch rýchlo rozvíja a jej využitie má veľký potenciál. Toto je hlavná motivácia pre podrobnejší výskum fyzikálnych vlastností malých organických molekúl a organických polymérov.

Technológie založené na organických polovodičoch umožnili výrobu unikátnych optoelektronických súčiastok vo forme diód, tranzistorov, solárnych článkov a senzorov za nižšie náklady. Takéto súčiastky majú požadované funkcie a vlastnosti, napríklad mechanickú flexibilitu, odolnosť voči nárazom a optickú priehľadnosť.

Súčasťou charakterizácie a optimalizácie organických polovodičov je určenie elektrónovej hustoty stavov (DOS), ktorú je možné určiť rôznymi metódami. Jednou z novších účinných metód je elektrochemická impedančná spektroskopia s energetickým rozlíšením - (EIS-ER). [1]

ER-EIS metóda spočíva v meraní impedancie pri prenose náboja rozhraním polovodič-elektrolyt. Na rozdiel od iných metód, výhoda ER-EIS pozostáva hlavne v schopnosti zmapovať DOS v širokom energetickom rozsahu, v jej veľkej citlivosti detegovať zmeny DOS spôsobené malými zmenami pri príprave materiálov a jednoduchou a priamou interpretáciou dát. [2]

1.1 Polyméry

V anorganických polovodičoch je periodické usporiadanie atómov do kryštalickej mriežky sprostredkované cez kovalentnú väzbu. V polymérových polovodičoch sa medzi molekulami uplatňuje slabá van der Waalsova väzba.

Slabšie väzby medzi molekulami spôsobujú neusporiadanú štruktúru polovodiča. Periodicita sa stráca a vodivostné a valenčné pásma nie sú dobré definované. Vzniká

medzi nimi prekryv a rozkladajú sa na množstvo lokalizovaných stavov. [3]

Tým pádom pre zmapovanie stavov v organických polovodičoch nie je možné používať rovnaké metódy ako pri anorganických polovodičoch.

Jednou z metód, ktorou môžeme zmapovať DOS polymérov je elektrochemická impedančná spektroskopia.

2 Elektrochemická impedančná spektroskopia

2.1 Metóda ER-EIS

Pojem spektroskopia reprezentuje metódu pomocou ktorej je možné diagnostikovať fyzikálne vlastnosti materiálov. Všeobecne vyjadruje závislosť fyzikálnej veličiny ako funkciu energie po interakcii skúmanej látky s elektromagnetickým žiarením alebo časticami. Spektroskopia využíva absorpciu, emisiu alebo rozptyl elektromagnetického žiarenia látkou na štúdium fyzikálnych procesov v látke.

Metóda ER-EIS spočíva v meraní impedancie pri prenose náboja rozhraním polovodič-elektrolyt. Je založená na interakcii vznikajúcej medzi povrchom tenkej organickej vrstvy a tekutým elektrolytom prostredníctvom oxidačno-redukčných (redoxných) reakcií, ktorých výsledkom je Faradaický prúd. Je to následok excitácie malým harmonickým napäťovým signálom. Meranie prebieha pri frekvencii, pri ktorej redoxné reakcie definujú reálnu zložku impedancie. Závislosť reálnej zložky impedancie od napätia pri vhodne zvolenej frekvencii poskytuje informácie o DOS. Princíp je podobný ako extrakcia elektrónov akceptorom a odovzdanie elektrónov donorom na povrchu polovodiča. [2]

2.2 DOS

DOS popisuje transportné a defektné stavy organických polovodičov. Informácia o DOS je dôležitá pre charakterizáciu organických polovodičov a následnú lepšiu optimalizáciu elektronických súčiastok. Elektrónová štruktúra polymérov pevného skupenstva je určovaná slabou Van der Waalsovou väzbou a výsledkom sú úzke pásy s lokalizovanými elektrónovými stavmi.

Funkcia DOS je charakterizovaná počtom elektrónových stavov v jednotke objemu a energie a poskytuje informáciu potrebnú na popis a optimalizáciu procesov spojených s generáciou, rekombináciou a transportom náboja v použitých optoelektronických súčiastkach. [1]

Pomocou metódy ER-EIS získame funkciu hustoty stavov $g(E_F)$.

Prúdovú hustotu spôsobenú Faradaickým prúdom dokážeme vyjadriť nasledovne [2]:

$$j = ek_{et}n_s[A] \quad (1)$$

kde e je elementárny náboj, k_{et} je koeficient prenosu náboja, n_s je koncentrácia elektrónov na povrchu polovodiča a A je koncentrácia redoxných párov v elektrolyte.

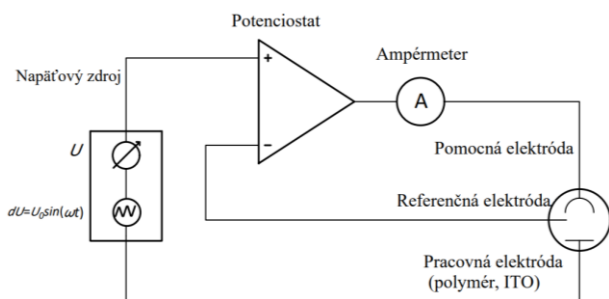
Reálnu zložku impedancie, ktorá je určená transportom náboja cez stavy, je možné experimentálne získať excitáciou systému napäťovým signálom pri vhodnej frekvencii. Hodnota meraného odporu je nepriamo úmerná funkcii DOS.

$$\begin{aligned} g(E_F = eU) &= \frac{dn_s}{d(eU)} = \frac{1}{ek_{et}[A]S} \frac{d(jS)}{dU} = \\ &= \frac{1}{ek_{et}[A]S} \frac{d(I)}{dU} \end{aligned} \quad (2)$$

$$g(E_F = eU) = \frac{1}{ek_{et}[A]SR_{ct}} \quad (3)$$

2.3 Princíp merania

V metóde ER-EIS sa malý napäťový signál s určenou frekvenciou aplikuje na elektrochemický článok pomocou potenciostatu (Obr. 1). Excitačný napäťový signál je superponovaný na jednosmerné napätie a slúži na vygenerovanie impedančného spektra. Z meranej odozvy sa potom môže odvodiť požadovaná hustota stavov, ktorá určuje elektronické transportné a defektné stavy.



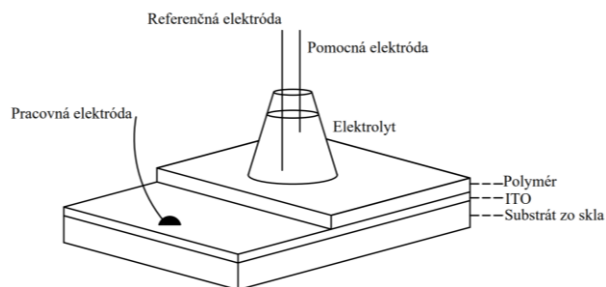
Obr. 1. Schéma zapojenia pre meranie metódou ER-EIS.

Merania boli zrealizované pomocou elektrochemického článku s tromi elektródami: referenčná, pracovná a pomocná (Obr. 2).

Referenčnou elektródou bol drôtik z Ag/AgCl.

Organický polovodič nanosený metódou rotačného nanášania na sklenú podložku ($1,5 \times 2 \text{ cm}^2$) s oxidom indiu a cínu (ITO) alebo na podložku vysoko dotovaného kremíka predstavoval pracovnú elektródu. Jeho potenciál (vzhľadom na Ag/AgCl) bol riadený zdrojom napätia, ktorý bol pripojený cez potenciostat.

Pomocná elektróda vo forme platínového drôtku, ktorý bol ponorený v elektrolyte slúžila na riadenie prúdu prechádzajúceho cez pracovnú elektródu. Pomocou nej vieme kompenzovať úbytok napätia na elektrolyte.



Obr. 2. Elektrochemický článok s tromi elektródami

2.4 Praktická časť - experiment

2.1.1 Priprava materiálov – čistenie substrátov

Povrch substrátov bolo potrebné pred depozíciou polovodičovej vrstvy chemicky očistiť, aby sme zredukovali prítomnosť prachových častíc a organických nečistôt.

Proces čistenia substrátu ITO:

1. Mechanické čistenie substrátu papierovou utierkou a acetónom.
2. Čistenie substrátu v teflónovej nádobe s acetónom v ultrazvukovom kúpeli počas 10 minút (BANDELIN Sonorex).
3. Čistenie substrátu v teflónovej nádobe s izopropanolom v ultrazvukovom kúpeli počas 10 minút (BANDELIN Sonorex).
4. Expozícia povrchu substrátu UV žiareniu s ozónom počas 10 minút na odstránenie zvyškov organických nečistôt.

Proces čistenia substrátu – vysoko dotovaný kremík:

1. Čistenie substrátu v teflónovej nádobe s acetónom v ultrazvukovom kúpeli počas 10 minút (BANDELIN Sonorex).
2. Čistenie substrátu v teflónovej nádobe s izopropanolom v ultrazvukovom kúpeli počas 10 minút (BANDELIN Sonorex).
3. Expozícia povrchu substrátu UV žiareniu s ozónom počas 10 minút na odstránenie zvyškov organických nečistôt.
4. Odleptanie prirodzenej vrstvy oxidu kremíka v kyseline fluorovodíkovej. Postup leptania:

- leptanie v 10% kyseline fluorovodíkovej počas 1 minúty
- kúpeľ v destilovanej vode

- leptanie v 1% kyseline fluorovodíkovej počas 10 sekúnd.

Leptanie muselo byť vykonané tesne pred tým než sa na substrát Si naniesla vrstva polyméru.

2.1.2 Príprava materiálov – príprava pracovnej elektródy v inertnej atmosfére

Keďže organické materiály aj elektrolyt sú citlivé na okolité prostredie, bolo potrebné prípravu roztokov ako aj samotné nanášanie realizovať v inertnej atmosfére, aby sa zamedzilo degradácii materiálov. Po vyčistení sklíčok a rozmiešaní roztoku nasledovala príprava pracovnej elektródy.

Príprava pracovnej elektródy a meranie prebehli v GLOVE BOX-e (Jacomex) v ochrannej atmosfére pozostávajúcej z argónu (kyslík a vlhkosť museli byť pod hodnotou: 20ppm a 2ppm).

Sklíčka a organický roztok sme vložili do GLOVE BOXu a pomocou pipety sme nakvapkali na plošný substrát organický roztok. Vďaka rotačnému nanášaču sa vytvorila tenká homogénna vrstva polymérov na ploche sklíčka.

Jednou z nevýhod elektrochemických metód je, že samotná elektrochemická reakcia môže spôsobiť degradáciu elektrolytu. Preto pomocou komínov sa plocha substrátu rozdelila na viac častí čím sa zvýšil počet meraní na jednom substráte a tým pádom aj presnosť merania.

2.2 Výsledky merania

V prvej časti experimentu nás zaujímal vplyv veľkosti aniónov a kationov v podpornom elektrolyte na merané spektrá.

Vplyv veľkosti iónov sme skúmali na troch rôznych elektrolytoch: TBAPF6, TTPF6 a TTPP.

Rozdiel medzi nimi a TBAPF6 je nasledovný:

- TTPF6 je zložený z dlhšej molekuly kationu a rovnakého aniónu
- TTPP je zložený z dlhších molekúl kationu aj aniónu

Štruktúry molekúl použitých elektrolytov nájdeme na Obr. 3.

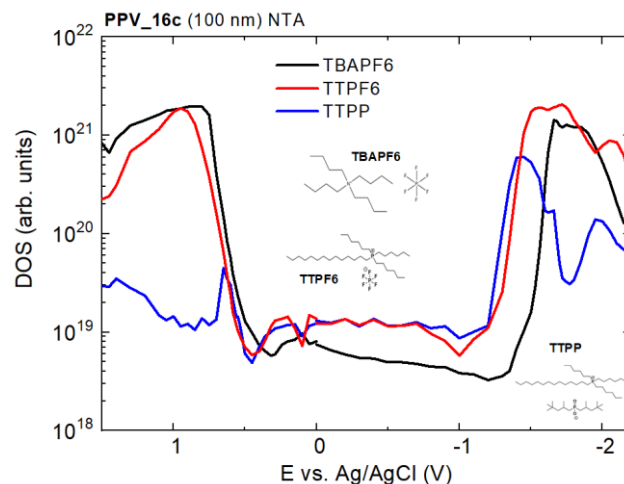
Merania boli realizované na tenkej vrstve polyméru MEH-PPV. Kationy komunikovali s vetvou LUMO hladiny a anióny s vetvou HOMO hladiny [4].

Zistili sme si, že väčšie kationy TTPP a TTPF6 v elektrolyte spôsobili posun hladiny LUMO. Taktiež nie je zachytená časť stavov, ktoré môžeme vidieť pri TBAPF6.

Na elektrolyte, ktorý pozostával z väčších kationov a aniónov (TTPP) vidíme posun LUMO hladiny a taktiež výraznú absenciu stavov na LUMO a HOMO pásoch.

Keď porovnáme zakázané pásma, vidíme prítomnosť artefaktov pri TTPF6 a TTPP, ktoré sa neobjavujú pri elektrolyte s menšími molekulami.

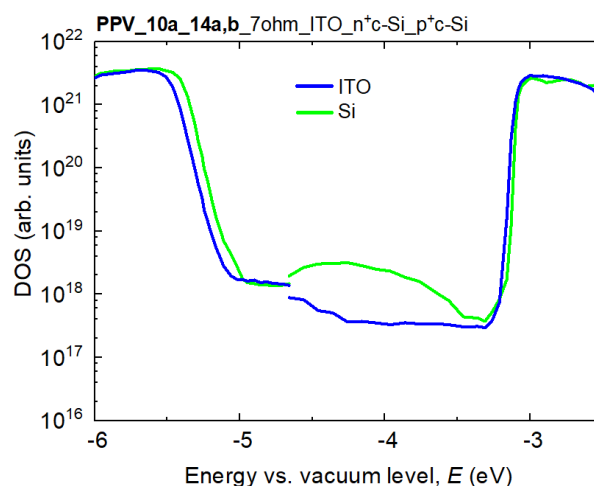
Môžeme konštatovať, že väčšie kationy a anióny v elektrolyte neumožňujú také podrobné a rozsiahle meranie stavov ako elektrolyt s molekulami menších rozmerov. Predpokladáme, že väčšie ióny nedokážu dostatočne prenikať cez póry polyméru čo obmedzuje množstvo redoxných reakcií a tým pádom sú ovplyvnené celkové výsledky merania.



Obr. 3. Graf závislosti DOS od potenciálu pri meraní s rôznymi elektrolytmi

V druhej časti experimentu sme zisťovali vplyv podložky na DOS vrstvy MEH-PPV. Porovnávali sme výsledky meraní, ktoré sa realizovali na dvoch rôznych podložkách: oxid india a cín (ITO) a vysoko dotovaný kremík.

Pri meraní sme zaznamenali iné množstvo stavov v zakázanom pásme na substráte z ITO než na substráte z vysoko dotovaného kremíka. Na substráte z vysoko dotovaného kremíka vidíme prítomnosť dodatočných defektných stavov v zakázanom pásme. Pôvod nárastu týchto stavov je predmetom dodatočného skúmania štruktúrnymi a optickými metódami.



Obr. 4. Graf závislosti DOS od potenciálu pri meraní na rôznych podložkách

3 Záver

Objavovanie nových materiálov a porozumenie prenosu náboja je nevyhnutné pre vývoj optoelektroniky. Na charakterizáciu štruktúry organických polovodičov a ich následnú optimalizáciu je potrebné zistiť DOS, ktorú môžeme určiť elektrochemickou impedančnou spektroskopiou.

Metóda ER-EIS umožňuje rozsiahle a podrobné meranie DOS organických polovodičov. Pomocou nej dokážeme zistiť vplyv nepatrných zmien, ale aj vplyv elektrolytu či podložky na výslednú DOS organického polovodiča. V tejto práci sme zisťovali vplyv veľkosti molekúl elektrolytu a vplyv podložky na DOS. Zistili sme, že:

- Väčšie kationy a anióny v elektrolyte neumožňovali také podrobné a rozsiahle meranie stavov ako elektrolyt s molekulami menších rozmerov.
- Pri meraní DOS na rôznych podložkách sme zaznamenali vyššiu koncentráciu defektných stavov v zakázanom pásme MEH-PPV na substráte vysoko dotovaného kremíka než na substráte ITO.

PodĎakovanie

Chcela by som poďakovať Ing. Vojtechovi Nádaždymu, CSc. , doc. Ing. Petrovi Bokesovi, PhD. a Ing. Tomášovi Várymu, PhD. za ich trpezlivosť, pedagogickú pomoc a rady.

Literatúra

- [1] NADÁŽDY, V., SCHAUER, F. a GMUCOVÁ, K. 2018. Energy Electrochemical impedance spectroscopy for study of electronic structure in disordered organic semiconductors—Possibilities and limitations. In *Journal of Applied Physics*. 2018, vol 123, 161590.
- [2] NADÁŽDY, V., SCHAUER, F. a GMUCOVÁ, K. 2014. Energy resolved electrochemical impedance spectroscopy for electronic structure. In *Applied Physics Letters*. 2014, vol. 105, 142109.
- [3] FRATINI, S. et al. 2020. Charge transport in high-mobility conjugated polymers and molecular semiconductors. In *Nature Materials*. 2020, vol. 19, 491–502 ,.
- [4] SCHAUER, F. et al. 2018. Electrochemically induced charge injection in disordered organic conductive polymers. In *Journal of Applied Physics*. 2018, vol. 124, 165702.

Detekcia chybnjej antény v anténnom systéme pomocou merania fázy odrazenej vlny

Michal Štibraný¹

¹Ústav elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

xstibrany@stuba.sk

Abstrakt – Článok sa zaoberá detekciou chybnjej antény vo veľkých anténnych systémoch. Metóda pozostáva z merania fázy postupnej aj odrazenej vlny. Za týmto účelom je opísaný návrh a realizácia smerovej odbočnice s koeficientom väzby 20 dB s menovitým stredným výkonom väčším než 1 kW.

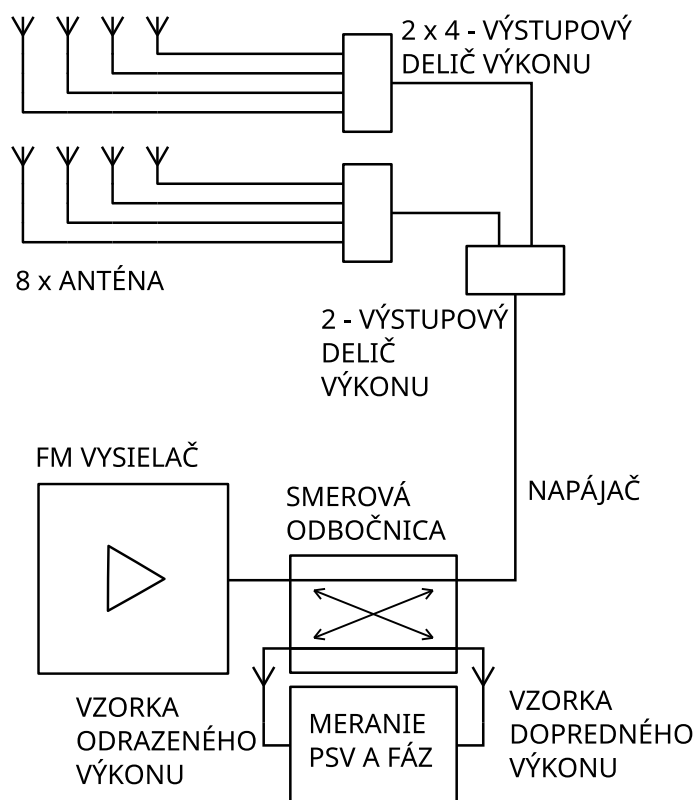
1 Úvod

Jeden z najčastejšie využívaných spôsobov na prenos rádiového a televízneho signálu je terestriálne vysielanie. Základom terestriálneho vysielania je sieť vysokovýkonných vysielacích staníc umiestnených viditeľne na vrcholoch kopcov s anténami pripevnenými na monorúre. Typicky, vysielaný signál nie je vyžarovaný jednou anténou, ale je rozdelený medzi viacero anténnych sekcií tak, aby bola dosiahnutá požadovaná vyžarovacia charakteristika [1]. Rôznymi príčinami môže nastať zhoršenie činnosti vysielania a tým aj zníženie kvality príjmu. Časť možných príčin súvisí s poruchami antén a napájачa, keďže sú vystavené poveternostným vplyvom. Niektoré typy antén sú vystavené tepelnému namáhaniu dôsledkom vodivostných strát, čo môže spôsobiť poruchy na konektore. Medzi bežné poruchy antén môžeme zaradiť skrat na konektore, zakončenie naprázdno, prítomnosť vlhkosti v konektore dôsledkom starnutia tesnení alebo vo všeobecnosti koniec životnosti anténneho systému. Počas zimy je bežným problémom topiaca sa vrstva ľadu na anténach.

Pri riešení diagnostiky chybnjej antény anténneho systému máme k dispozícii niekoľko možností, napríklad meranie pomeru stojatých vln (PSV) na výstupe vysielачa, meranie koeficientu odrazu každej antény jednotlivo a meranie vyžarovacích charakteristík. Každá z metód má isté výhody a nevýhody ako napríklad časová a finančná náročnosť, presnosť, možnosť konkrétnej identifikácie chybnjej antény, avšak zrejme najdôležitejšou výhodou je možnosť diagnostiky bez potreby plánovania odstávky vysielачa. Príklad ďalšej metódy je v [2, 3], kde autori porovnávali nameranú vyžarovaciu charakteristiku so simulovaným modelom. Chybnú anténu potom možno predpokladať v smere najvýraznejších odchýlok.

2 Metóda

Nami navrhnutá metóda vychádza z predpokladu, že antény v anténnom systéme majú rôzne dlhé napájacie koaxiálne



Obr. 1: Zjednodušený náčrt vysielacej FM stanice.

vodiče. Z toho vyplýva, že v prípade odrazu výkonu od chybnjej antény sa vlna do vysielачa vráti vždy s inou fázou v závislosti od poruchovej antény, respektíve vzdialenosti, ktorú musí odrazená vlna prejsť. Obrázok 1 znázorňuje zjednodušené usporiadanie vysielacieho reťazca. Na výstupe vysielачa je zaradená smerová odbočnica, ktorou meriame malú (odbočenú) vzorku dopredného a spätného výkonu. Zo smerovej odbočnice je vysokofrekvenčný výkon vedený napájачom, bežne desiatky metrov dlhým koaxiálnym vedením, k anténam, kde je výkon delený viacerými výkonovými deličmi (deliacimi hlavami) v kaskáde. Fáza doprednej a spätnej vlny bude meraná v prípade detekcie nárastu PSV. Ako je uvedené v [4], pre fázové oneskorenie odrazenej vlny na vstupe napájачa φ platí

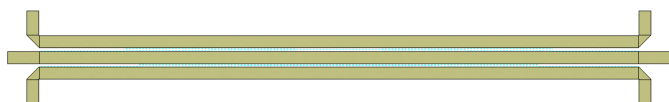
$$\varphi = \Phi - 2\beta l \quad (1)$$

kde Φ je fáza, s ktorou sa vlna odráža (argument koeficientu odrazu od záťaže – antény), β je fázový koeficient daný vlastnosťami napájača a l je dĺžka napájača medzi miestom merania a chybnou anténou. Keďže ostatné veličiny známe alebo merateľné, dĺžku l môžeme vypočítať.

Ďalej uvedme dve fatálne poruchy antény, a to skrat a zakončenie naprázdno. V prípade skratu má odrazená vlna na konci vedenia opačnú fázu $\Phi = 180^\circ$ voči dopadajúcej vlne, v druhom prípade je vlna vo fáze, teda $\Phi = 0^\circ$. Avšak menej závažné poruchy môžu spôsobiť rôzne Φ , preto ďalšie merania budú potrebné. Dôsledkom nemožnosti presne určiť uhol Φ pri menej závažných poruchách, ako aj všeobecne dôsledkom neistoty merania fázy, pozíciu chybnej antény nebude možné presne určiť, ale počet možných pozícií chybnej antény sa stále zníži. Navrhnutú metódu sme sa rozhodli experimentálne overiť pomocou FM vysieláča TEM A07A1100S s výkonom 1 kW a 3 anténami.

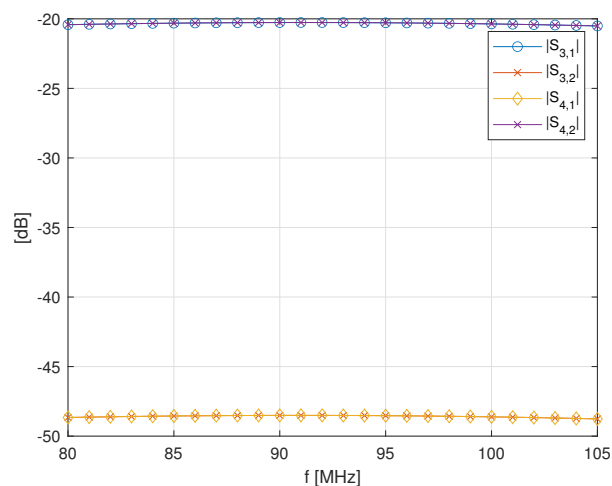
2.1 Návrh smerovej odbočnice

Na meranie výkonu doprednej a odrazenej vlny je potrebné jednotlivé vlny odbočiť (oddeliť definovanú časť). Na to slúži zariadenie nazývané smerová odbočnica. Smerové odbočnice s požadovanými parametrami sú často vyrábané namieru. Preto sme sa rozhodli navrhnuť a vyrobiť odbočnicu s koeficientom väzby 20 dB v oboch smeroch a izoláciou >45 dB v stripline topológii so vzduchovým dielektrikom. Súčiastka bola navrhnutá pre charakteristickú impedanciu 50 Ω . Na návrh a simuláciu bol s láskavým dovolením CERNu použitý program AWR Design Environment.

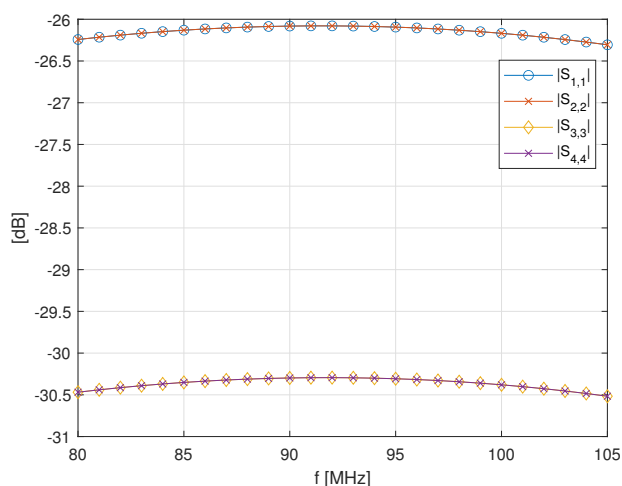


Obr. 2: Vedenia navrhnutej odbočnice pri pohľade zhora.

Z praktického hľadiska by bolo užitočné zvoliť koeficient väzby v doprednom smere 40 dB, aby sa na viazaný port nedostávalo zbytočne veľa výkonu, ktorý potom aj tak bude treba utlmiť. Pri návrhu sa ukázalo, že takto nesymetrická odbočnica s väzbou 40 dB v doprednom smere a 20 dB v spätnom smere, má smerovosť portu viazaného s výstupom nepostačujúcu pre náš účel (10 dB). Dôvodom je narušenie unifomity šírenia párných a nepárných módov [5]. Preto sme sa rozhodli použiť smerovú odbočnicu s rovnakými väzbami. Výsledný návrh obsahuje 3 vedenia hrúbky 2 mm a šírky 16 mm vzdialené 5 mm od seba navzájom, čím je zabezpečená väzba 20 dB. Dĺžka paralelných vedení je rovná štvrtine vlnovej dĺžky pre frekvenciu v strede FM pásma, čo predsavuje 82 cm. Vedenia sú uložené v strede medzi dvoma zemnými rovinami vzdialenými 15 mm od seba. Obrázok 3 a 4 zobrazuje výsledné parametre simulácie pre navrhnuté geometrické rozmery, kde port 1 je vstup, port 2 výstup, port 3 je viazaný so vstupom a port 4 je viazaný s výstupom.



Obr. 3: Koeficienty väzby $S_{3,1}$ a $S_{4,2}$, izolácia $S_{4,1}$ a $S_{3,2}$ simulovanej odbočnice.



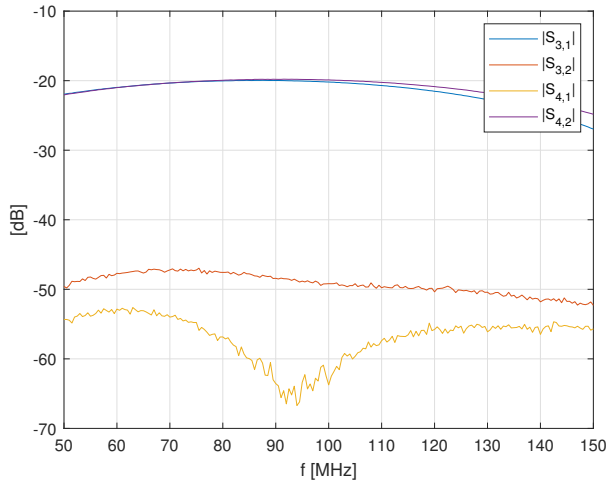
Obr. 4: Koeficienty odrazu simulovanej odbočnice.

2.2 Konštrukcia a meranie smerovej odbočnice

Vyrobená smerová odbočnica má vstupný a výstupný výkon privedený cez 7/8" konektor, zvyšné porty (viazané a zakončené) sú pripojené N konektormi. Celkové rozmery sú 91 x 14,4 cm. Zemné roviny sú tvorené pocínovaným plechom hrúbky 0,4 mm. Pevnosť plechov je zabezpečená dvojitém falcom po obvode. Kolmo na vedenia sú vložené teflonové pásiky vymedzujúce polohu vedení medzi zemnými doskami. Hoci teflon predstavuje nehomogenitu na vedeniach, ktorá spôsobí nárast koeficientov odrazu, meraním sme sa presvedčili, že tento efekt môže byť zanedbaný. Meranie S-parametrov bolo vykonané na 4-portovom sieťovom analyzátore Agilent E7050B, S-parametre sú zobrazené na Obr. 6 a 7. Namerané vložné straty sú 0,18 dB, čo spôsobí stratu približne 40 W z dopredného výkonu pri plnom výstupnom výkone 1 kW spomínaného vysieláča. Z toho časť výkonu na naviaže na ostatné porty alebo odrazí späť do zdroja (podľa simulácie 0,1 dB) a časť výkonu sa premení na teplo.



Obr. 5: Vyhotovená smerová odbočnica.



Obr. 6: Koefficienty väzby $S_{3,1}$ a $S_{4,2}$, izolácia $S_{4,1}$ a $S_{3,2}$ meranej odbočnice.

V pásme 85 Mhz až 100 Mhz dosahuje smerovosť v doprednom smere >25 dB a v spätnom ≥ 40 dB. V celom FM pásme dosahuje smerovosť v doprednom smere >25 dB a v spätnom >35 dB. Taktiež prispôbenie portov dosahuje lepšie hodnoty ako v simulácii. Väzba je v celom FM pásme v oboch smeroch $20 \pm 0,6$ dB.

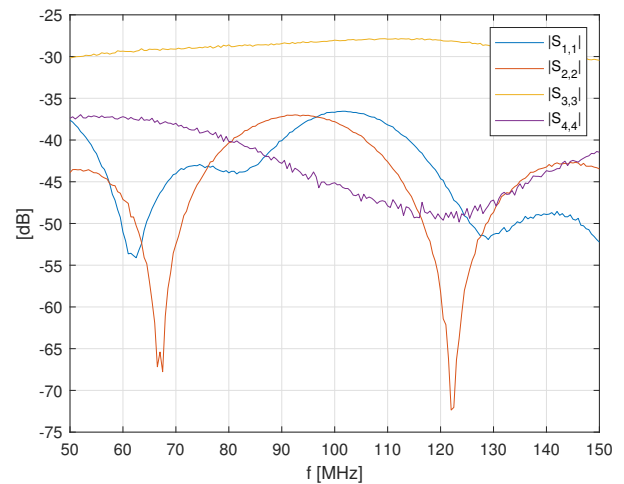
2.3 Vplyv smerovosti odbočnice

Keďže vstup a výstup odbočnice (port 1 a port 2) je navzájom zameniteľný, na základe merania sme sa rozhodli zvoliť port 1 ako vstup, pretože meraním sa ukázalo, že port 4 je lepšie izolovaný voči portu 1, než port 2 voči portu 3 (Obr. 6). Táto voľba je dôležitá, keďže dopredný výkon bude výrazne väčší než odrazený a teda dopredný výkon vnesie väčšiu neistotu do merania odrazeného, než vnesie odrazený do merania dopredného. Nevyužitie konce vedení je nevyhnutné zakončiť terminátormi. Terminátory musia mať čo najpresnejšie impedanciu 50Ω , pretože ich kvalita tiež ovplyvňuje smerovosť odbočnice [5].

Neistotu, ktorú vnesie reálna smerovosť odbočnice možno vyšetriť v prípade harmonických veličín pomocou fázorových diagramov. Relatívnu neistotu odrazeného výkonu nameraného na porte 4 možno vyjadriť ako

$$\delta P_{RFL} = \frac{P_{FWD} |S_{4,1}|^2}{P_{RFL} |S_{4,2}|^2} \quad (2)$$

kde P_{FWD} je dopredný výkon, P_{RFL} je odrazený výkon, $S_{4,2}$ je väzba a $S_{4,1}$ je izolácia.



Obr. 7: Koefficienty odrazu meranej odbočnice.

Pre absolútnu neistotu fázy meraného napätia možno napísať

$$\Delta\varphi_{RFL} = \arctan\left(\sqrt{\frac{P_{FWD}}{P_{RFL}}} \frac{|S_{4,1}|}{|S_{4,2}|}\right). \quad (3)$$

Reálna smerovosť odbočnice bude mať vplyv na meranie výkonu ako aj fázy najmä pri dobre prispôbenej záťaži, kedy je dopredný výkon naviazaný na port 4 porovnateľný s naviazaným odrazeným výkonom. Napríklad pri plnom výstupnom výkone vysielača vieme v pásme 85 až 100 Mhz merať odrazený výkon od 2,3 W s neistotou $<5\%$ spôsobenou reálnou smerovosťou, pričom s rastúcim odrazeným výkonom neistota klesá. Odrazený výkon 2,3 W pri doprednom výkone 1 kW zodpovedá $PSV = 1,1$, čo sa v praxi dá pokladať za bežný prevádzkový stav. Ak vezmeme do úvahy celé FM pásmo (smerovosť v spätnom smere 35 dB), neistota narastie na $>13\%$. Maximálny odrazený výkon je určený nastavením vysielača, najviac môže byť 100 W. V prípade presiahnutia tejto hodnoty sa výstupný výkon zníži tak, aby odrazený výkon nepresahoval nastavenú hodnotu [6].

Taktiež v prípade harmonických veličín je možné vykonať korekciu chyby spôsobenej smerovosťou. Pritom predpokladáme, že dopredný výkon bude oveľa väčší ako odrazený, potom aj odbočnicou nameranú hodnotu dopredného výkonu môžeme pokladať za správnu. Ak meraním na vektorovom analyzátore stanovíme S-parametre (moduly aj fázy), naviazanú hodnotu dopredného výkonu na jeho izolovaný port bude možné odpočítať.

3 Záver

Výsledkom tejto práce je teoretická analýza metódy, pomocou ktorej je možné detegovať chyby v anténnom systéme počas bežnej prevádzky. Navrhnutou metódou by sme mali byť schopní zaznamenať chyby okamžite a bez prítomnosti operátora.

Navrhnutá a vyrobená smerová odbočnica bude použitá pre overenie navrhutej metódy. Namerané S-parametre na

Obr. 6 a 7 spĺňajú požadovanú väzbu a smerovosť. Predmetom ďalšieho skúmania bude aj modelové meranie fázy na smerovej odbočnici pri harmonickom buzení a rôznych zakončeníach, ďalej analýza typických chýb antén a ich vplyv na koeficienty odrazu, ako aj návrh obvodov pre detekciu výkonov a fáz.

Literatúra

- [1] Š. Vávra a J. Turán. Antény a šírenie elektromagnetických vln. , Alfa, 1989.
- [2] J. Krchnák, R. Hartánský, M. Dzuriš, M. Štibraný. Detection of faulty antenna in antenna system using equivalent hertzian dipole structures. *Electro-Mechanical Systems Application in Industry 2022*, 47–50, 2022.
- [3] J. Krchnak, R. Hartansky, N. Grilli. UHF DTV Antenna System diagnostics by radiation pattern measuring 2021 *13th International Conference on Measurement*, Bratislava, Slovakia, 2021, pp. 224–227, doi: 10.23919/Measurement52780.2021.9446822.
- [4] P. Hajach. *Mikrovlnná technika* STU Bratislava, 2008.
- [5] H. Howe. *Stripline Circuit Design* Artech House, Inc., 1974.
- [6] Technical, maintenance and installation manual 1000 W FM transmitter A07A1110S. Technická dokumentácia, TEM S.r.l.