

Farbivom sensitizované solárne články

Tomáš Turňa¹, Ing. Milan Perný, PhD¹

¹ FEI STU/Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

xturnat@stuba.sk

Abstrakt – Tento príspevok predstavuje jednu z dlhodobosť skúmaných fotovoltických technológií farbivom sensitizované solárne články (DSSC). Priblížime si základné poznatky, a to z čoho je článok zložený, princíp jeho fungovania. V ďalšej časti si preberieme meranie na DSSC článku a jeho základné parametre, ktoré boli vypočítané pri tomto meraní. Budeme porovnávať 2 sady vzoriek DSSC článkov, ktoré sa delia podľa použitého materiálu. Meraniami chceme poukázať na zmenu parametrov v čase, a tak isto porovnať 2 najlepšie vzorky z každej sady.

1 Úvod

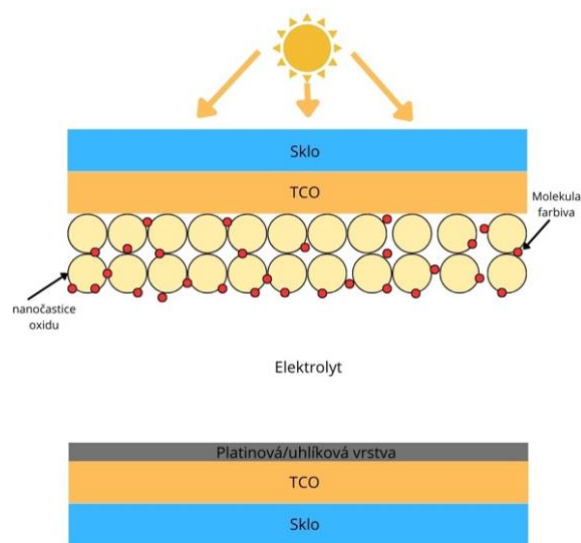
DSSC články patria do tzv. tretej generácie solárnych článkov, čo v stručnosti znamená, že využívajú k separácii náboja aj iné metódy ako P-N prechod a často aj iné materiály ako len polovodiče. Tieto fotovoltické články sa dajú prirovnávať k umelej fotosyntéze vďaka spôsobu, akým napodobňujú absorpciu svetelnej energie v prírode [1].

Farbivom sensitizované solárne články (DSSC) boli objavené v roku 1991 profesorom Michaelom Grätzelom a Dr. Brianom O'Reganom na École Polytechnique Federale de Lausanne, vo Švajčiarsku. Týmto článkom sa často hovorí aj Grätzelove články (Gcell).

2 Základná štruktúra DSSC

DSSC sú organické články, ktoré pomocou umelých alebo prírodných farbív absorbujú fotóny zo svetelného žiarenia. Vďaka možnosti vyrobiť tenký, flexibilný a ľahký solárny článok vieme povedať, že je to ideálny kandidát na vnútorné aplikácie, ako napríklad pre napájanie mikroelektronických zariadení alebo prenosných zariadení vďaka ich schopnosti absorbovať aj difúzne svetlo (odrazené svetlo z okolia) [2].

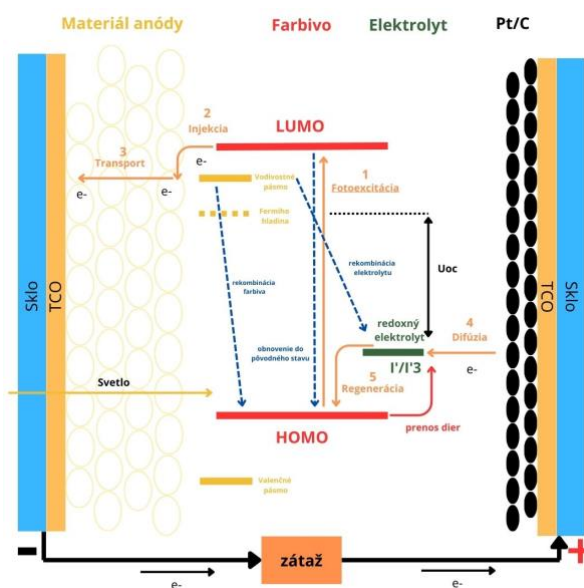
Medzi základné časti DSSC článku patria: fotoanóda, farbivo, redoxný elektrolyt a protielektroda (katóda). Fotoanóda pozostáva z polovodičovej vrstvy oxidu titaničitého (TiO_2). Na tejto vrstve je potom následne usadená vrstva transparentného vodivého oxidu (TCO), môže to byť buď flexibilný polymérový substrát, alebo kovová fólia. Polovodičová vrstva je sensitizovaná s monovrstvovým farbivom väčšinou to býva práve farbivo z Ruténia (Ru). Posledným komponentom je platinová elektróda. Väčšina komerčných DSSC článkov je n-type: elektróny sú zodpovedné za vytváranie vodivosti v materiáli.



Obr. 1. Štruktúra DSSC

2.1 Princíp fungovania DSSC

Princíp fungovania DSSC článku je znázornený na obrázku 2:



Obr. 2. Energetická schéma DSSC článku

Proces premeny slnečnej energie na elektrickú energiu začína pri fotoanóde. Pri dopade elektromagnetických vln zo slnečného žiarenia na povrch pracovnej elektródy (fotoanódy) sa dopadajúce kvantá energie absorbujú skrz elektródu a preniknú do vnútornej časti DSSC článku. V tejto vrstve sa nachádza vyššie spomenutá polovodičová vrstva (TiO_2). Molekuly farbiva sú viazané na vrstvu TiO_2 . Medzery medzi nimi vyplňuje elektrolyt. Fotón s dostatočnou energiou ktorý bol absorbovaný narazí do molekuly farbiva, ktorá sa dostane zo svojho základného stavu (HOMO) do stavu excitovaného (LUMO). Excitované molekuly farbiva potom dokážu vypustiť elektrón z valenčnej vrstvy do vodivostnej vrstvy polovodičového materiálu (TiO_2). Uvoľnený elektrón sa dostane na zadnú časť TCO, kde vykoná prácu a prejde cez vonkajší obvod z anódy na katódu. Na regeneráciu farbiva potom slúži elektrolyt, ktorý pri pracovnej elektróde (katóde) naviaže na seba elektrón, s ktorým dokáže zregenerovať sensitizér. Existujú procesy, pri ktorých dochádza k znižovaniu účinnosti v DSSC článkov. Pri rekombinácii uvoľnených elektrónov s oxidovaným sensitizérom alebo s oxidovaným redoxným elektrolytom na povrchu TiO_2 .

3 Základné parametre fotovoltického článku

V nasledujúcej časti sa budeme zaoberať základnými parametrami fotovoltického článku:

I_{SC} – prúd nakrátko alebo tzv. skratový prúd je definovaný, ako prúd kedy nie je v obvode žiadna záťaž, teda celkový odpor je rovný 0Ω a napätie je tak isto rovné $0 V$ [3] (určíme z VACH).

U_0 – napätie naprázdno, je napätie pri odpojenej záťaži obvodu, obvodom netečie žiaden elektrický prúd, odpor je nekonečne veľký [3] (určíme z VACH).

Bod maximálneho výkonu P_{max} – ak je fotovoltický článok správne „naladený“ do tohto bodu vieme z neho získať maximálny výkonový výťažok (určíme z VACH).

FF – faktor plnenia hovorí o miere pravouhlosti charakteristiky. Ideálny zdroj disponuje pravouhlou charakteristikou kedy faktor plnenia je rovný 1. Čím je toto číslo menšie tým je zdroj tzv. „mäkší“.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC}U_0} \quad (1)$$

η – účinnosť fotovoltického článku sa v našom prípade určí ako podiel výkonu, ktorý FV článok generuje a výkonu ktorý dodávame do fotovoltického článku.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (2)$$

S – plocha meraných článkov $0,00025 m^2$

E – intenzita osvetlenia $[W/m^2]$

$$P_{IN} = S * E \quad (3)$$

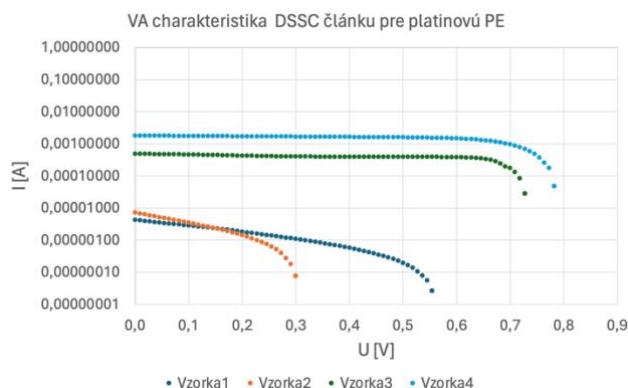
4 Meranie na DSSC článku

Meranie bolo uskutočnené na 8 vzorkách DSSC článkov. Na všetkých vzorkách bolo použité farbivo N719 zložené z ruténia. Jeho veľkou výhodou je vysoká efektívnosť premeny energie zo slnečného žiarenia, vysoká stabilita farbiva. Tak isto veľmi dobre spolupracuje s platínovou a uhlíkovou protielektródou, ktoré boli použité v tomto meraní. Články boli vyrobené pomocou metódy sieťotlač.

Pracovisko, v ktorom sme meranie vykonávali pozostávalo:

- Solárny simulátor Solartron
- 4 kvadrantový merací prístroj Keithley
- Napájací zdroj - Arc Lamp Power Supply, Universal, pre simulátor
- Počítač na vykreslenie priebehov
- Kalibračný článok

Prvé meranie sme uskutočnili pre platínové vzorky protielektródy ďalej len PE, kde sme predložili 4 vzorky na meranie. Pre ypsilonovú os bola použitá logaritmická mierka nakoľko hodnoty vzoriek 1 a 2 sú príliš malé oproti hodnotám vzoriek 3 a 4. Ako je možné vidieť z Obr. 3 pre vzorky 1 a 2 sme namerali nízky prúd nakrátko I_{SC} , čo sa nám prejavilo aj na účinnosti týchto vzoriek keďže tento článok generoval menej elektrónových párov. Intenzita osvetlenia nemala veľký vplyv na konečnú účinnosť keďže sa pohybovala v podobných číslach, a to od $690,3$ do $712 W/m^2$. Faktor plnenia FF nám pre vzorku 1 vyšiel $0,152$ a pre vzorku 2 $0,162$ čo hovorí o mäkkosti týchto FV zdrojov. Najlepšiu účinnosť z pomedzi platínových vzoriek dosiahla vzorka č.4, a to hodnotu $5,1 \%$.

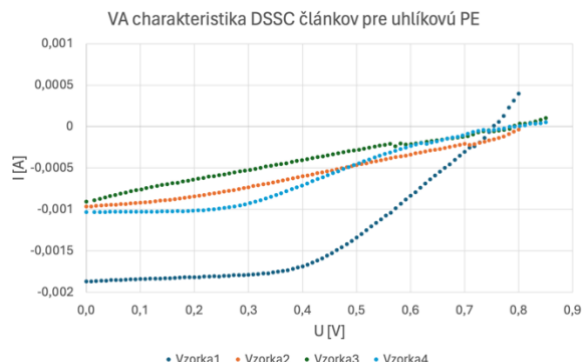


Obr. 3. VA charakteristika predložených vzoriek platínovej PE

Tab. 1. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie platínovej PE

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [μW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
vz.1	0,5631	0,00430	0,367	0,152	712	0,0020
vz.2	0,3066	0,00724	0,360	0,162	700	0,0020
vz.3	0,7301	0,488	234	0,658	695	1,35
vz.4	0,7867	1,805	880	0,620	690,3	5,10

Ďalšie meranie sme uskutočnili na 4 vzorkách obsahujúce uhlíkovú PE. Z Obr. 4 môžeme vidieť, že vzorky číslo 1, 2 a 4 majú VA charakteristiku mäkkého zdroja o čom hovoria aj ich hodnoty z Tab. 2 pre Faktor plnenia FF. Vzorka č.1 dosiahla najlepšiu účinnosť dosiahla vzorka číslo 1 a to 4,02 %.

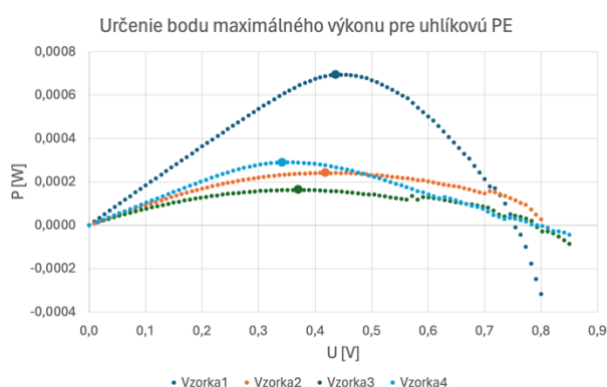


Obr. 4. VA charakteristika predložených vzoriek uhlíkovej PE

Tab. 2. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie uhlíkovej PE

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [mW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
vz.1	0,7547	1,87	0,695	0,493	692	4,02
vz.2	0,8436	0,97	0,242	0,296	692,8	1,39
vz.3	0,7893	0,91	0,165	0,230	696	0,95
vz.4	0,7929	1,03	0,290	0,354	691,3	1,68

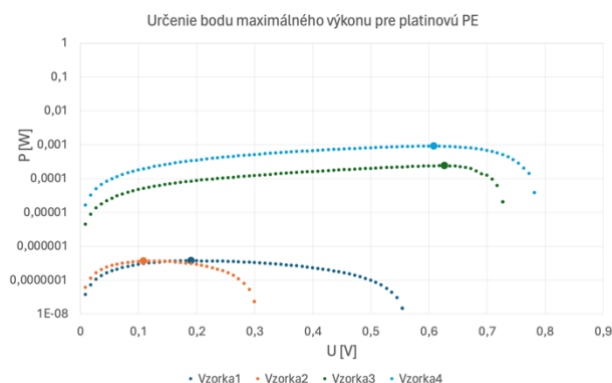
Určenie bodu maximálneho výkonu pre uhlíkovú PE:



Obr. 5. Určenie bodu maximálneho výkonu pre vzorky uhlíkovej PE

Z Obr. 5 vieme určiť bod maximálneho výkonu pre všetky 4 vzorky s uhlíkovou PE. V tomto bode nám bude FV článok generovať najvyšší výkon tzv. má najväčšiu účinnosť práve v tomto bode, v bode maxima.

Určenie bodu maximálneho výkonu pre platínové vzorky PE:

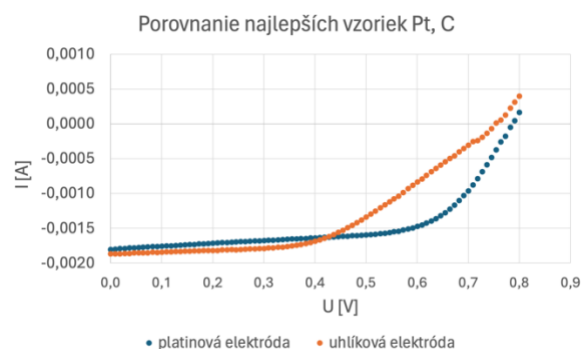


Obr. 6. Určenie bodu maximálneho výkonu pre vzorky platínovej PE

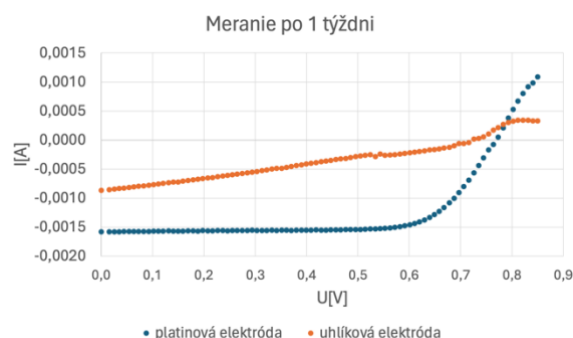
Pre graf z Obr. 6 sme museli opätovne použiť Logaritmickú mierku na ypsilonovú časť grafu kvôli lepšej interpretácii merania.

V nasledujúcom meraní sme porovnávali najlepšie vzorky z predchádzajúceho merania s tým, že sme porovnávali platínovú vzorku s uhlíkovou vzorkou. Platínová PE je lepšie kompatibilná s použitím elektrolytom oproti uhlíkovej PE, čo sa nám aj potvrdilo keďže účinnosť platínovej PE je 5,1 % oproti uhlíkovej PE 4,02 %.

Z Obr. 7 vidíme, že po jednom týždni od pôvodného merania uhlíková vzorka vplyvom starnutia zdegradovala. Porovnaním hodnôt z Tab. 3 a Tab. 4 vieme povedať, že vplyvom starnutia sa znížila hodnota I_{SC} u oboch vzoriek a tým pádom došlo k zníženiu účinnosti. Pri platínovej PE o 0,48 %. Pri uhlíkovej PE o 3,13 %. Vieme povedať, že životnosť platínovej PE je lepšia ako u uhlíkovej PE.



Obr. 7. Porovnanie najlepších vzoriek z platínovej a uhlíkovej sady



Obr. 8. Meranie uskutočnené po 1 týždni od pôvodného merania

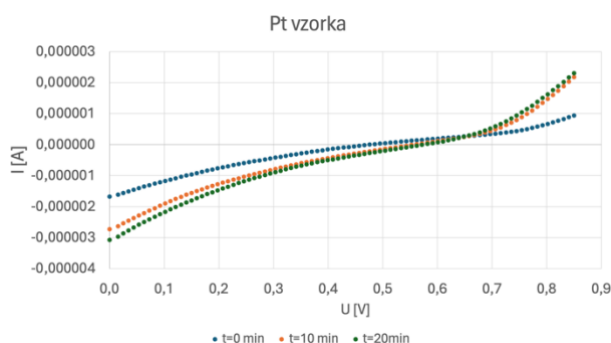
Tab. 3. hodnoty najlepších vzoriek Pt a C.

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [mW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
Pt PE	0,7866	1,81	0,88	0,619	690,3	5,10
C PE	0,7531	1,87	0,695	0,493	692	4,02

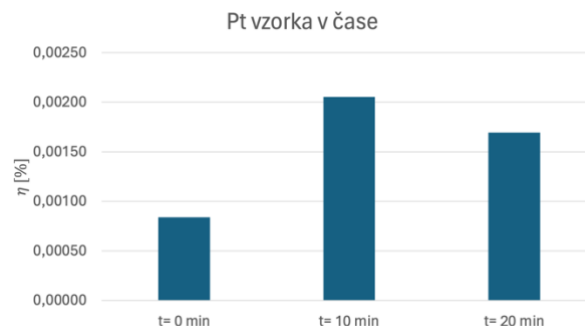
Tab. 4. Hodnoty najlepších vzoriek Pt a C po jednom týždni od ich pôvodného merania

	U_0 [V]	I_{SC} [mA]	P_{max} [mW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
Pt PE	0,7691	1,58	0,877	0,722	760,1	4,62
C PE	0,7253	0,86	0,169	0,271	752,2	0,9

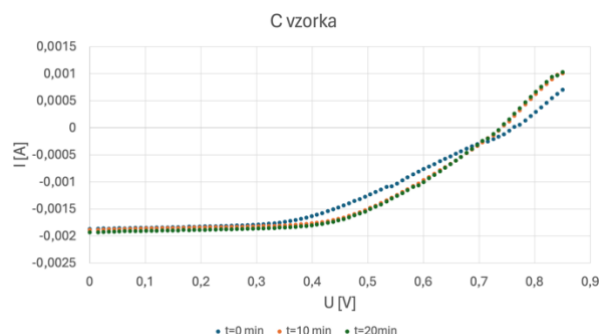
V poslednom meraní sme vybrali 2 náhodné vzorky. Jednu z platinej sady vzoriek a druhú z uhlíkovej sady vzoriek. Meranie sa vykonalo v troch intervaloch $t = 0, 10, 20$ minút, kedy sme po celý čas merania striedavo menili vzorky a merali ich VA charakteristiku. Vplyvom žiarenia počas tohto časového intervalu malo za následok zvyšovanie prúdu nakrátko I_{SC} tým pádom došlo aj k zvýšeniu účinnosti. Vďaka narastajúcej teplote okolia sa postupom času prúd nakrátko I_{SC} a účinnosť η mali znižovať.



Obr. 9. VA charakteristika merania v čase pre platínovú PE



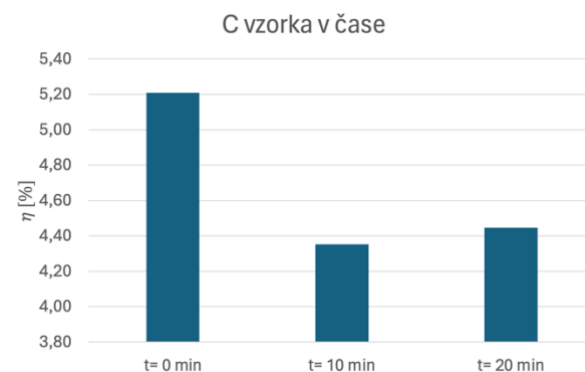
Obr. 10. Účinnosť v čase pre platínovú PE



Obr. 11. VA charakteristika merania v čase pre uhlíkovú PE
Časy: $t_1 = 0$ minút, $t_2 = 10$ minút, $t_3 = 20$ minút

Tab. 5. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie v čase platínová PE

	U_0 [V]	I_{SC} [μA]	P_{max} [μW]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
t_1	0,4769	1,67	0,151	0,190	720	0,00084
t_2	0,5571	2,73	0,257	0,169	501,3	0,00205
t_3	0,5752	3,07	0,295	0,167	695,5	0,00169



Obr. 12. Účinnosť v čase pre uhlíkovú PE

Tab. 6. Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie v čase pre uhlíkovú PE

	U_0 [V]	I_{sc} [A]	P_{max} [W]	FF [-]	E [W/m ²]	η [%]
t1	0,7624	0,00187	0,000660	0,462	506,6	5,21
t2	0,7409	0,00189	0,000759	0,542	697,2	4,35
t3	0,7389	0,00193	0,000774	0,542	696,2	4,45

5 Záver

Predložené DSSC články sme merali v dvoch odlišných sériách rozdelených podľa použitého materiálu na protielektrode. Zistili sme, že po rozdelení vzoriek podľa účinnosti sa dve najlepšie vzorky, jedna z každej série podrobili procesu degradácie časom. Pri platínovej vzorke sme eliminovali možnosť veľkej degradácie v čase. Pri uhlíkovej vzorke sa proces degradácie prejavil výraznejšie.

Nerovnomerné hodnoty účinnosti medzi vzorkami sú pravdepodobne spôsobené nedokonalým procesom výroby zo strany poskytovateľa vzoriek.

Pod'akovanie

Patrí môjmu školiteľovi Ing. Milanovi Pernému, PhD za trpezlivosť a pevné nervy. Ďalej by som chcel poďakovať pánovi Ing. Pavlovi Gemeinerovi, PhD a pani Ing. Tatiane Buchlovej z fakulty chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave za dodanie vzoriek DSSC článkov na meranie.

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

Literatúra

- [1] D. MEDVEĎ. *Farbivom senzitivované slnečné články (DSSC) | ELEKTROENERGETIKA*, dostupné na: <https://jeen.fei.tuke.sk/index.php/jeen/article/view/336>
- [2] M. DHONDE, K. SAHU, M. DAS, A. YADAV, P. GHOSH, a V. V. S. MURTY. *Review—Recent Advancements in Dye-Sensitized Solar Cells; From Photoelectrode to Counter Electrode*, *J. Electrochem. Soc.*, roč. 169, č. 6, s. 066507
- [3] DZÚR. *Sledovanie parametrov fotovoltaiických článkov*. Bakalárska práca, 2022.
- [4] C. A. REYNAUD, R. CLERC, P. B. LECHÊNE, M. HÉBERT, A. CAZIER, a A. C. ARIAS. *Evaluation of indoor photovoltaic power production under directional and diffuse lighting conditions*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 200, s. 110010, sep. 2019.

Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti

Študentská vedecká a odborná činnosť
9. apríl 2024

Organizátor:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Editori:

Peter Benko
Stanislav Sojak

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

ISBN 978-80-227-5411-8

Obsah

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

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

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

Členovia programového a recenzného výboru

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