

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

## Vplyv parametrov fotovoltaického článku na výrobu elektrickej energie

Produkcia elektrickej energie z fotovoltaického panela nezávisí len od intenzity slnečného žiarenia. Je potrebné sledovať ďalšie parametre, ktoré ovplyvňujú výkon fotovoltaického panela. V tomto príspevku sú realizované dve analýzy. Prvá analýza sa zaoberá vplyvom zmeny sériového odporu v náhradnom modeli fotovoltaického článku na výkon fotovoltaického článku. Druhá analýza sa zaoberá vplyvom zmeny intenzity slnečného žiarenia na výkon fotovoltaického článku. Výsledkami sú V-A a výkonová charakteristika, kde je možné pozorovať vyššie spomenuté zmeny vo fotovoltaickom článku.

Kľúčové slová: fotovoltaický článok; dióda; sériový odpor

The production of electrical energy from a photovoltaic panel don't depend only on the intensity of solar radiation. It is necessary to monitor other parameters that affect the power of the photovoltaic panel. In this contribution, two analyzes are perform. The first analysis deals with the effect of changing the series resistance in the replacement model of the photovoltaic cell on the power of the photovoltaic cell. The second analysis deals with the effect of changing the intensity of solar radiation on the power of the photovoltaic cell. The results are the V-A and the power characteristic, where the changes in the photovoltaic cell can be observed. **(The influence of photovoltaic cell parameters on the production of electricity)**

Keywords: photovoltaic cell; diode; serial resistance

### I. ÚVOD

Slnko je zdrojom obnoviteľnej energie, ktorá je zložená prevažne z dvoch prvkov: z vodíka 73,46 % a hélia 24,85 %. Vyžarovanie energie v podobe elektromagnetického žiarenia prebieha v obrovských množstvách 24 hodín denne. V podobe fotónov dopadá na zemský povrch a teda aj na povrch fotovoltaického panela. [1]

Slnko vyžaruje každú sekundu energiu  $3,8 \times 10^{23}$  kW. Z toho množstva žiarenia dopadne na planétu Zem, ktorá je vzdialená od Slnka 150 miliónov km, len  $1,08 \times 10^{14}$  kW. 60 % žiarenia dopadá na zemský povrch a zvyšných 40 % je odrazených naspäť do kozmu a pohltých v atmosfére. [1]

Rozdelenie druhov slnečného žiarenia je:

- Priame žiarenie je žiarenie Slnka, ktoré priamo dopadá na povrch bez rozptylu
- Difúzne žiarenie je rozptýlené prechodom cez mraky a nečistoty v atmosfére
- Odrazené žiarenie predstavuje žiarenie odrazené od objektov a povrchu zeme

Celkové žiarenie je tvorené súčtom priameho, difúzneho a odrazeného žiarenia, dopadajúceho na horizontálny povrch.

Množstvo slnečného žiarenia nie je všade rovnaké. Priemerná hodnota ročného celkového žiarenia pre rôzne oblasti na Slovensku je zobrazená v Tab. 1. Difúzne žiarenie je ovplyvňované meteorologickými vplyvmi ako je hmla a oblačnosť. Percentuálny podiel difúzneho žiarenia v závislosti od podmienok prostredia je uvedený v Tab. 2.

Slnčná konštanta predstavuje celkové množstvo solárneho žiarenia na jednotku plochy, meranie sa vykonáva na vonkajšej strane zemskej atmosféry v rovine kolmej na dopadajúce lúče. Hodnota konštanty je  $1366 \text{ W/m}^2$ , táto hodnota sa môže v závislosti aktivity Slnka mierne meniť. Prechodom žiarenia cez vodné pary a častice prachu v atmosfére sa intenzita žiarenia oslabuje, z čoho vyplýva, že

na zemskom povrchu nie je možné dosiahnuť hodnoty slnečného žiarenia vyššie ako  $1366 \text{ W/m}^2$ . [1]

TABUĽKA I

Priemerná hodnota ročného celkového žiarenia pre rôzne oblasti na Slovensku

Oblasť Slovenska	Priemer ročného celkového žiarenia [kWh/m <sup>2</sup> ]
Nížiny	1200 – 1300
Kotliny ovplyvňované inverziami	1100 – 1200
Stredné horské polohy, krajný severozápad	1050 – 1100

TABUĽKA II

Podiel difúzneho žiarenia pre rôzne podmienky

Podmienky	Žiarenie [W/m <sup>2</sup> ]	Podiel difúzneho žiarenia [%]
Jasno	800 - 1000	10
Oblačno	600 - 900	50
Hmlistý jesenný deň	100 - 300	100
Zamračený zimný deň	50	100
Celoročný priemer	600	50 - 60

### II. MODEL FOTOVOLTAICKEHO ČLÁNKU

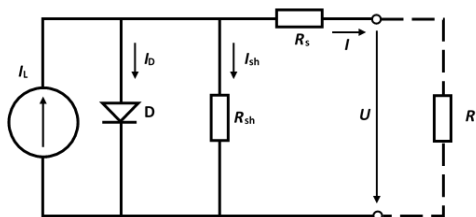
Pre správne pochopenie fungovania fotovoltaického článku je vhodné vytvoriť ekvivalentný model, ktorý bude zložený z prvkov, ktorých správanie je už známe. Náhradná schéma fotovoltaického článku pozostáva z prúdového zdroja s paralelne pripojenou diódou a rezistorom, na modelovanie prechodového odporu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

Prúd dodávaný fotovoltaickým článkom do záťaže je sformulovaný podľa Kirchhoffovho zákona o prúdoch: [2]

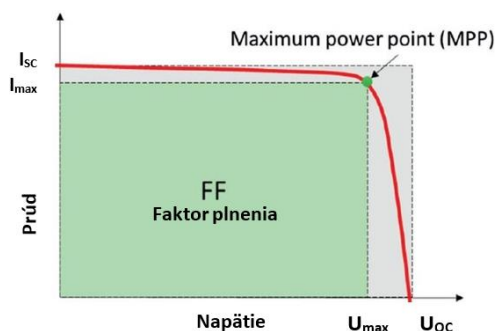
$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad [A] \quad (1)$$

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] [3]



Obr. 1. Náhradný model fotovoltaického článku.



Obr. 2. V-A charakteristika fotovoltaického článku.

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. [1]

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. [1]

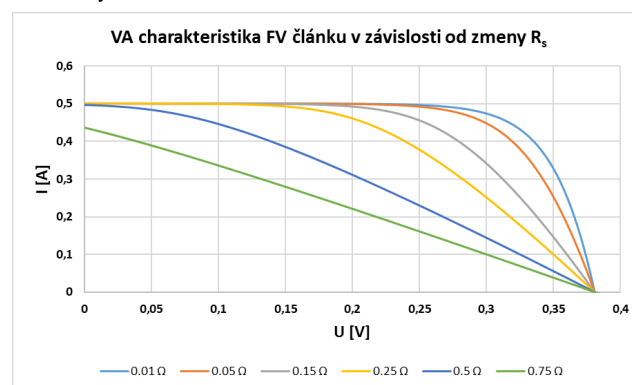
Bod maximálneho výkonu  $P_{max}$ , označovaný aj ako MPP – maximum power point, je bod VA charakteristiky, pri ktorom je do záťaže dodávaný najvyšší možný výkon. Nachádza sa v oblasti „kolena“ voltampérovej charakteristiky. [1]

Bod maximálneho výkonu je meraný vo Wattoch (W) alebo peak Wattoch (Wp). MPP sa nachádza na V-A charakteristike v mieste kde elektrický prúd z takmer lineárneho priebehu začína prudko klesať. Súčin napätia naprázdno a prúdu nakrátko je ideálny výkon a dá sa dosiahnuť len teoreticky. Okrem voltampérovej charakteristiky využívame aj výkonovú, ktorá predstavuje závislosť výkonu fotovoltaického článku od napätia. Každý s častí náhradného modelu fotovoltaického článku svojim spôsobom ovplyvňuje jeho činnosť ako aj samotný tvar V-A charakteristiky

### III. ANALÝZA PARAMETROV FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU

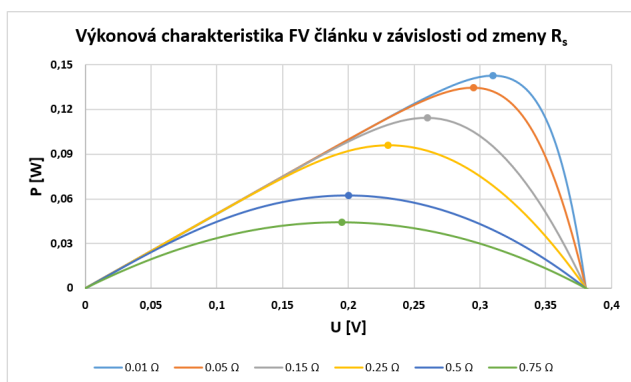
#### a) Zmena sériového odporu $R_S$ fotovoltaického článku

Prvá analýza na fotovoltaickom článku bola vykonaná so zmenou sériového odporu  $R_S$ , ktorý vo fotovoltaických článkoch predstavuje odpor vodičov a prechodový odpor. Zvýšenie tohto odporu spôsobuje pokles výkonu fotovoltaického článku. Zo simulácie vyplýva, že so zvyšovaním sériového odporu fotovoltaického článku dochádza k poklesu elektrického prúdu tečúceho záťažou. Dodávaný prúd do záťaže pri zvýšenom sériovom odpore fotovoltaického článku klesá. Bod maximálneho výkonu MPP, ktorý sa nachádza v kolene charakteristiky sa so zvyšujúcim sériovým odporom fotovoltaického článku začína vyskytovať už pri nižšej hodnote napätia, pri vyšších hodnotách odporu  $R_S$  sa oblasť kolena úplne stráca a voltampérová charakteristika (Obr. 3) nadobúda tvar klesajúcej priamky. Po zvýšení sériového odporu simulovaného článku na hodnotu  $R_S = 0,75 \Omega$  došlo už aj k výraznému poklesu prúdu nakrátko. Klesá faktor plnenia aj výkon. Intenzita slnečného žiarenia bola počas každej simulácie konštantná  $E = 1000 W/m^2$ , paralelný odpor článku bol taktiež konštantný  $R_{sh} = 30 k\Omega$ .



Obr. 3. VA charakteristika FV článku, zmena  $R_S$ .

Vo výkonovej charakteristike FV článku (Obr.4) je vidieť negatívny vplyv zmeny sériového odporu na výkon článku. Výkon článku pri zvýšenom sériovom odpore fotovoltaického článku výrazne klesá a súčasne dochádza k rozširovaniu oblasti, v ktorej by sa mohol bod MPP nachádzať. S nárastom  $R_S$  dochádza vo výkonovej charakteristike ku skracovaniu lineárnej časti, pri vysokých hodnotách sa lineárna časť stráca a výkonová charakteristika nadobúda tvar oblúka.

Obr. 4. Výkonová charakteristika FV článku, zmena  $R_s$ .

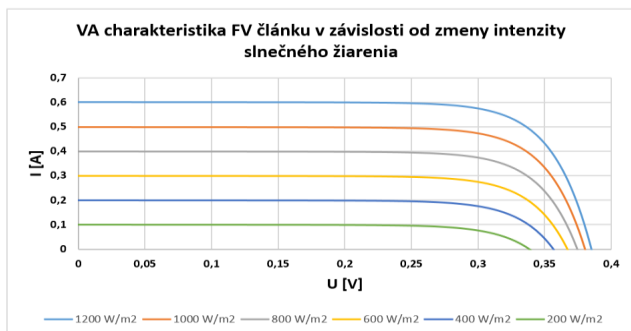
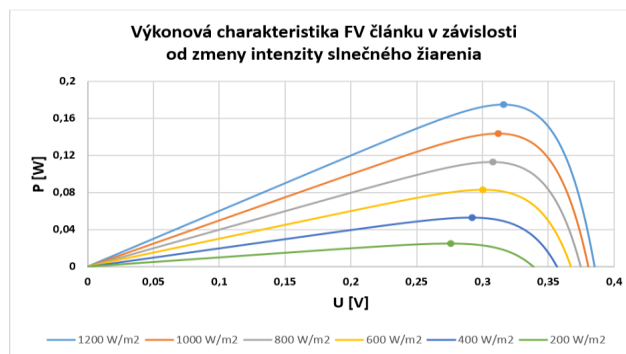
Skratový prúd simulovaného článku sa pri sériovom odpore do hodnoty  $0,25 \Omega$  nemenil a mal konštantnú hodnotu  $0,50 \text{ A}$  (Tab. 3). Napätie naprázdno bolo v každej simulácii konštantné,  $U_{OC} = 0,38 \text{ V}$ . Maximálny výkon článku mal hodnotu  $P_{max} = 0,143 \text{ W}$ , pri prúde  $I_{max} = 0,461 \text{ A}$  a napätí  $U_{max} = 0,310 \text{ V}$ . Zvýšenie hodnoty sériového odporu znižuje faktor plnenia, ktorý bol maximálny pri najmenej simulovanej hodnote odporu  $R_s = 0,01 \Omega$ , faktor plnenia mal v tomto prípade hodnotu  $0,752$  resp.  $75,2 \%$ .

TABUĽKA III  
Simulované hodnoty pre zmenu  $R_s$ 

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$I_{sc}$ [A]	$U_{oc}$ [V]	$P_{max}$ [W]	$I_{max}$ [A]	$U_{max}$ [V]	FF [-]
0,01	0,50	0,38	0,143	0,461	0,310	0,752
0,05	0,50	0,38	0,135	0,456	0,295	0,708
0,15	0,50	0,38	0,114	0,440	0,260	0,602
0,25	0,50	0,38	0,096	0,417	0,230	0,505
0,5	0,497	0,38	0,062	0,311	0,200	0,329
0,75	0,436	0,38	0,044	0,227	0,195	0,267

## b) Zmena intenzity slnečného žiarenia

Pri tejto analýze bola voltampérová charakteristika (Obr. 5) a výkonová charakteristika (Obr. 6) vytvorená pre rôzne intenzity slnečného žiarenia. Paralelný odpor fotovoltaického článku mal hodnotu  $R_{sh} = 300 \Omega$ , sériový odpor fotovoltaického článku bol  $R_s = 5 \text{ m}\Omega$ . Teplota fotovoltaického článku bola určená v skripte na  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zmena intenzity žiarenia bola dosiahnutá zmenou napätia batérie, ktorá reguluje prúdový zdroj v modeli článku v programe Proteus. Hodnoty intenzity slnečného žiarenia boli nastavené na:  $1200 \text{ W/m}^2$  ( $0,6 \text{ V}$ ),  $1000 \text{ W/m}^2$  ( $0,5 \text{ V}$ ),  $800 \text{ W/m}^2$  ( $0,4 \text{ V}$ ),  $600 \text{ W/m}^2$  ( $0,3 \text{ V}$ ),  $400 \text{ W/m}^2$  ( $0,2 \text{ V}$ ),  $200 \text{ W/m}^2$  ( $0,1 \text{ V}$ ).

Obr. 5. VA charakteristika FV článku, zmena  $E$ .Obr. 6. Výkonová charakteristika FV článku, zmena  $E$ .

So zvyšujúcou sa intenzitou slnečného žiarenia narastá hodnota skratového prúdu aj napätie naprázdno. Pozitívny vplyv intenzity žiarenia na výkon článku je viditeľný aj na výkonovej charakteristike fotovoltaického článku, v ktorej dochádza k zvyšovaniu maximálneho dodávaného výkonu do záťaže práve pri vyšších hodnotách intenzity žiarenia. Najmenší dodávaný výkon bol nasimulovaný pri intenzite žiarenia  $200 \text{ W/m}^2$ , kedy článok vo svojom bode maximálneho výkonu generoval len  $P_{max} = 0,025 \text{ W}$  (Tab. 4). Najväčší výkon článku bol nasimulovaný pri intenzite žiarenia  $1200 \text{ W/m}^2$ , maximálny výkon článku mal hodnotu  $P_{max} = 0,175 \text{ W}$ . Zmena intenzity žiarenia z  $200 \text{ W/m}^2$  na  $1200 \text{ W/m}^2$  predstavuje nárast o  $600 \%$ , výkon článku však narástol z  $P_{max} = 0,025 \text{ W}$  až na hodnotu  $P_{max} = 0,175 \text{ W}$ , teda o  $700 \%$ . Z uvedeného vyplýva, že fotovoltaické články by mali pracovať s čo možno najvyššou intenzitou žiarenia, preto je potrebné dbať na čistotu fotovoltaických článkov alebo na správne umiestnenie v netienenom priestore.

TABUĽKA IV  
Simulované hodnoty pre zmenu  $E$ 

$E$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$I_{sc}$ [A]	$U_{oc}$ [V]	$P_{max}$ [W]	$I_{max}$ [A]	$U_{max}$ [V]	FF [-]
1200	0,60	0,386	0,175	0,553	0,316	0,755
1000	0,50	0,381	0,144	0,460	0,312	0,754
800	0,40	0,374	0,113	0,367	0,308	0,755
600	0,30	0,367	0,083	0,276	0,300	0,751
400	0,20	0,357	0,053	0,182	0,292	0,745
200	0,10	0,338	0,025	0,090	0,276	0,736

## IV. ZÁVER A DISKUSIA

Problematike prevádzky fotovoltaických systémov sa v súčasnosti venuje odborná a už aj laická verejnosť. Vzhľadom na dostupnosť fotovoltaických systémov si už aj bežné domácnosti budujú fotovoltaické systémy na strechách domov. Avšak prevádzka týchto systémov nie je vždy bezproblémová. Vzniká množstvo problémov, ktoré ovplyvňujú výrobu elektrickej energie z týchto systémov. Niektoré parametre nie je možné ovplyvniť (intenzita slnečného žiarenia), na druhej strane iné ovplyvniť je možné (prechodové odpory v systéme a pod).

Z analýz v tomto príspevku vyplýva, že zmena prechodového odporu (v náhradnom modeli je reprezentovaná sériovým odporom) značne ovplyvňuje výkon fotovoltaického článku a teda aj panela.

Ďalším problémom je fakt, že zmena sériového odporu ovplyvňuje tvar V-A charakteristiky, čo spôsobuje značné problémy pri prevádzke striedača. Takmer ideálny tvar V-A charakteristiky je zobrazený na Obr.3 modrou farbou pre hodnotu  $R_s = 0,01 \Omega$ . Avšak z výsledkov pre sériový odpor napr.  $0,75 \Omega$  je možné vidieť problematické určenie MPP bodu a teda bodu maximálneho výkonu, čo má vplyv na prevádzku a aj samotný výkon fotovoltaického systému.

### POĎAKOVANIE

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

### LITERATÚRA

- [1] D. Dzúr, „Sledovanie parametrov fotovoltaických článkov,“ Bakalárska práca, 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.

### 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)  
 Lubomír 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)