

Marek Pavlík, Michal Kolcun, Dušan Medved', Zsolt Čonka, Ľubomír Beňa, Samuel Bucko, Jozef Király

## Prevádzkové parametre fotovoltického článku pri zmenách $R_L$ a $R_S$

V súčasnej dobe sa zvyšuje počet inštalovaných fotovoltických systémov (FVS) v domácnosti aj na priemyselných budovách. Avšak ich prevádzka si vyžaduje pozornosť. Neustále sa meniace vonkajšie podmienky (zmena slnečného žiarenia, zmena teploty a pod.) majú za následok zmeny počas prevádzky týchto systémov. Fotovoltický panel ako aj fotovoltický systém je definovaný volt-ampérovou charakteristikou a jej tvar značne ovplyvňuje transformáciu DC napätia na AC napätie. Počas prevádzky FVS sa často stáva, že tvar V-A charakteristiky sa značne líši od tvaru ideálne charakteristiky, čo môže byť spôsobené zatienením alebo deštrukciou FV panela. Tento príspevok pojednáva o zmene V-A charakteristiky pri zmene paralelného a sériového odporu.

Kľúčové slová: MPP bod, fotovoltický panel, faktor plnenia

Currently, the number of installed photovoltaic systems (PV systems) in households and industrial buildings is on the rise. However, their operation requires attention. Constantly changing external conditions (such as variations in sunlight, temperature changes, etc.) result in changes during the operation of these systems. A photovoltaic panel, as well as a photovoltaic system, is defined by its volt-ampere characteristic, and its shape significantly influences the transformation of DC voltage into AC voltage. During the operation of PV systems, it often happens that the shape of the V-A characteristic deviates significantly from the ideal characteristic, which can be caused by shading or damage to the PV panel. This contribution discusses the change in the V-A characteristic when changing parallel and series resistance. **(Operating parameters of a photovoltaic cell during changes in  $R_L$  and  $R_S$ )**

Keywords: MPP point, photovoltaic panel, fill factor

### I. ÚVOD

Energia slnečného žiarenia dopadajúceho na Zem za jeden rok je 20 tisíc krát väčšia, ako je celosvetová spotreba energie. Výkon Slnka je približne  $44 \cdot 10^{26}$  W, z toho vrchná časť atmosféry prijíma približne dve miliardy tejto energie. Takže na povrch atmosféry dopadne výkon približne  $1,85 \cdot 10^{17}$  W. Tento výkon prenáša celé spektrum vlnových dĺžok, avšak atmosféra Zeme pohlcuje röntgenové žiarenie a taktiež zadržuje aj väčšinu ultrafialového žiarenia. Avšak túto pohľutú alebo inak stratenú energiu môžeme zanedbať. Najväčšia časť dopadajúcej energie na Zem je vo forme viditeľného a infračerveného žiarenia [1-3].

Zmeny intenzity slnečného žiarenia závisia od rôznych faktorov, najmä však závisia od toho či je deň alebo noc. Za normálnych podmienok platí, že najviac svetla dopadá na poludnie, kedy je poloha Slnka najvyššia a cesta prenikajúceho svetla na Zem je najkratšia. Tým dochádza k najmenšiemu rozptylu a absorpcii žiarenia v atmosfére. Veľký vplyv na množstvo dopadajúcej energie ma aj ročné obdobie, a to napríklad tak že v severnej Európe počas zimy dopadne na zemský povrch  $0,8 \text{ kWh/m}^2$  slnečného žiarenia za deň, kým počas leta to je viac ako  $4 \text{ kWh/m}^2$  za deň. Tento rozdiel závisí od zemepisnej polohy daného miesta a jeho vzdialenosti k rovníku, pričom je intenzita žiarenia najväčšia. Z toho vyplýva, že čím je miesto bližšie k rovníku, tým je menší rozdiel dopadajúceho žiarenia medzi ročnými obdobiami. Napr. : Priemerná intenzita dopadajúceho žiarenia dosahuje v strednej Európe  $1 \text{ kWh/m}^2$ , v Strednej Ázii to je približne  $1 \text{ kWh/m}^2$  a v niektorých afrických krajinách môže dosahovať až  $2 \text{ kWh/m}^2$  za rok. Na intenzitu dopadajúceho žiarenia na povrch Zeme majú výrazný vplyv premieňajúce sa

atmosférické podmienky a je zrejme, že množstvo energie klesá s zväčšujúcou oblačnosťou. Najlepšie slnečné podmienky sa nachádzajú v púštnych oblastiach, kde je v priebehu roka minimum oblačnosti. Tvorbu oblačnosti taktiež ovplyvňujú geografické pomery miesta. Prítomnosť kopcov, pohorí, oceánov atď. znamená že intenzita slnečného žiarenia sa môže líšiť od okolitých miest. Pričom intenzita žiarenia je vyššia pri rovinných oblastiach než pri kopcovitých oblastiach, kde sa tvorí viac oblačnosti. Intenzita sa taktiež líši v závislosti od vzdialenosti daného miesta k pobrežiu. Intenzita žiarenia sa mení aj dôsledkom znečistenia atmosféry [1] [3-4].

Potreba znižovania skleníkových plynov v atmosfére viedla k obzeraniu sa po iných nekonvenčných zdrojoch energie. Budovania starších konvenčných zdrojov (tepelné elektrárne a pod.) je v úzadí a v súčasnosti sa čoraz väčšia pozornosť smeruje k obnoviteľným zdrojom energie. Medzi tieto obnoviteľné zdroje patria vodné elektrárne, fotovoltické zdroje, veterné elektrárne a iné. Nie každá krajina však má dostatočný potenciál pre využívanie obnoviteľných zdrojov. Pre Slovensko bol Slovenskou energetickou agentúrou vypracovaný dokument, ktorý uvádza celkový a technický potenciál obnoviteľných zdrojov energie (OZE) – viď Tab. 1 [4].

Je možné pozorovať značný rozdiel medzi celkovým a technickým potenciálom, čo je spôsobené tým, že nie je možné každý zdroj energie technicky využiť. Nakoľko niektoré zdroje nie sú efektívne alebo technicky ťažko realizovateľné, v súčasnosti sa ich výstavba nepraktizuje. Takými zdrojmi sú napríklad veterné elektrárne, i keď sa v súčasnosti uvažuje nad jej opätovným budovaním. Za posledné roky sa však ukazuje, že budovanie fotovoltických zdrojov má svoje značné výhody oproti iným obnoviteľným zdrojom. Jednou z výhod je jej jednoduchšia montáž a takmer žiadne zásahy do životného prostredia. V porovnaní s veternými elektrárnami, fotovoltické

elektrárne nezasahujú do životného prostredia, nebránia v leteckom koridore vtáctva a nespôsobujú hluk vo svojom okolí. Taktiež dostupnosť komponentov pre vybudovanie fotovoltaickej elektrárne je vyššia v porovnaní s inými OZE [5-6].

TABUĽKA I [5]  
Potenciál OZE na Slovensku

Zdroj	Celkový potenciál		Technický potenciál	
	TJ	GWh	TJ	GWh
<b>Vodná energia:</b>	<b>23 760</b>	<b>6 600</b>	<b>23 760</b>	<b>6 600</b>
Veľké vodné elektrárne	20 160	5 600	20 160	5 600
Malé vodné elektrárne	3 600	1 000	3 600	1 000
<b>Biomasa</b>	<b>120 300</b>	<b>33 400</b>	<b>120 300</b>	<b>33 400</b>
Lesná biomasa	16 900	4 700	16 900	4 700
Poľnohospodárska biomasa	28 600	7 950	28 600	7 950
Biopalivá	7 000	1 950	7 000	1 950
Bioplyn	6 900	1 900	6 900	1 900
Ostatná biomasa	60 900	16 900	60 900	16 900
<b>Veterná energia</b>			2 160	600
<b>Geotermálna energia</b>	174 640	48 500	22 680	6 300
	194 537 000	54 038 000	34 000	9 450
<b>Slnecná energia</b>	194 855 700	54 126 500	202 900	56 350

Na druhej strane však fotovoltaické elektrárne predstavujú značné problémy počas svojej prevádzky. Slnecná energia je považovaná za nestabilný zdroj energie a je pomerne problematické predikovať výrobu elektrickej energie zo slnka. Preto prevádzka spôsobuje výkyvy v dodávke elektrickej energie, čo spôsobuje problémy hlavne pre distribučné spoločnosti. Mnoho fotovoltaických elektrární, ktoré sú inštalované na strechách rodinných domov sú navyše jednofázové, čo spôsobuje nesymetriu v sieti.

## II. MODEL FOTOVOLTICKÉHO ČLÁNKU

Pre správne pochopenie fungovania fotovoltaického článku je vhodné vytvoriť ekvivalentný model, ktorý bude zložený z prvkov, ktorých správanie je už známe. Náhradná schéma fotovoltaického článku pozostáva z prúdového zdroja s paralelne pripojenou diódou a rezistorom, na modelovanie prechodového odporu sa využíva odpor zapojený do série – Obr.1.

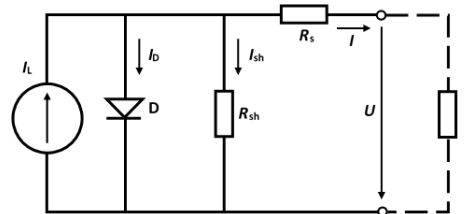
Prúd dodávaný fotovoltaickým článkom do záťaže je sformulovaný podľa Kirchhoffovho zákona o prúdoch: [3-5]

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

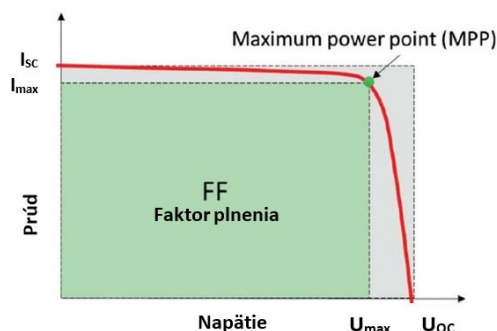
Na obrázku Obr.1 je zobrazená náhradná schéma FV článku. Tento model obsahuje zdroj prúdu  $I_{PH}$ , jednu diódu a sériový odpor  $R_s$ , ktorý predstavuje odpor materiálu polovodiča a odpor kontaktov. Dióda má tiež paralelný odpor  $R_{sh}$ , ktorý je spôsobený rozsiahlymi defektmi. V ľavej časti schémy je zobrazený ideálny FV článok, ktorý sa skladá len zo zdroja prúdu a diódy. Avšak v praxi ideálny FV článok neexistuje, pretože sa tam vyskytujú vyššie spomenuté rezistory [5].

Základnou charakteristikou pre určovanie najdôležitejších parametrov fotovoltaického článku je voltampérová charakteristika (Obr. 2). Z tejto krivky je možné odčítať hraničné parametre ako prúd nakrátko  $I_{sc}$  a napätie naprázdno  $U_{oc}$ . Okrem týchto hraničných

hodnôt z V-A charakteristiky určujeme aj prúd  $I_{max}$  a napätie  $U_{max}$ , ktoré definujú bod maximálneho výkonu MPP. Využitím spomínaných hodnôt vieme jednoducho vypočítať účinnosť, faktor plnenia  $FF$  a maximálny výkon článku  $P_{max}$ . [2] [5]



Obr. 1. Náhradný model fotovoltaického článku[5].



Obr. 2. V-A charakteristika fotovoltaického článku[5].

Skratový prúd  $I_{sc}$ , fotovoltaický článok generuje najvyšší prúd pri skrate, kedy nie je v obvode žiadna záťaž, teda celkový odpor obvodu je rovný  $0 \Omega$ , napätie je taktiež rovné  $0 V$ . Hodnota skratového prúdu je vyššia než hodnota maximálneho prúdu  $I_{max}$  pri bežnej prevádzke. [5-6]

Napätie naprázdno  $U_{oc}$ , je napätie pri odpojenej záťaži obvodu, v tomto stave obvodom netečie žiadny elektrický prúd, pretože odpor je nekonečne veľký. Hodnota napätia naprázdno je závislá na počte fotovoltaických článkov zapojených do série. [6-8]

Bod maximálneho výkonu  $P_{max}$ , označovaný aj ako MPP – maximum power point, je bod VA charakteristiky, pri ktorom je do záťaže dodávaný najvyšší možný výkon. Nachádza sa v oblasti „kolena“ voltampérovej charakteristiky [5] [9].

V prípade charakteristiky zobrazenej na Obr.2 je vyhľadanie MPP bodu pomerne jednoduché. Pre sledovanie MPP bodu sa používa niekoľko rôznych metód. Prvá varianta je bez sledovania MPP bodu. Jedná sa o najzákladnejšie a najjednoduchšie riešenie. Výstupné napätie je nastavené na hodnotu  $U_{ref}$ , ktorá je určená z predošlého merania pre daný fotovoltaický zdroj. Toto riešenie predpokladá, že  $U_{ref}$  sa rovná  $U_{MPP}$ . Táto varianta však neuvažuje so zmenou teploty a slnečného žiarenia na polohu MPP a výstupné napätie je stále nastavené na  $U_{ref}$ . Preto toto riešenie dosahuje najhoršie výsledky. V minulosti sa výstupné napätie  $U_{ref}$  upravovalo podľa ročného obdobia avšak s tým je spojených mnoho problémov [5] [10].

Priame metódy využívajú skutočnosť, že výkonová charakteristika má len jedno maximum a teda derivácia je rovná 0. Taktiež využívajú fakt, že vľavo od maxima je krivka funkcie rastúca a napravo od maxima je funkcia klesajúca. Pri týchto metódach sa vychádza z merania  $U$  a  $I$ . K sledovaniu MPP sa používajú sofistikovanejšie algoritmy ako to bolo pri nepriamych metódach. Týmito metódami sa dosahuje vyššia presnosť vyhľadania MPP bodu a teda maximalizácia dodávanej elektrickej energie. Nevýhodou však je zložitejšie prevedenie oproti metódam nepriamym a teda aj vyššia cena [10].

Pokročilejšie metódy potrebujú vyšší výpočtový výkon. Napríklad metóda Fuzzy Logic Control (FLC) využíva fuzzy logiku. Pri procese hľadania MPP sa využíva fuzzyfikácia, jedná sa o transformáciu vstupných numerických dát (namerané hodnoty prúdu a napätia) na lingvistické premenné. Výstupom sú dve remenné, chyba  $E$  a zmena chyby  $\Delta E$ . Metóda Artificial Neural Network používa algoritmus s umelou inteligenciou, ktorý sa skladá z troch vrstiev – vstupná, skrytá a výstupná. Vstupná sa skladá z nameraných vstupných veličín – napätie, prúd, teplota a intenzita slnečného žiarenia. V druhej vrstve prebieha výpočet na základe váženej hodnoty spojenia medzi uzlami. Tento typ algoritmu je schopný strojového učenia a postupom času sa z nameraných dát sám upravuje veľkosť váh prepojených rôznych uzlov. To má za následok lepšie sledovanie a odhad výskytu MPP. Nevýhodou však je, že metóda musí byť nastavená a je použiteľná len na konkrétnom mieste a pre konkrétny typ panela. Ďalší problém nastáva pri zmene charakteristiky fotovoltaického panela. Je preto potrebná po určitom čase kalibrácia systému.

Z vyššie spomenutých dôvodov vyplýva, že tvar V-A charakteristiky je podstatný. Preto každá zmena oproti ideálnemu tvaru môže byť problematická. Dôvod je ten, že čas, za ktorý systém vyhľadávania MPP bodu sa predlžuje a navyše sa tento bod počas prevádzky mení. Mení sa tvar krivky a tým aj bod MPP.

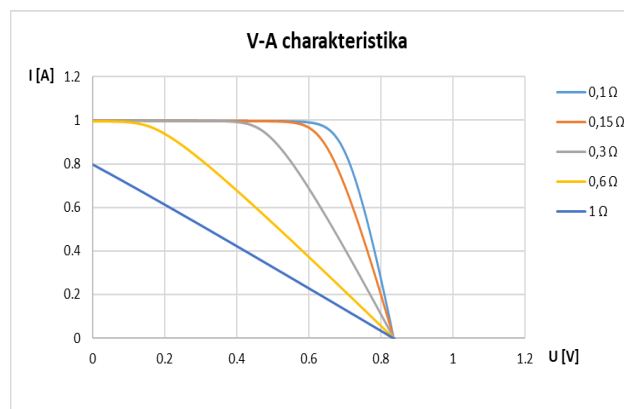
### III. ANALÝZA VÝSLEDKOV

Ako už bolo skôr spomenuté, mnoho parametrov ovplyvňuje tvar V-A charakteristiky. Tým sa komplikuje vyhľadanie MPP bodu a mení sa aj efektívnosť využívania slnečnej energie. V tejto časti bude rozobrané, ako sa mení tvar V-A charakteristiky vzhľadom na zmenu sériového a paralelného odporu. V časti II boli popísané časti modelu fotovoltaického článku, pričom boli spomenuté aj sériový a paralelný odbor, ktoré budú predmetom riešenia. Sériový rezistor predstavuje odpor materiálu polovodiča a odpor kontaktov, ktoré tvoria vzájomné prepojenia medzi fotovoltaickými panelmi, článkami a celým systémom. Paralelný rezistor predstavuje deštrukcie, resp. defekty vo vnútri článku alebo panela.

#### I. Zmena hodnoty sériového rezistora

Pri zmene hodnoty sériového rezistora boli pri simuláciách menené hodnoty na nasledujúce – 0,1  $\Omega$ , 0,15  $\Omega$ , 0,3  $\Omega$ , 0,6  $\Omega$  a 1  $\Omega$ . Na Obr.3 je možné vidieť V-A charakteristiky fotovoltaického článku pre rôzne hodnoty sériového rezistora. Z výsledkov je možné pozorovať zmenu V-A charakteristiky. Maximálne napätie na článku sa nemení, avšak zmena hodnoty sériového rezistora ovplyvňuje hodnotu prúdu a taktiež tvar V-A charakteristiky.

Pri hodnote sériového rezistora 0,6  $\Omega$  je možné pozorovať rapidné zhoršenie V-A charakteristiky. Už v tomto prípade je problematické definovať MPP oblasť. Pri hodnote sériového rezistora 1  $\Omega$  je V-A charakteristika priamka a teda nie je možné určiť MPP oblasť. V takom prípade systém vyhľadávania má problém zistiť oblasť MPP a nastaviť čo najefektívnejšie výrobu z FV systému.

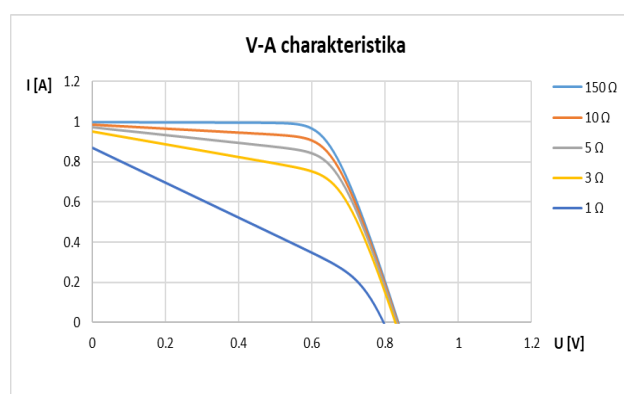


Obr. 3. V-A charakteristika FV článku pri rozdielnych hodnotách odporov sériového rezistora

#### II. Zmena hodnoty paralelného rezistora

Pri zmene hodnoty paralelného rezistora boli pri simuláciách menené hodnoty na nasledujúce – 1  $\Omega$ , 3  $\Omega$ , 5  $\Omega$ , 10  $\Omega$  a 150  $\Omega$ . Na Obr.4 je možné vidieť V-A charakteristiky fotovoltaického článku pre rôzne hodnoty paralelného rezistora. Z výsledkov je možné pozorovať deformácie kriviek. Ďalej je možné pozorovať zmenu maximálneho napätia a prúdu vo V-A charakteristike.

Čím je hodnota paralelného rezistora vyššia tým klesá napätie aj prúd. Navyše sa tým viac deformuje aj koleno a teda oblasť MPP. Pri porovnaní kriviek pre 1  $\Omega$  a 150  $\Omega$  je možné vidieť, že krivka v oblasti MPP sa pomaly mení na priamku a znova nastáva problém s vyhľadávaním MPP bodu. Na druhej strane hodnota odporu 150  $\Omega$  je pomerne vysoká a v praxi nenastáva pokiaľ nie je FV panel zdegradovaný alebo poškodený. Avšak vplyvom počasia (krúpy) môže aj tento stav nastať. Ak je v stringu napríklad zapojených 10ks FV panelov, potom ak jeden z nich je poškodený, ovplyvní každý FV panel zapojený v sérii. V takom prípade sa celý string javí ako jeden FV panel s jednou V-A charakteristikou, ktorá je deformovaná. Z toho dôvodu je potom efektívnosť využívania slnečného žiarenia nízka pri všetkých FV paneloch.



Obr. 4. V-A charakteristika FV článku pri rozdielnych hodnotách odporov paralelného rezistora

Z výsledkov je možné pozorovať, že aj zmena hodnoty sériového rezistora aj zmena hodnoty paralelného rezistora vplyvajú na tvar V-A krivky, napätia a prúdu. Niektoré hodnoty (najmä sériového rezistora) ovplyvňujú tvar krivky značne. Z výsledkov je možné ale dedukovať, že obe situácie sú problematické pre správnu prevádzku FVS.

#### IV. ZÁVER A DISKUSIA

Prevádzka fotovoltaických systémov so sebou prináša značné problémy, ktoré sú spôsobené vonkajšími podmienkami a tiež samotným zapojením FVS. V príspevku boli simulované dve zmeny – zmena hodnoty sériového a paralelného rezistora, ktoré reprezentujú straty a defekty vo FV paneloch. Z výsledkov vyplýva, že zmena hodnoty sériového a paralelného rezistora ( zmena strát a defektov) vo FV paneloch ovplyvňuje tvar V-A charakteristiky, napätie aj prúd. Tieto zmeny negatívne vplyvajú na proces vyhľadávania MPP oblasti. Problém nastáva vtedy, ak sa systém pokúša identifikovať túto oblasť a medzi tým sa vonkajšie podmienky zmenia. V takom prípade sa zmení charakter V-A krivky a celý proces začína odznova. Táto situácia nastáva vtedy, ak je pomerne časté premenlivé počasie (zamračené počasie).

Metód na vyhľadávanie MPP je niekoľko, avšak niektoré majú značné medzery. Je potrebné si uvedomiť, že v predkladanom príspevku sú simulované zmeny len na jednom FV článku. Ak ich zapojíme do série viacero, FVS sa správa ináč. Vtedy sa na V-A charakteristike objavuje viacero možných oblastí MPP a je potrebné určiť, v ktorej z oblastí sa nachádza MPP. Niektoré metódy dokonca nedokážu určiť správny MPP bod. Je to prípad starších systémov, ktoré pracovali na princípe zväčšovania napätia a sledovania prúdu. Avšak aj sa MPP oblasť nachádzala v „druhom“ kolene, potom systém nevyhodnotil túto oblasť ako oblasť MPP. Pokročilejšie metódy tieto chyby odstraňujú.

V súčasnosti sa oblasť výskumu zameriava na návrh rýchlejšieho algoritmu vyhľadávania MPP oblastí, čím sa urýchli nastavenie striedača a zvýši sa efektívnosť využívania slnečnej energie.

#### POĎAKOVANIE

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0312.

#### LITERATÚRA

- [1] D. Džúr, „Sledovanie parametrov fotovoltaických článkov,“ Bakalárska práca, Technická univerzita v Košiciach, 2022.
- [2] M. Pavlík, „Obnoviteľné zdroje energie vo všeobecnosti,“ 1.vyd. Technická univerzita v Košiciach, 2019. 75 s. ISBN 978-80-553-3317-5.
- [3] J. Zhang, et. al., "Model Parameter Analysis of Cracked Photovoltaic Module under Outdoor Conditions," 2020 47th IEEE Photovoltaic

- Specialists Conference (PVSC), 2020, pp. 2509-2512, doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300720.
- [4] N. Das, et.al., "Modelling and analysis of multi-junction solar cells to improve the conversion efficiency of photovoltaic systems," 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/AUPEC.2014.6966482.
- [5] T. Maniak, "Modelovanie parametrov fotovoltaických článkov,“ bakalárska práca, 2021, Technická univerzita v Košiciach, pp.77.
- [6] D. Gupta, et.al, "Photovoltaic Modeling using Single Diode Model in MATLAB," 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 2020, pp. 734-739, doi: 10.1109/GUCON48875.2020.9231165.
- [7] Rodrigues, E.M.G.; Godina, R.; Pouresmaeil, E.; Catalao, J.P.S. Simulation study of a photovoltaic cell with increasing levels of model complexity. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017; pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/eeeic.2017.7977768>.
- [8] R. Verma, S. Gupta and A. Yadav, "Comparative Analysis of Different Shading Patterns in Case of Total Cross Tied Connection for Solar PV Panels," 2023 2nd International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangalore, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/INOCON57975.2023.10101360.
- [9] M. R. Akhtar, M. A. Raza, A. Abid, M. Usman, Z. Murtaza and H. E. Gelani, "Degradation of PhotoVoltaic (PV) Panel Performance due to Shading Effect- Case of Pakistan," 2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Swat, Pakistan, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCE47252.2019.8940801.
- [10] Craciunescu, D. and Fara, L., Investigation of the Partial Shading Effect of Photovoltaic Panels and Optimization of Their Performance Based on High-Efficiency FLC Algorithm. Energies 2023, 16, 1169. <https://doi.org/10.3390/en16031169>

#### ADRESY AUTOROV

Marek Pavlík, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [marek.pavlik@tuke.sk](mailto:marek.pavlik@tuke.sk)  
 Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [michal.kolcun@tuke.sk](mailto:michal.kolcun@tuke.sk)  
 Dušan Medved, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [dusan.medved@tuke.sk](mailto:dusan.medved@tuke.sk)  
 Zsolt Čonka, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [zsolt.conka@tuke.sk](mailto:zsolt.conka@tuke.sk)  
 Ľubomír Beňa, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [lubomir.bena@tuke.sk](mailto:lubomir.bena@tuke.sk)  
 Samuel Bucko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [samuel.bucko@tuke.sk](mailto:samuel.bucko@tuke.sk)  
 Jozef Király, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [jozef.kiraly@tuke.sk](mailto:jozef.kiraly@tuke.sk)