

## MATEMATIČNI MODELI SONČNIH CELIC V PROGRAMSKEM ORODJU MATLAB/SIMULINK

Boris VOVČKO, Bojan VOVČKO, Aleš ŠTRICELJ, Sebastijan SEME

### POVZETEK

*V članku so predstavljeni matematični modeli sončne celice sestavljeni v programskem paketu Matlab/Simulink. Matematični modeli sončne celice predstavljeni v članku so glede na zahtevnost sestave in posledično tudi po točnosti odzivov na vhodne parametre poimenovani kot idealni, enostavni, enodiodni in dvodiodni model. V programu Matlab/Simulink smo matematične modele sončne celice sestavili s pomočjo izrazov, ki opisujejo delovanje sončne celice. Matematične modele sončne celice smo primerjali med seboj in jih ovrednotili s primerjavo izmerjenih vrednosti dejanske sončne celice.*

### ABSTRACT

*This article presents a mathematical model of solar cell composed in Matlab/Simulink. Mathematical models of solar cell presented in the article are differ in the complexity of the structure and consequently the accuracy of the responses to the input parameters and they are named as ideal, simple, single-diode and two-diode model. In Matlab/Simulink are mathematical models of solar cell assembled with the help of terms, which describe the operation of solar cell. We compared mathematical models of solar cell with each other and we were evaluated them by comparing with the measured values of the actual solar cell.*

### 1. UVOD

V današnjem svetu je čedalje bolj prisotna miselnost o proizvodnji in uporabi zelene energije. K temu je v zadnjih letih pripomogel tudi Kjotski sporazum v katerem je zapisano, da se postopoma fosilna goriva zamenjajo z obnovljivimi viri energije. V današnjem času pridobivanje energije temelji na uporabi sodobne tehnologije, ki omogoča višji izkoristek pretvorbe primarne energije v mehansko ali električno energijo. V tem članku smo se posvetili področju pridobivanja električne energije iz sončnega obsevanja, ki je na voljo v praktično neomejenih količinah.

V članku so predstavljeni matematični modeli sončne celice, ki so sestavljeni v programskem paketu Matlab s knjižnico Simulink. Predstavljeni so štiri najpogosteje uporabljeni matematični modeli sončne celice, in sicer idealni, enostavni, enodiodni ter

dvodioidni model. Vsak posebej so preizkušeni pri različni jakosti sončnega sevanja in različnih temperaturah sončne celice. Tako so matematični modeli sončne celice med seboj primerjani skupaj z rezultati meritev na realni sončni celici. Najustreznejši matematični model sončne celice bo uporabljen za izdelavo matematičnega modela sončnega modula.

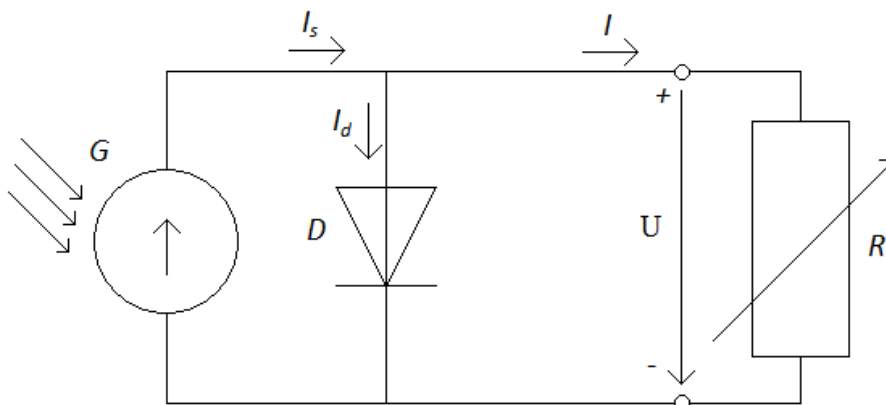
## 2. MATEMATIČNI MODELI SONČNE CELICE

Matematične modele sončnih celic smo sestavili s pomočjo matematičnih zapisov iz [1] in [2]. Tako obstajajo različni matematični modeli sončne celice, zato jih je potrebno med seboj primerjati in določiti najprimernejšega za izdelavo matematičnega modela sončne elektrarne. Matematični model sončne celice je potreben tudi za razumevanje delovanja sončne celice; od njenega čisto osnovnega do bolj zahtevnega matematičnega modela.

Tako smo s pomočjo izrazov iz [1] in [2] izdelali štiri najpogosteje uporabljene matematične modele sončne celice. Predstavljeni so idealni, enostavni, enodioidni in dvodioidni matematični modeli sončne celice. Vsakemu matematičnemu modelu so za ovrednotenje dodani rezultati simulacij, ki smo jih dobili iz matematičnega modela pri različnih temperaturah celice in jakosti sončnega sevanja. Na koncu so matematični modeli med seboj ovrednoteni glede na njihov čas simulacije in točnost rezultatov, ki smo jih ovrednotili s primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi električnih veličin.

### 2.1 Idealni model sončne celice

Idealni matematični model sončne celice predstavlja najenostavnejši zapis izrazov sončne celice. Sestavljata ga sprejemnik sončnega sevanja in dioda. Idealni model sončne celice je shematsko prikazan na sliki 1. Pri tem  $R$  predstavlja spremenljivo breme.



S1.1: Idealni model sončne celice

Algebraski zapis matematičnega modela vseeno ni tako enostaven, kajti sestavljajo ga členi, ki nastopajo v (1) za izhodni tok  $I$ . To je povsem razumljivo, kajti na tok vpliva

sprememba sončnega obsevanja, medtem ko na spremembo izhodne napetosti vpliva sprememba temperature okolice oziroma sončne celice. Poleg tega v (1) vidimo, da je sestavljena iz treh tokov, in sicer  $I_s$ ,  $I_d$  in  $I_0$ . V nadaljevanju članka bodo vsi predstavljeni podatki izvzeti iz dejanske sončne celice povzete od sončnega modula 290W/72-156m podjetja Asola.

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left( e^{\frac{qU}{AkTN_s}} - 1 \right) \quad (1)$$

Pri tem so:

- $I_s$  ... tok, ki ga dobimo zaradi obsevanja sončnih žarkov [A],
- $I_0$  ... povratni tok diode [A],
- $q$  ... električni naboj ( $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  As),
- $U$  ... napetost med sponkama [V],
- $A$  ... faktor idealnosti diode ( $A=1$ ),
- $k$  ... Boltzman-ova konstanta ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  J/°K),
- $N_s$  ... število zaporedno vezanih sončnih celic – predpriprava za sončni modul.

Izraz (1) za tok, ki ga dobimo zaradi obsevanja s sočnimi žarki, je sestavljen tako iz spremembe temperature kot iz jakosti obsevanja. Glede na položaj členov v (1) je odvisno, koliko vpliva sprememba temperature oziroma jakost obsevanja na vrednost toka. Kot lahko vidimo v (2) ima največji vpliv jakost obsevanja, ki se ga primerja z referenčno vrednostjo obsevanja  $G_{stc}$ . Kratkostični tokovni koeficient je običajno določen s strani proizvajalca sončne celice.

$$I_s = \left( I_{s\_stc} + K_i \Delta T \right) \frac{G}{G_{stc}} \quad (2)$$

Pri tem je:

- $I_{s\_stc}$  ... tok, ki ga dobimo s sočnim sevanjem – podatki proizvajalca ( $I_{s\_stc}=8,38$  A),
- $K_i$  ... kratkostični tokovni koeficient ( $K_i=0,034$  %/°K),
- $\Delta T$  ... sprememba temperature [°K]
- $\Delta T = T - T_{stc}$
- $T_{stc}$  ... referenčna temperatura ( $T_{stc}=25$  °C=298 °K),
- $T$  ... temperatura okolice [°K],
- $G$  ... sončno obsevanje [ $W/m^2$ ],
- $G_{stc}$  ... referenčno sončno obsevanje ( $G_{stc}=1000$  W/ $m^2$ ).

V (3) za povratni tok diode je potrebno upoštevati tudi napetost sončne celice in koeficient napetosti odprtih sponk. Pri tem je potrebno omeniti, da je povratni tok diode del celotnega toka, ki teče skozi diodo.

$$I_0 = \frac{I_{s\_stc} + K_i \Delta T}{e^{\left( \frac{q(U_{oc} + K_u \Delta T)}{AkT_{stc}} \right)} - 1} \quad (3)$$

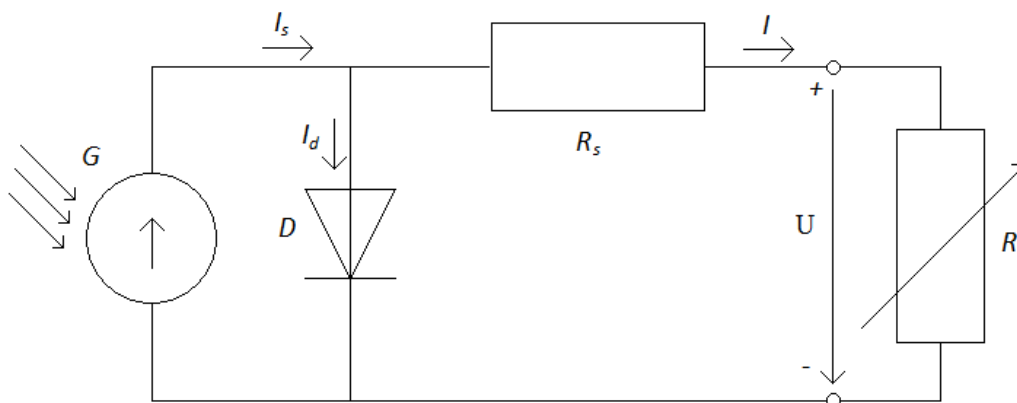
Kjer je:

- $U_{oc}$  ... napetost sončne celice ( $U_{oc}=0,6209722$  V),
- $K_u$  ... koeficient napetosti odprtih sponk ( $K_u=-0,36$  %/°K).

## 2.2 Enostavni model sončne celice

Za razliko od idealnega matematičnega modela sončne celice predstavljenega v poglavju 2.1 ima enostavni model dodano zaporedno oziroma serijsko upornost  $R_s$  z vrednostjo  $0,002 \Omega$ . Takšno vrednost smo izbrali na podlagi pregledane literature in vrednosti iz katalogov sončnih celic.

Na sliki 2 je shematsko prikazan enostavni model sončne celice.



Sl.2: Enostavni model sončne celice

Iz slike 2 vidimo, da smo s serijskim uporom v vezju spremenili sestavo napetosti. Tako se končna napetost  $U$  zmanjša za vrednost padca napetosti na upor. Slednje je potrebno upoštevati tudi v (4) za tok, ki ga dobimo na izhodu iz modela.

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left( e^{\frac{q(U + IR_s N_s)}{AkTN_s}} - 1 \right) \quad (4)$$

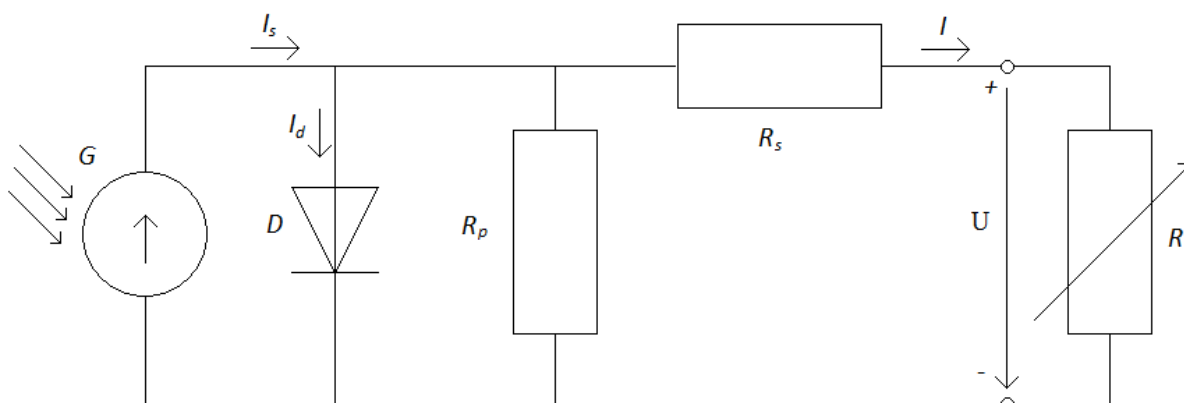
Pri tem so:

- $R_s$  ... upornost [ $R_s = 0,002 \Omega$ ],
- $U$  ... napetost sončne celice ( $U = 0,6209722 \text{ V}$ ).

## 2.3 Enodiodni model sončne celice

Enodiodni model sončne celice je po zgradbi praktično enak enostavnemu modelu, s to razliko, da je v tem primeru vzporedno z diodo dodan še upor  $R_p$ , kot je prikazano na sliki 3. Pri tem se postavi vprašanje, kaj se dogaja s tokom na diodi oziroma zaradi česa se spreminja. Tok, ki teče skozi diodo se spreminja s temperaturo sončne celice.

Na sliki 3 je shematsko prikazan enodiodni model sončne celice



Sl.3: Enodiodni model sončne celice

Iz slike 3 vidimo, da se tok razdeli še na manjše dele v primerjavi z modeloma opisanima v poglavju 2.1 in 2.2. Pri tem je dodana še ena tokovna veja v kateri je upor  $R_p$ . V (5) za skupni tok je glede na predhodno opisane modele dodan še člen v enačbi  $-I_p$ .

$$I = I_s - I_d - I_p = I_s - I_0 \left( e^{\frac{q(U + IR_s N_s)}{AKTN_s}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s N_s}{R_p N_s} \quad (5)$$

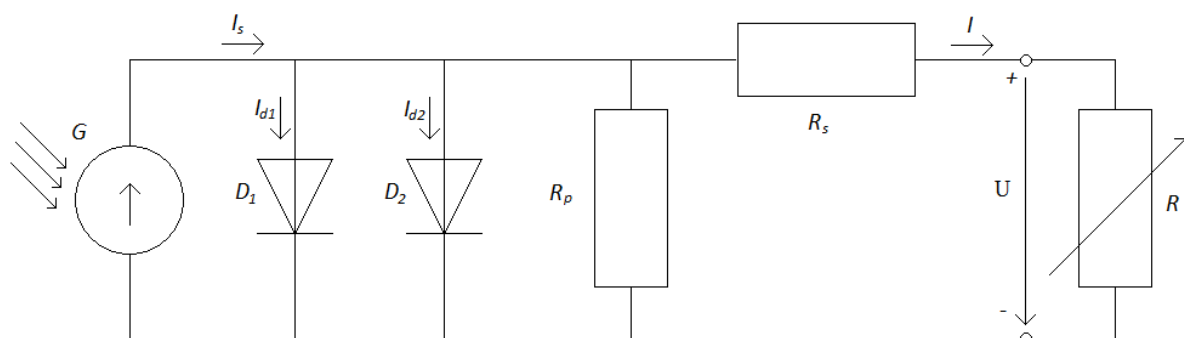
Pri tem je:

–  $R_p$  ... upornost [ $R_p = 200 \Omega$ ].

Iz (5) in narisane modela lahko sklepamo, da je napetost skozi paralelni upor  $R_p$  enaka kot napetost skozi diodo in sicer zaradi vzporedne vezave. Šele na uporu  $R_s$  pride do padca napetosti. Vrednosti za obe upornosti v modelih sončne celice smo določili na podlagi pregledane literature.

## 2.4 Dvodiodni model sončne celice

Že samo ime nam pove, da bomo imeli v matematičnem modelu sončne celice dve diodi, ki sta vezani vzporedno. Ta model je najbolj izpopolnjen izmed vseh štirih opisanih modelov, ki smo jih predstavili v članku. Električno vezje dvodiodnega modela sončne celice je prikazano na sliki 4 skupaj z izrazom za tok  $I$  (6).



Sl.4: Dvodiodni model sončne celice

$$I = I_s - I_{d1} - I_{d2} - I_p = I_s - I_{01} \left( e^{\frac{q(U+I R_s N_s)}{A_1 k T N_s}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{q(U+I R_s N_s)}{A_2 k T N_s}} - 1 \right) - \frac{U + I R_s N_s}{R_p N_s} \quad (6)$$

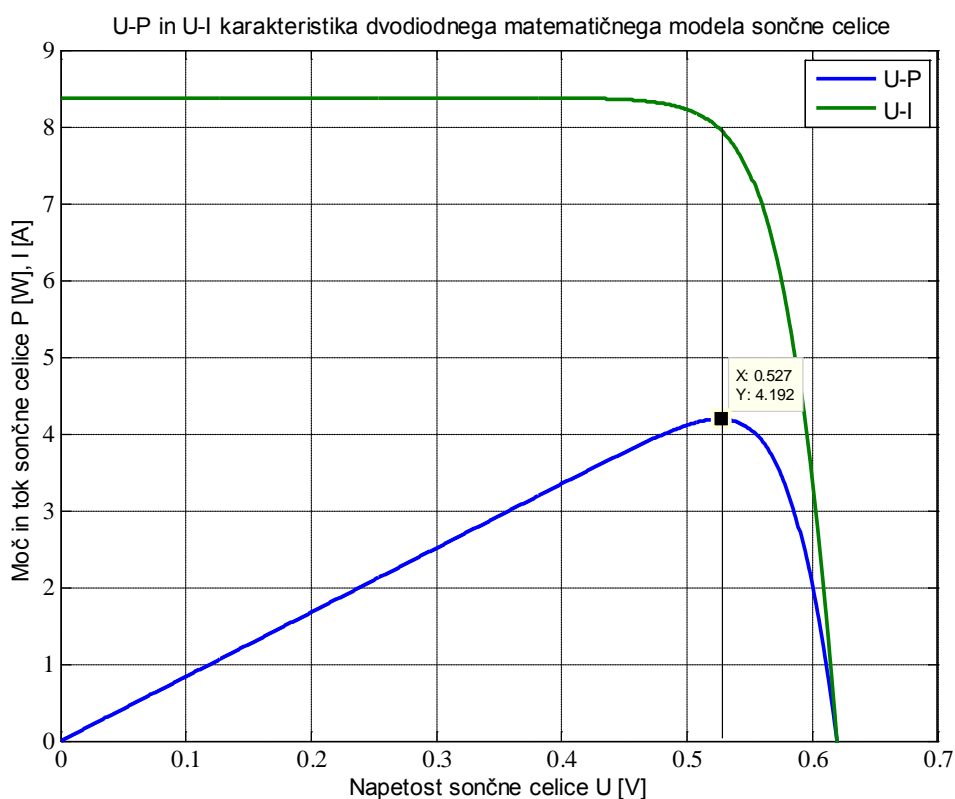
Pri tem so:

- $A_1$  ... faktor idealnosti diode ( $A_1=1$ ),
- $A_2$  ... faktor idealnosti diode ( $A_2=1,2$ ),
- $I_{01}$  ... povratni tok prve diode [A],
- $I_{02}$  ... povratni tok druge diode [A].

V (6) smo dodali še člen, ki je praktično enak členu, ki opisuje tok, ki teče skozi prvo diodo. Razlika med njima je v faktorju idealnosti. V našem primeru smo upoštevali, da faktorja idealnosti nista enaka.

### 3. REZULTATI

V nadaljevanju članka so predstavljeni rezultati dobljeni iz zgoraj predstavljenih matematičnih modelov sončne celice. Slika 5 prikazuje primer  $U-P$  in  $U-I$  karakteristik, ki smo jih naredili za vse matematične modele sončnih celic, vendar sta zaradi boljše preglednosti članka prikazani samo pri dvodioidnem matematičnem modelu. Na sliki 5 sta prikazani  $U-P$  in  $U-I$  karakteristiki dobljeni s simulacijo matematičnega modela sončne celice pri temperaturi 25 °C (298 °K) in jakosti obsevanja 1000 W/m<sup>2</sup>.



Sl. 5: Kombinacija  $U-I$  in  $U-P$  karakteristike dvodioidnega modela sončne celice

Iz slike 5 lahko vidimo, da je moč dvodiodnega modela sončne celice 4,192 W. To moč matematični model sončne celice doseže pri napetosti 0,527 V in toku 7,954 A.

### 3.1 Medsebojna primerjava matematičnih modelov in izbira modela

V tem delu bomo med seboj primerjali zgoraj opisane matematične modele sončnih celic. Po končani primerjavi in medsebojnem ovrednotenju bomo izbrali matematični model, katerega rezultati se bodo dovolj približali rezultatom dejanske sončne celice in vse to ob kratkem času simulacije.

V tabeli 1 je tabelarična in na sliki 6 grafično podana primerjava med posameznimi obravnavanimi modeli.

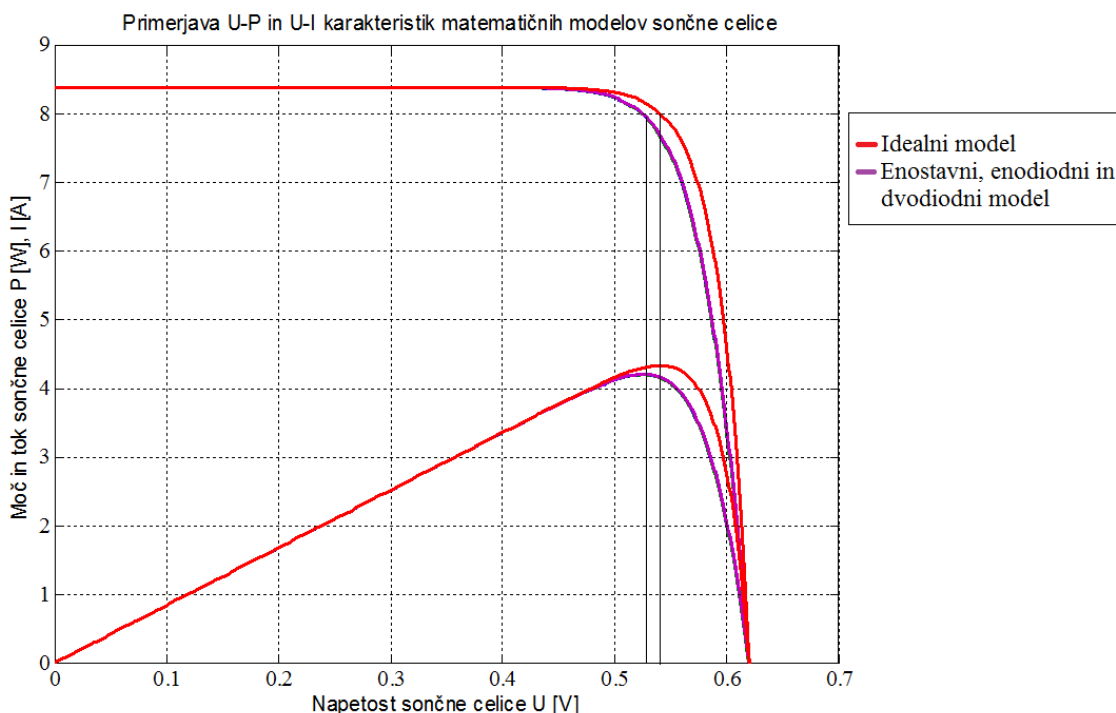
Tabela 1: Primerjava dobljenih rezultatov z matematičnimi modeli sončne celice in vrednostmi dejanske sončne elektrarne

Veličina/Model	Sončna celica* - MPP	Idealni (odstopanje)	Enostavni (odstopanje)	Enodiodni (odstopanje)	Dvodiodni (odstopanje)
Napetost [V]	0,52	0,541 (4,04 %)	0,528 (1,51 %)	0,528 (1,54 %)	0,527 (1,35 %)
Tok [A]	7,83	7,998 (2,14 %)	7,953 (1,57 %)	7,951 (1,54 %)	7,954 (1,58 %)
Moč [W]	4,028	4,327 (7,42 %)	4,199 (4,24 %)	4,198 (4,22 %)	4,192 (4,07 %)

\*Sončna celica povzeta od sončnega modula 290W/72-156m podjetja Asola.

V tabeli 1 vidimo, da samo idealni matematični model bistveno izstopa po vrednostih od preostalih treh modelov in vrednostih dejanske sončne celice. Vzrok za to je v njegovi res enostavni zgradbi oziroma sestavi. Razlika med idealnim in enostavnim modelom je ravno v serijski upornosti. Med enostavnim, enodiodnim in dvodiodnim matematičnim modelom ni bistvenih razlik v izmerjenih veličinah. Zaradi tega sklepamo, da do videne razlike med idealnim in ostalimi modeli pride predvsem zaradi razlike v padcu napetosti na upor  $R_s$ .

Slika 6 prikazuje primerjavo  $U-I$  in  $U-P$  karakteristik vseh predstavljenih matematičnih modelov sončne celice.



Sl.6: Primerjava U-I in U-P karakteristik matematičnih modelov sončnih celic

Na sliki 6 vidimo v grafični podobi prej številčno predstavljene razlike med matematičnimi modeli. Idealni model je obarvan z rdečo barvo. Razlika med preostalimi tremi matematičnimi modeli ni vidna.

#### 4. ZAKLJUČEK

V članku smo predstavili matematične modele sončne celice narejene v programskem paketu Matlab/Simulink. Pri tem smo opazili, da ima idealni matematični model sončne celice največje odstopanje v vrednostih toka in moči od dejanske sončne celice. Za izbiro optimalnega matematičnega modela sončne celice je potrebno poleg točnosti upoštevati tudi čas računanja oziroma čas simulacije. Ob predpostavki, da bi simulirali delovanje sončne elektrarne s pomočjo matematičnega modela sončne celice, ki jo sestavlja veliko število sončnih modulov, vsak pa je sestavljen iz 72 sončnih celic, bi se čas izračuna bistveno podaljšal. Pri tem na primer z uporabo dvodiodnega modela ne bi dobili sorazmerno toliko natančnejših rezultatov kot na primer pri uporabi enostavnega matematičnega modela sončne celice.



## 5. VIRI, LITERATURA

- [1] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, *Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model*, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, 2011.
- [2] S. Sheik Mohammed, *Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/Simulink*, International Journal of Chemical and Environmental Engineering, Oktober, 2011.
- [3] B. Vovčko, *Matematični model fotonapetostnega sistema v programskem orodju Matlab/Simulink*, Magistrsko delo na Fakulteti za energetiko, Krško, 2013.

## NASLOV AVTORJEV

<sup>1</sup>Boris Vovčko, mag. inž. energ.

<sup>1</sup>Bojan Vovčko, univ. dipl. inž. el.

<sup>1</sup>Aleš Štrichelj, univ. dipl. inž. tel.

<sup>2</sup>doc. dr. Sebastijan Seme

<sup>1</sup>Termoelektrarna Brestanica d.o.o.,  
Cesta prvih borcev 18, 8280 Brestanica

<sup>2</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko  
Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija

Tel: + 386 31 845 068

Elektronska pošta: [borisvovcko@gmail.com](mailto:borisvovcko@gmail.com)