

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 919

**PRORAČUN KARAKTERISTIKE  
FOTONAPONSKOG MODULA**

IVAN KONTA

Zagreb, lipanj 2009



# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Fotonaponski modul .....	2
2.1 Princip rada sunčane ćelije .....	2
2.2 Parametri sunčane ćelije .....	5
2.3 Snaga sunčane ćelije .....	10
2.4 Djelotvornost ćelije .....	11
2.5 Ovisnost parametara sunčane ćelije o temperaturi .....	12
2.5.1 Ovisnost struje o temperaturi.....	12
2.5.2 Ovisnost napona o temperaturi.....	13
2.5.3 Ovisnost snage ćelije o temperaturi.....	14
3. Modeliranje karakteristike sunčane ćelije .....	16
3.1 Simulacijski model panela.....	16
3.2 Provjera ispravnosti modela.....	19
4. Model fotonaponskog panela u programskom paketu "Matlab" .....	23
Zaključak .....	30
Literatura .....	31

# 1. Uvod

Električne karakteristike fotonaponskog modula su određene karakteristikama fotonaponskih ćelija od kojih je modul sastavljen. Karakteristike fotonaponske ćelije predstavljaju ovisnost struje i napona o iznosu Sunčeve ozračenosti te o radnoj temperaturi. Karakteristika je određena vrstom fotonaponske ćelije.

Zadatak ovoga rada jest proračunati karakteristike fotonaponskog modula na temelju podataka proizvođača u ovisnosti o Sunčevoj ozračenosti i temperaturi.

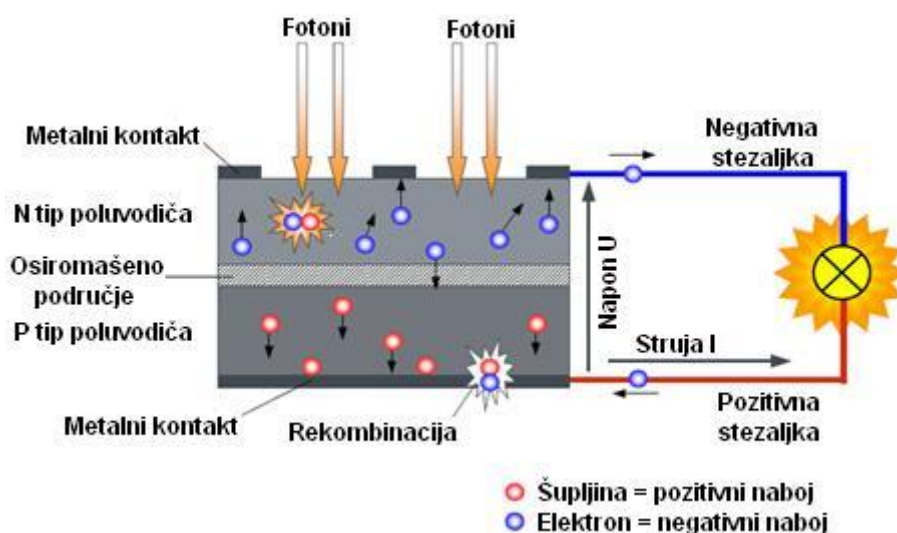
Postoji više načina na koje je moguće riješiti ovaj zadatak. Jedan od njih je taj da se odredi nadomjesna shema fotoćelije i svi potrebni parametri za proračun struje, napona i snage ćelije. Parametri će biti određeni za sve vrste panela. Nakon toga bi za bilo koji panel na temelju podataka proizvođača i poznatih parametara mogli odrediti strujno-naponsku karakteristiku za zadane vrijednosti temperature i Sunčevog zračenja.

Drugi način rješavanja ovoga zadatka svodi se na postavljanje nadomjesne sheme i određivanje pripadnih jednadžbi modula. Pomoću programskog paketa Matlab prikazano je kako za odabrani modul, čije karakteristike poznajemo, iz ulaznih podataka (napon modula, temperatura i Sunčeva ozračenost) dobiti struju fotonaponskog modula i prikazati  $I-U$  krivulju.

## 2. Fotonaponski modul

### 2.1 Princip rada sunčane ćelije

Sunčana energija izravno se pretvara u električnu u solarnim ćelijama pomoću fotonaponskog efekta. Kada fotonaponska ćelija apsorbira fotone Sunčevog zračenja, fotonaponskim efektom se na njezinim krajevima stvara elektromotorna sila i na taj način sunčana ćelija postaje izvor električne energija.



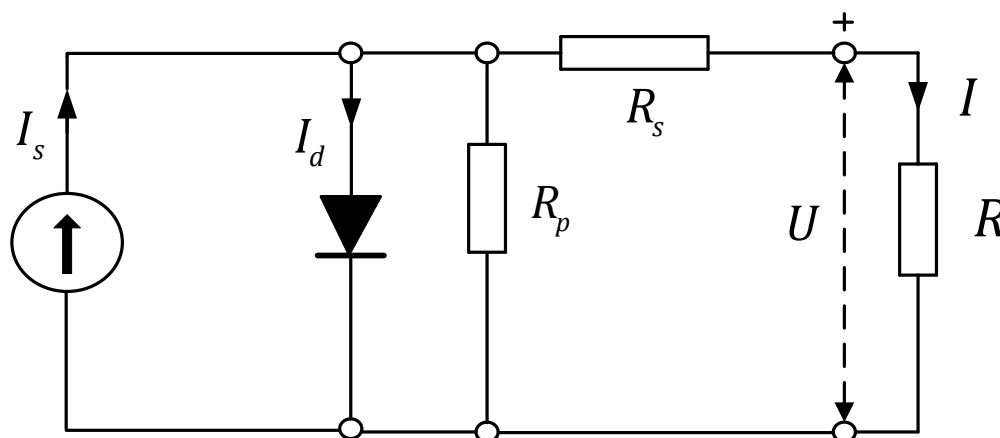
Slika 1. Fotonaponska ćelija

Sunčana ćelija (slika 1.) je PN-spoj (dioda). U silicijskoj sunčanoj ćeliji na površini pločice P-tipa silicija difundirane su primjese, npr. fosfor, tako da na tankom površinskom sloju nastane područje N-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorpcijom fotona iz Sunčeva zračenja na prednjoj strani nalazi se metalna rešetka a zadnja je strana prekrivena metalnim kontaktom. Rešetkasti kontakt na prednjoj strani ne bi trebao prelaziti više od 5% površine ćelije kako bi što manje utjecao na apsorpciju Sunčevog zračenja. Djelotvornost ćelije se povećava tako što se na prednju stranu stavljaju prozirni antirefleksijski slojevi. Monokristalne silicijske sunčane ćelije proizvode napon od 0,5-0,6 V uz gustoću

struje oko 30 mA/cm<sup>2</sup>. Da bi se dobio željeni napon odnosno snaga, ćelije se povezuju serijski ili paralelno i na taj način nastaju fotonaponski paneli.

Sunčana ćelija je izvedena tako da, kada ju osvjetlimo na njenim krajevima nastaje, elektromotorna sila. Kada se osvjetli PN-spoj apsorbirani fotoni stvaraju parove elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od PN-spoja, nastali par se ubrzo rekombinira, međutim, ako se apsorpcija dogodi unutar ili blizu PN-spoja, unutarnje električno polje koje postoji u osiromašenom području odvaja elektron i šupljinu: elektron se giba prema N-strani, a šupljina prema P-strani. Takvo grupiranje elektrona i šupljina na krajevima ćelije uzrokuje stvaranje elektromotorne sile.

Kada se osvjetli ćelija, kontakt na P-dijelu postaje pozitivan a na N-djelu negativan. Ako kontakte spojimo sa nekim vanjskim trošilom poteći će električna struja. Kada je sunčana ćelija spojena s nekim vanjskim trošilom i osvjetljena u ćeliji će zbog fotonapona nastati fotostruja  $I_s$ , te će vanjskim trošilom teći struja  $I$  jednaka razlici struje diode  $I_d$  i fotostruje  $I_s$  (slika 2.):



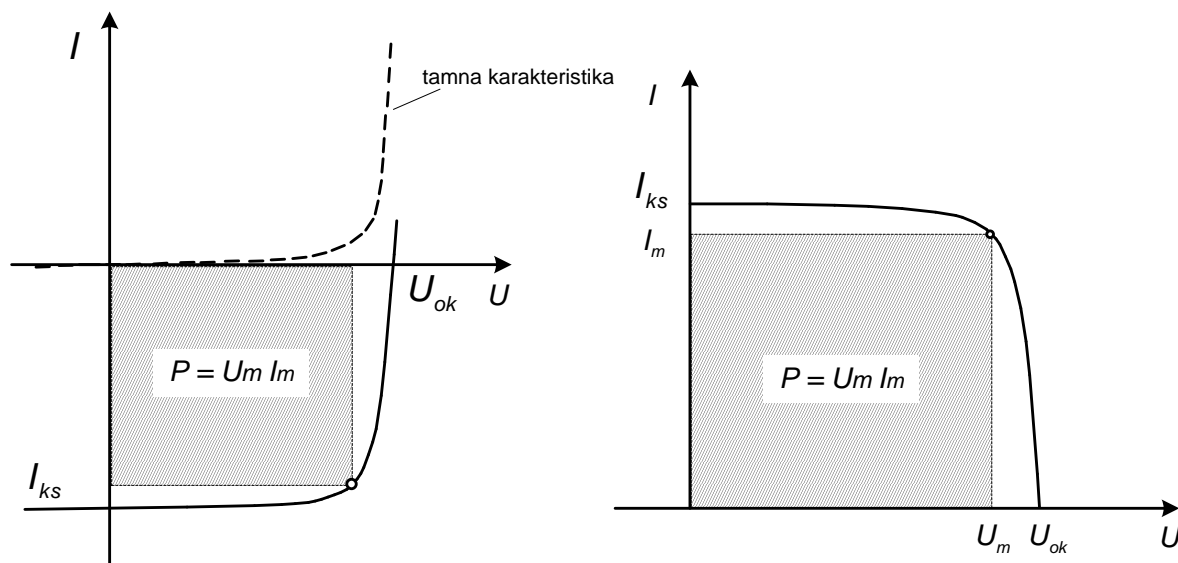
Slika 2. Nadomjesna shema sunčane ćelije

Prema [1], struja  $I$  dana je sljedećom jednačbom :

$$I = I_d - I_s = I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) - I_s \quad (1)$$

gdje je  $I_0$  struja zasićenja diode,  $e$  elementarni naboj ( $e=1.602 \times 10^{-19}$  C),  $k$  Boltzmannova konstanta ( $k=8.6217 \times 10^{-5}$  eV/K),  $T$  apsolutna temperatura i  $U$  napon diode.

Osvijetljena sunčana ćelija ponaša se kao izvor stalne struje. Izvor stalne struje paralelno je spojen s diodom. Serijski otpor  $R_s$  ovisi o materijalu i izradi sunčane ćelije i poželjno je da bude što manji. Paralelni otpor  $R_p$  ovisi o osobinama ćelije i uglavnom je dovoljno velik da ga možemo zanemariti. Na temelju tih pretpostavki dobivena je relacija za struju trošila (1).



Slika 3. a) osvijetljena i neosvijetljena  $I-U$  karakteristika , b) karakteristika u I. kvadrantu

Na slici 3. prikazana je osvijetljena i neosvijetljena  $I-U$  karakteristika sunčane ćelije. Prva je tzv. tamna karakteristika, to je karakteristika obične poluvodičke diode. Površina iscrtanog pravokutnika  $U_m I_m$  odgovara maksimalnoj snazi koju ćelija može dati. Zbog toga je najvažniji dio karakteristike u četvrtom kvadrantu, jer je to radno područje diode kada se iz nje dobiva električna energija. Najčešće se crta samo to područje, ali ne u četvrtom nego u prvom kvadrantu ( s pozitivnim vrijednostima struje). Ako  $I-U$  karakteristiku crtamo u prvom umjesto u četvrtom kvadrantu struja osvijetljene sunčane ćelije  $I_s$  je pozitivna, te struja  $I$  kroz vanjski strujni krug iznosi:

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

gdje je  $I_s$  struja koju uzrokuje upadna svjetlost, a  $I_d$  struja diode koja teče kroz spoj. Pri mjerenju  $I$ - $U$  karakteristike ćelija se spoji u seriju s promjenjivim izvorom napona i radnim otporom. Ozrači se Sunčevim zračenjem ili simulatorom Sunčeva zračenja tj. svjetiljkom čiji je spektar sličan Sunčevom. Napon promjenjivog izvora se mijenja i mjeri se napon  $U$  na ćeliji i struja  $I$  kroz ćeliju i tako dobiva  $I$ - $U$  karakteristika.

## 2.2 Parametri sunčane ćelije

Jedan od najvažnijih parametara sunčane ćelije jest napon na njenim krajevima u slučaju praznog hoda ( $I=0$ ). Kada se uvrsti  $I=0$  u jednadžbu (2) dobije se napon praznog hoda:

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right) \quad (2)$$

Napon sunčane ćelije ovisi o temperaturi, fotostruji  $I_s$  (koja raste s porastom ozračenja) i struji zasićenja  $I_0$  za koju je poželjno da bude što manja.

U uvjetima kada serijski otpor nije zanemariv dobiva se:

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right) - R_s I$$

Sljedeći važan podatak za fotonaponsku ćeliju jest struja kratkog spoja, tj. jakost struje kada je na stezaljkama ćelije napon nula. Uvrštavajući u jednadžbu (2)  $U=0$ , dobivamo da je struja kratkog spoja jednaka fotogeneriranoj struji  $I_s$ :

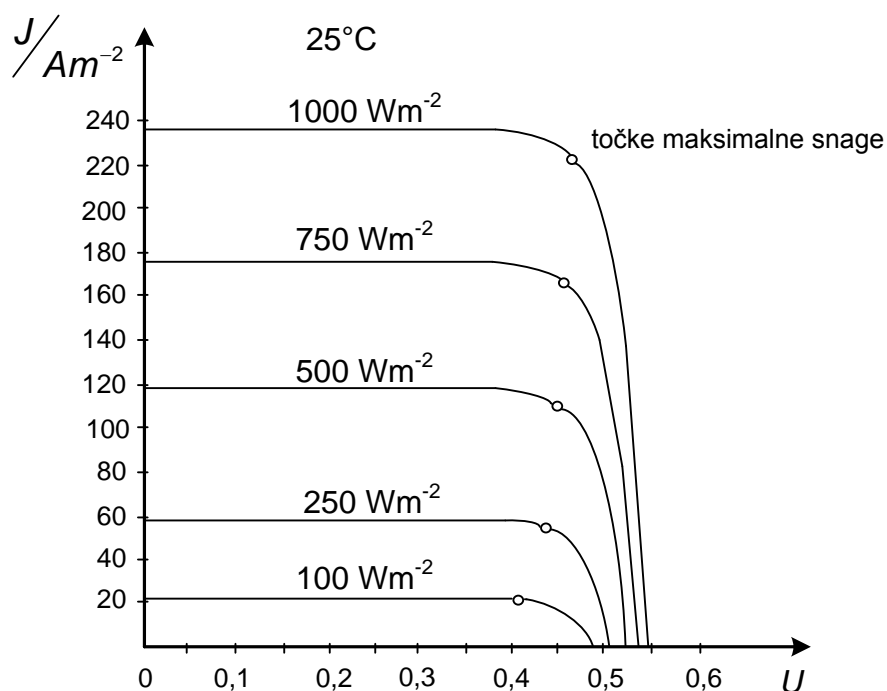
$$I_{ks} = I_s$$



Karakteristični otpor sunčane ćelije definira se omjerom:

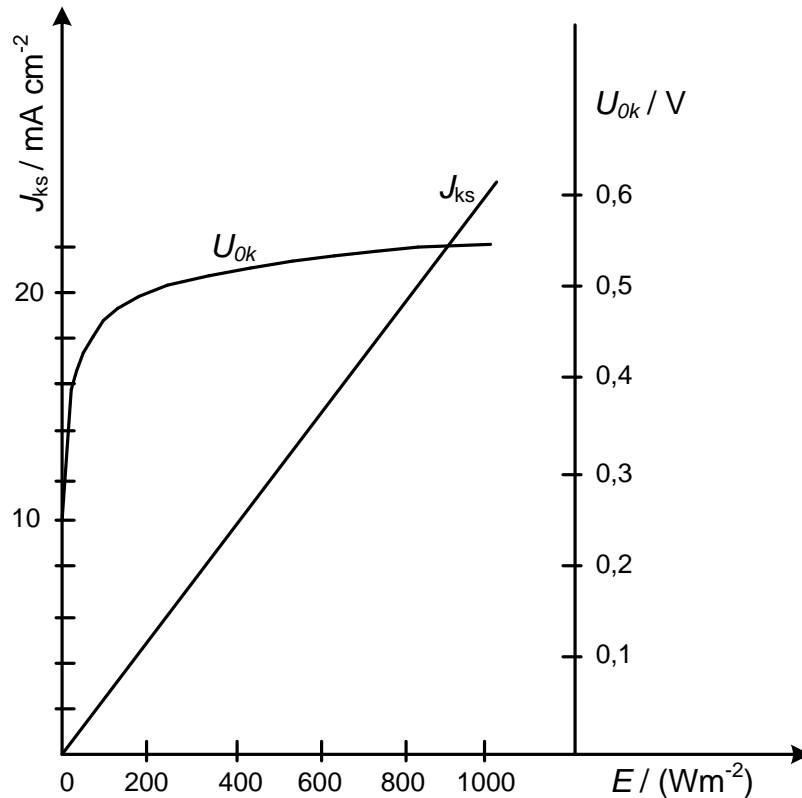
$$R_k = \frac{U_{ok}}{I_{ks}}$$

Na karakteristični otpor ćelije bitno utječe ozračenost (iradijacija). Prema [1], struja kratkog spoja praktički je linearno proporcionalna ozračenju (slika 4.)



Slika 4. Utjecaj Sunčeva zračenja na  $I$ - $U$  karakteristiku ćelije

Napon praznog hoda  $U_{ok}$  mijenja se logaritamski s ozračenjem (slika 5.) Smanji li se ozračenje dva puta i struja kratkog spoja će se smanjiti dva puta, a napon praznog hoda oko 5%.



**Slika 5. Utjecaj Sunčevog zračenja na napon praznog hoda i struju kratkog spoja**

Svaka ćelija ima određeni serijski i paralelni otpor i on se u preciznim proračunima ne smije zanemariti. Serijski otpor ćelije  $R_s$  je omski otpor na koji nailazi struja koja teče kroz ćeliju te kroz površinu ćelije prema omskim kontaktima do spoja s priključkom na vanjski krug. Njemu pridonose otpor materija i otpor kontakata. Umnožak serijskog otpora i površine ćelije reda je  $0,0025 \Omega\text{m}^2$  za tipične sunčane ćelije.

Paralelni otpor  $R_p$  uzrokovan je lokalnim defektima u PN-spoju. Za idealnu ćeliju on bi bio beskonačan, međutim, kod svake realne ćelije struje gubitaka proporcionalne su naponu na ćeliji. Zbog toga se u nadomjesnoj shemi ćelije struje gubitaka prikazuju paralelnim otporom.

Paralelni i serijski otpor utječu na  $I$ - $U$  karakteristiku ćelije i njenu snagu. Taj utjecaj se može zanemariti jedino ako je serijski otpor  $R_s$  mnogo puta manji od karakterističnog otpora ćelije  $R_s \ll R_k$ .

U modelu stvarne sunčane ćelije potrebno je uzeti u obzir i serijski i paralelni otpor. Tada jednadžba stvarne ćelije glasi:

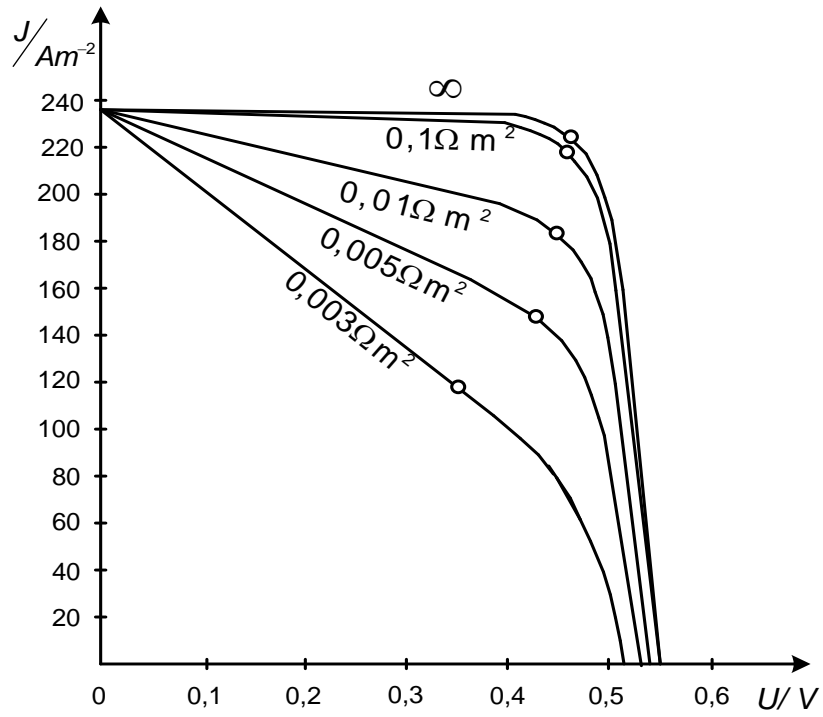
$$I = I_s - I_0 \left( \exp \left( \frac{e(U + IR_s)}{mkT} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

odnosno:

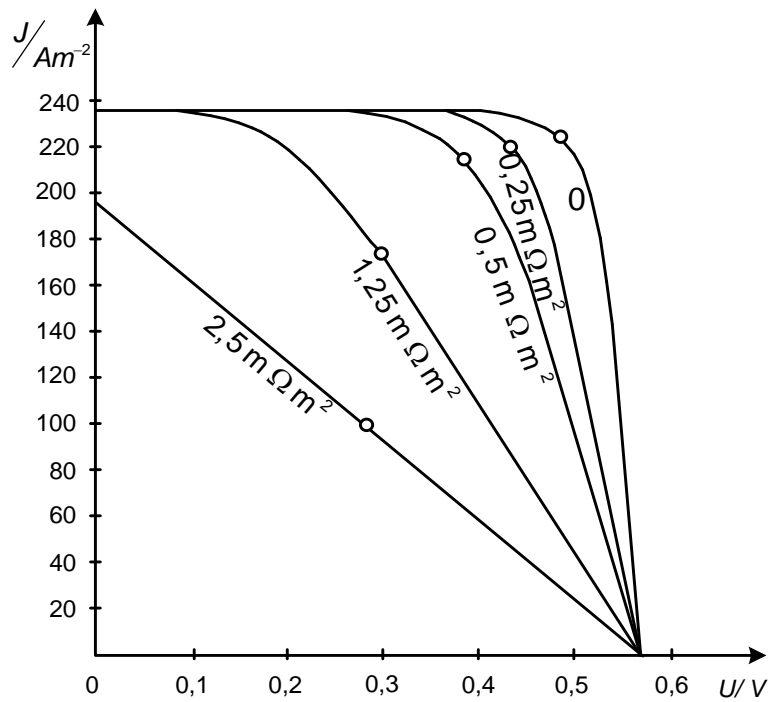
$$I = I_s - AT^\gamma \left( \exp \left( \frac{e(U + IR_s) - E_g}{mkT} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

gdje je  $U$  napon ćelije,  $I$  struja kroz ćeliju,  $E_g$  energijska širina zabranjene vrpce,  $A$  konstanta karakteristična za određenu diodu, parametar  $m$  obično ima vrijednost 1, a parametar  $\gamma=3$ .

Na slikama 6. i 7. ([1]) prikazan je pojedinačno utjecaj serijskog i paralelnog otpora na  $I$ - $U$  karakteristiku ćelije.



Slika 6. Utjecaj paralelnog otpora ćelije na njenu karakteristiku



Slika 7. Utjecaj serijskog otpora ćelije na njenu karakteristiku

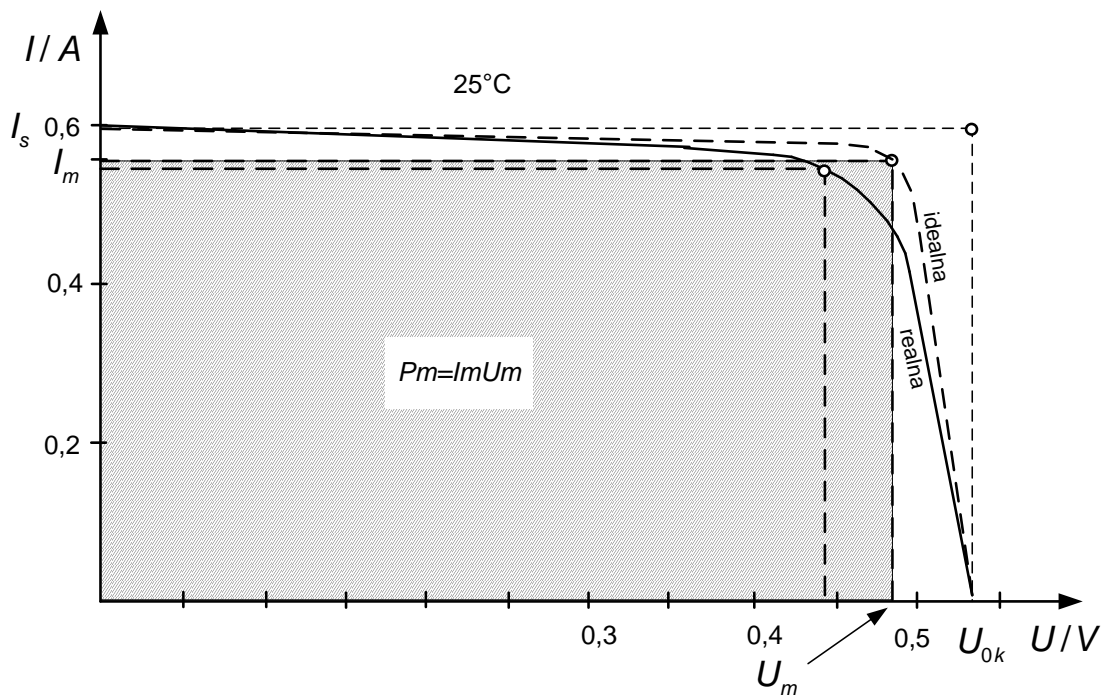
## 2.3 Snaga sunčane ćelije

Snaga sunčane ćelije dobiva se množenjem struje i napona:

$$P = UI = U(I_s - I_0 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) + I_0) \quad (3)$$

Maksimalna snaga koju idealna ćelija može dati ( $P_m = I_m U_m$ ) prikazana je na slici 8. i odgovara površini iscrtanog pravokutnika. Računski se maksimalna snaga može odrediti traženjem ekstrema funkcije (3).

Za napone manje od  $U_m$  struja je veća od  $I_m$ , ali je umnožak  $UI$ , zbog manjeg pada napona, manji od maksimalne snage. Za napone veće od  $U_m$  struja opada prema nuli pa se smanjuje i snaga  $UI$ .



Slika 8. Maksimalna snaga realne i idealne ćelije

Maksimalna snaga sunčane ćelije može se prikazati i pomoću struje kratkog spoja i elektromotorne sile:

$$P_m = U_m I_m = U_{ok} I_{ks} F$$

gdje je

$$F = \frac{U_m I_m}{U_{ok} I_{ks}}$$

tzv. faktor punjenja. To je omjer površine pravokutnika sa stranicama  $U_m$  i  $I_m$  pravokutnika sa stranicama  $U_{ok}$  i  $I_{ks}$  (slika 8.). On pokazuje koliko se stvarna ćelija približava idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije. Obično vrijedi  $0,7 < F < 0,9$ . Faktor punjenja opada linearno s omjerom  $R_s/R_k$  i  $R_k/R_p$ , gdje je  $R_s$  serijski,  $R_p$  paralelni i  $R_k$  karakteristični otpor sunčane ćelije.

## 2.4 Djelotvornost ćelije

Djelotvornost ćelije definira se kao omjer maksimalne snage ćelije  $P_m$  i snage Sunčevog zračenja  $P_u$  koje upada na njenu površinu  $A$ :

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{EA} = \frac{U_m I_m}{EA}$$

$$\eta = F \frac{U_{ok} J_{ks}}{E}$$

gdje je  $E$  ozračenje ( $W/m^2$ ),  $U_{ok}$  napon otvorenog kruga,  $J_{ks}$  gustoća struje kratkog spoja i  $F$  faktor punjenja.

Da bi djelotvornost bila što veća potrebno je da  $J_{ks}$  bude što veći i faktor punjenja što bliži jedinici. Npr. za silicijske solarne ćelije:  $F \approx 0,82$ ,  $\eta = 10\%$ .

Maksimalna teorijska vrijednost za fotostruju iznosi oko  $40 \text{ mA/cm}^2$  pri ozračenosti  $1 \text{ kW/m}^2$ , što bi za napon otvorenog kruga od  $0,6 \text{ V}$  i maksimalni teorijski faktor punjenja  $0,88$  dalo djelotvornost od  $21\%$ , a to je maksimalna teorijska djelotvornost silicijeve sunčane ćelije.

## 2.5 Ovisnost parametara sunčane ćelije o temperaturi

Promjenom temperature mijenjaju se i karakteristike sunčane ćelije. Za proračun karakteristike ćelije posebno je bitno poznavati kako temperatura utječe na sljedeće parametre: struja kratkog spoja  $I_{ks}$ , struja zasićenja  $I_0$ , struja ćelije  $I$ , napon otvorenog kruga  $U_{ok}$ , maksimalnu snagu  $P_m$ , faktor punjenja  $F$  i djelotvornost ćelije  $\eta$ .

### 2.5.1 Ovisnost struje o temperaturi

Promjena fotostruje  $I_s$ , odnosno struje kratkog spoja  $I_{ks}$  (za  $U=0$ ,  $I_s=I_{ks}$ ) s temperaturom je mala i često se može zanemariti. Npr. maksimalna teorijska vrijednost gustoće fotostruje u silicijevoj ćeliji je oko  $40 \text{ mA/cm}^2$ , stvarne vrijednosti su oko  $30 \text{ mA/cm}^2$ , a promjena s temperaturom  $dI/dT \approx 0,025 \text{ mAcm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , odnosno relativna promjena:

$$\frac{dI/dT}{I} = 8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

Utjecaj temperature na struju zasićenja  $I_0$  prikazan je jednadžbom:

$$I_0 = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (4)$$

iz koje vidimo da je ovisnost eksponencijalna i da  $I_0$  bitno ovisi o temperaturi ( $A$  je konstanta ovisna o materijalu ćelije).

## 2.5.2 Ovisnost napona o temperaturi

Iz jednadžbe sunčane ćelije:

$$I = I_s - I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right)$$

Uvrstivši  $I=0$ ,  $I_s=I_{ks}$ ,  $U=U_{ok}$  te izraz (4) za  $I_0$  i zanemarujući jedinicu u usporedbi s eksponencijalnim članom dobivamo:

$$I_{ks} = AT^3 \exp\left(\frac{eU_{ok} - E_g}{kT}\right)$$

Deriviramo li tu jednadžbu po temperaturi i zanemarimo promjenu struje kratkog spoja s temperaturom, dobivamo:

$$\frac{dU_{ok}}{dT} = \frac{eU_{ok} - E_g}{eT} - \frac{3k}{e}$$

Integriranjem te jednadžbe (u granicama od  $T_1$  do  $T_2$ ), dobivamo ovisnost napona otvorenog kruga o temperaturi.

$$U_{ok}(T_2) = U_{ok}(T_1) \frac{T_2}{T_1} + \frac{E_g}{e} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) - \frac{3k}{e} T_1 \ln \frac{T_2}{T_1}$$



### 2.5.3 Ovisnost snage ćelije o temperaturi

Maksimalna snaga sunčane ćelije dana je izrazom:

$$P_m = U_m I_m$$

Deriviranjem gornjeg izraza po temperaturi uz zanemarenje promjene struje  $I_m$  s temperaturom, dobivamo:

$$\frac{dP_m}{dT} = I_m \frac{dU_m}{dT}$$

odnosno :

$$\frac{\frac{dP_m}{dT}}{P_m} = \frac{\frac{dU_m}{dT}}{U_m} = \frac{1}{T} - \frac{E_g}{eU_m T} - \frac{3k}{eU_m} = \beta$$

Pretpostavimo li da je umnožak  $\beta P_m$  približno konstantan, ovisnost snage o temperaturi može se pisati:

$$P_m(T_2) = P_m(T_1) [1 + \beta(T_2 - T_1)].$$

Djelotvornost ćelije dana je izrazom:

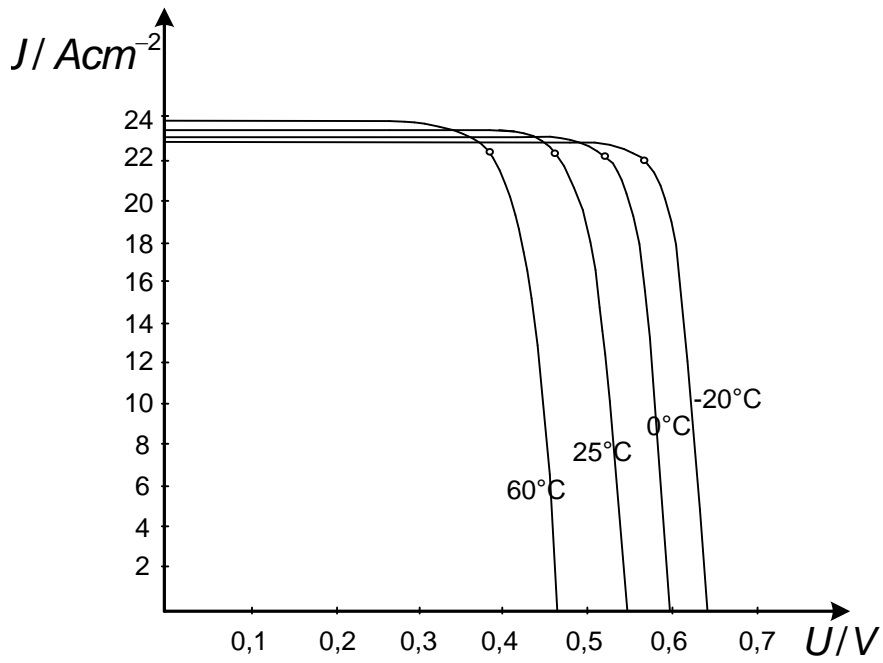
$$\eta = \frac{I_m U_m}{EA} = \frac{P_m}{EA}$$

Iz toga proizlazi ovisnost djelotvornosti o temperaturi:

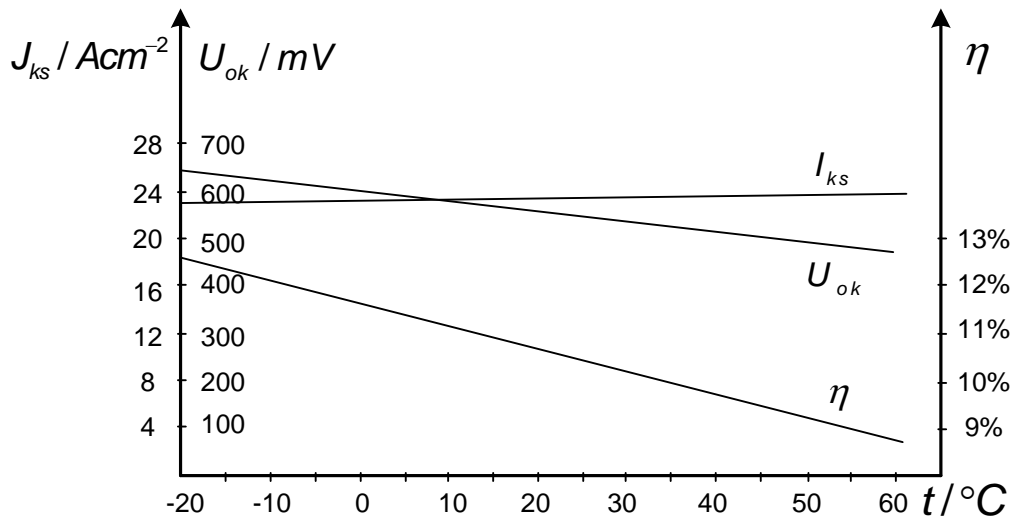
$$\frac{\frac{d\eta}{dT}}{\eta} = \frac{\frac{dP_m}{dT}}{P_m} = \beta$$
$$\eta(T_2) = \eta(T_1) [1 + \beta(T_2 - T_1)]$$

Na slikama 9. i 10. ([1]) prikazani su utjecaji temperature na karakteristike silicijeve ćelije.

Iz slika se lako može zaključiti da se s povećanjem radne temperature smanjuje napon praznog hoda, neznatno povećava struja kratkog spoja i značajno opada djelotvornost ćelije.



Slika 9. Utjecaj radne temperature ćelije na njenu I-U karakteristiku



Slika 10. Ovisnost napona otvorenog kruga, struje kratkog spoja i djelotvornosti o temperaturi

### 3. Modeliranje karakteristike sunčane ćelije

Mnogo godina se u laboratorijima širom svijeta vrše mjerenja i standardiziraju metode procjene izlaznih karakteristika fotonaponskih panela. Metoda koja će ovdje biti prikazana [2] razvijena je s ciljem određivanja karakteristika fotonaponskog modula za sve operacijske uvjete u kojima se može naći tipični fotonaponski model. Metoda je bazirana na procjeni već poznate  $I-U$  karakteristike modula i novom izrazu za maksimalnu snagu.

Standardna simulacija fotonaponskog modela [3] za proračun maksimalne snage u operacijskim uvjetima koristi sljedeću relaciju:

$$P = \frac{G}{G_{ref}} P_{ref} [1 + \gamma(T - T_{ref})] \quad (5)$$

gdje je  $G$  ozračenost (referentna ozračenost  $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ ),  $P$  snaga panela ( $P_{ref}$  referentna snaga panela),  $T$  temperatura panela ( $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ ), a  $\gamma$  korekcijski faktor snage za temperaturu. Iskustva pokazuju da ovaj izraz nije dovoljno precizan u svim testiranim uvjetima. Zbog toga se javila potreba za još preciznijom metodom proračuna karakteristike panela.

#### 3.1 Simulacijski model panela

Metoda koja će biti ovdje predstavljena pretpostavlja da je  $I-U$  karakteristika osunčanog panela dobro opisana superpozicijom tamne  $I-U$  karakteristike i napona neovisnog o fotogeneriranoj struji. Ekvivalentni krug koji ćemo koristiti za analizu sunčane ćelije predstavljen je slikom 11. Model prikazan slikom uključuje serijski i paralelni otpor zajedno s fotogeneriranom strujom. Serijske i paralelne otpore podrazumijevamo kao parazitne elemente kruga. Oni se pojavljuju kod realne ćelije zbog njenih tehničkih ograničenja.

Budući da, sve ćelije unutar panela nisu potpuno identične, složeno je dovesti u vezu  $I-U$  karakteristiku ćelije s cijelim panelom. Nadalje, pretpostavljamo da je intenzitet ćelije (struja) dobiven tako što je intenzitet panela podijeljen s brojem

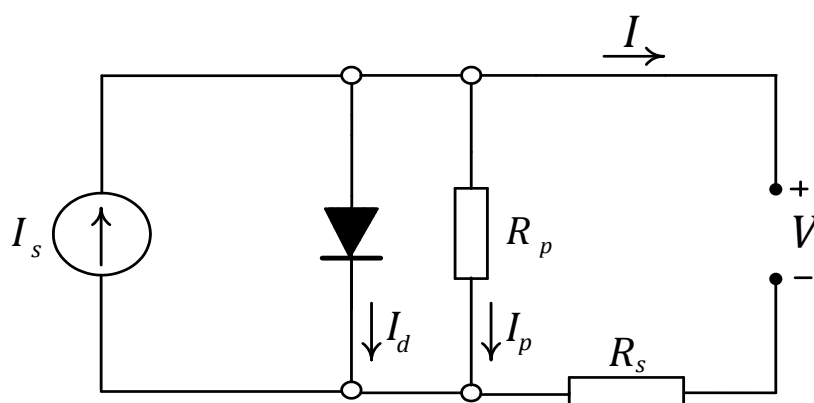
ćelija povezanih u paralelu, a napon ćelije je dobiven dijeljenjem napona modula s brojem ćelija povezanih u seriju. Zbog toga, struju  $I$  osunčane solarne ćelije moguće izraziti sljedećom relacijom:

$$I = I_s - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{n V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (6)$$

gdje je  $I_0$  struja zasićenja diode,  $n$  emisijski faktor koji prima vrijednosti između 1 i 2,  $V$  napon ćelije,  $V_T$  termički napon (naponski ekvivalent temperature) definiran izrazom:

$$V_T = \frac{kT}{e}$$

gdje je  $k$  Boltzmannova konstanta ( $k=8.62 \times 10^{-5}$  eV/K),  $T$  apsolutna temperatura i  $e$  elementarni naboj ( $e=1,6 \times 10^{-19}$  C). Izrazom (6) definirali smo pet-parametarski model:  $I_s$ ,  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$  i  $R_p$ .



Slika 11. Ekvivalentni krug za fotonaponsku ćeliju

Kako nam je cilj dobiti model kod kojega će varijable biti samo Sunčeva ozračenost i temperatura, potrebno je u izraz (14) uvesti ovisnost pojedinih veličina o tim varijablama. Neke od veličina mijenjaju se eksponencijalno s temperaturom, a neke linearno. Fotostruja  $I_s$  raste polako s temperaturom i može

se uzeti da je proporcionalna ozračenju  $G$ :  $I_s \propto G$  ( $\alpha$  koeficijent proporcionalnosti). Ovisnost struje zasićenja  $I_0$  o temperaturi aproksimira se sljedećom relacijom:

$$I_0(T) = I_{00} T^3 \exp\left(\frac{-E_{G0}}{kT}\right)$$

gdje su  $I_{00}$  i  $E_{G0}$  (energijska širina zabranjene vrpce pri 0K, za Si iznosi 1.2eV) veličine neovisne o temperaturi.

Definiramo li napon diode  $V_1 = V + R_s I$  (slika 11.) i  $T_1 = E_{G0}/k$ , struju fotonaponske ćelije u proizvoljnim uvjetima možemo izraziti:

$$I = C_1 G + C_2 T^3 \exp\left(\frac{-T_1}{T}\right) \left[ \exp\left(\frac{V_1}{nV_T}\right) - 1 \right] + C_3 V_1 \quad (7)$$

Jednadžba (7) je osnovni matematički izraz u ovoj metodi koji se koristi za proračun  $I$ - $U$  karakteristike. Da bi se jednadžba (7) podesila prema eksperimentalnim podacima, u primjeni nelinearne multivarijabilne regresije, koriste se prva rješenja za serijski otpor i emisijski faktor. Prva rješenja za serijski otpor i emisijski faktor računaju se iz linearne veze između  $(dV/dI)$  i recipročne vrijednosti struje kratkog spoja:

$$-\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} = R_s + \frac{nV_T}{I_{ks}}$$

Nakon što odredimo koeficijente  $C_1$ ,  $C_2$  i  $C_3$ , serijski otpor i emisijski faktor numerički namještamo tako da postignemo koeficijente koji se slažu s eksperimentalnim podacima. Postupak se ponavlja sve dok se ne ostvari konvergencija parametara. Korištenjem različitih temperaturnih i iradijacijskih razina proračunat je skup podataka za maksimalnu snagu panela  $P_m$ . Sljedećom jednadžbom moguće je odrediti maksimalnu snagu panela u operacijskim uvjetima poznajući parametre  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  i  $m$ :

$$P_m = D_1 G + D_2 T + D_3 [\ln(G)]^m + D_4 T [\ln(G)]^m \quad (8)$$

Ova jednadžba predstavlja poboljšanje u odnosu na jednadžbu (5).

## 3.2 Provjera ispravnosti modela

Eksperimentalni podaci za dobivanje parametara za gore navedene izraze dobiveni su mjerenjem i pohranjivanjem 25 točaka  $I-U$  krivulje unutar svakih 10 minuta ([2]). Pri tome je korišten promjenjivi elektronički teret priključen na panel.

Pored karakteristika samoga panela mjerene su i meteorološke prilike na mjestu testiranja: direktno i raspršeno zračenje, relativna vlažnost, temperatura i brzina vjetra. Testiranja su vršena na polikristalnom silicijskom, amorfnom silicijskom i SiGe panelu u vanjskim uvjetima. Ostali tipovi panela: monokristalni silicijski, CdS i dr. testirani su u unutarnjim uvjetima u laboratorijima pomoću solarnih simulatora. Mjerenja su rađena tijekom sedam dana s promjenom iradijacije od 0 do  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ .

U prvom koraku potrebno je podesiti izraz (7) prema izmjerenim podacima za struju i napon. Parametri izvedeni iz jednadžbe (7) uz pomoć regresijske metode navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Parametri modela za proračun struje panela

	monokristalni Si	polikristalni Si	a-Si/a-Si:Ge	CdS/Cu(Ga,In)(S,Se)
$C_1$	0.0008372	0.0006812	$9.9517 \times 10^{-5}$	$6.8812 \times 10^{-5}$
$C_2$	-13.4603	-87.5593	$-3.6322 \times 10^{-5}$	-0.5970
$C_3$	-0.5027	-0.0652	-0.002747	-0.006688
$R_s$	0.0474	0.0730	1.9716	1.7046
$n$	1.035	1.083	3.56	1.76
$T_1(K)$	12963.4	12963.4	5266.1	11719.1
$r^2$	0.9994	0.9960	0.9606	0.9936

Unatoč velikom rasponu temperature (10-70 °C) i ozračenosti (0-1000Wm<sup>-2</sup>), jednadžba (7) se vrlo dobro slaže s eksperimentalnim rezultatima. Koeficijenti podudarnosti  $r^2$  za većinu tehnologija su veći od 0.99 što govori o velikoj preciznosti metode. Najniža vrijednost ovoga koeficijenta je kod amornog silicija, oko 0.96. Razlog tomu su povećani gubici topline i rekombinacijski gubici u unutarnjim slojevima amornog silicija. Stoga bi se za ovu tehnologiju izraz (7) trebao usavršiti.

U tablici 2. prikazani su parametri potrebni za podešavanje jednadžbe (8) i dobivanje snage panela u različitim operacijskim uvjetima (različite temperature i ozračenosti). Korekcijski faktor za temperaturu  $\gamma$  iz jednadžbe (5) dan je u tablici 3.

Tablica 2. Parametri potrebni za proračun maksimalne snage

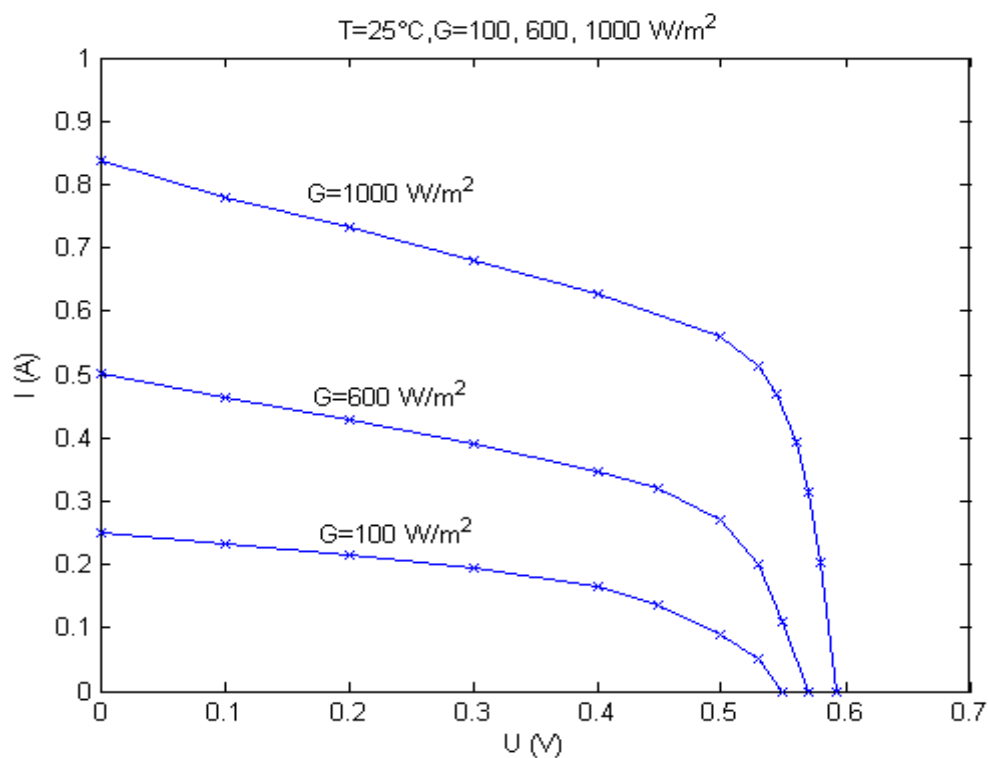
	monokristalni Si	polikristalni Si	a-Si/a-Si:Ge	CdS/Cu(Ga,In)(S,Se)
$D_1$	-0.002105	0.000554	0.000177	-0.001179
$D_2$	$4.791 \times 10^{-4}$	$-7.275 \times 10^{-5}$	$-3.238 \times 10^{-5}$	$8.103 \times 10^{-5}$
$D_3$	$2.024 \times 10^{-8}$	$2.242 \times 10^{-5}$	$1.569 \times 10^{-5}$	$5.740 \times 10^{-6}$
$D_4$	$-2.212 \times 10^{-11}$	$-4.763 \times 10^{-8}$	$-3.952 \times 10^{-8}$	$-7.735 \times 10^{-9}$
$m$	10.6793	7.0306	6.3762	6.9889
$r^2$	0.9991	0.9999	0.9998	0.9998

U tablici 3. uspoređeni su preko srednje kvadratne pogreške (RMS) standardni način proračuna maksimalne snage ćelije (5) i novi način (8). Rezultati pokazuju manju srednju kvadratnu pogrešku kod nove metode proračuna ( $RMS_{pro}$ ). Veće se pogreške javljaju pri manjim razinama Sunčeve ozračenosti.

Tablica 3. Usporedba standardne i nove metode proračuna maksimalne snage ćelije

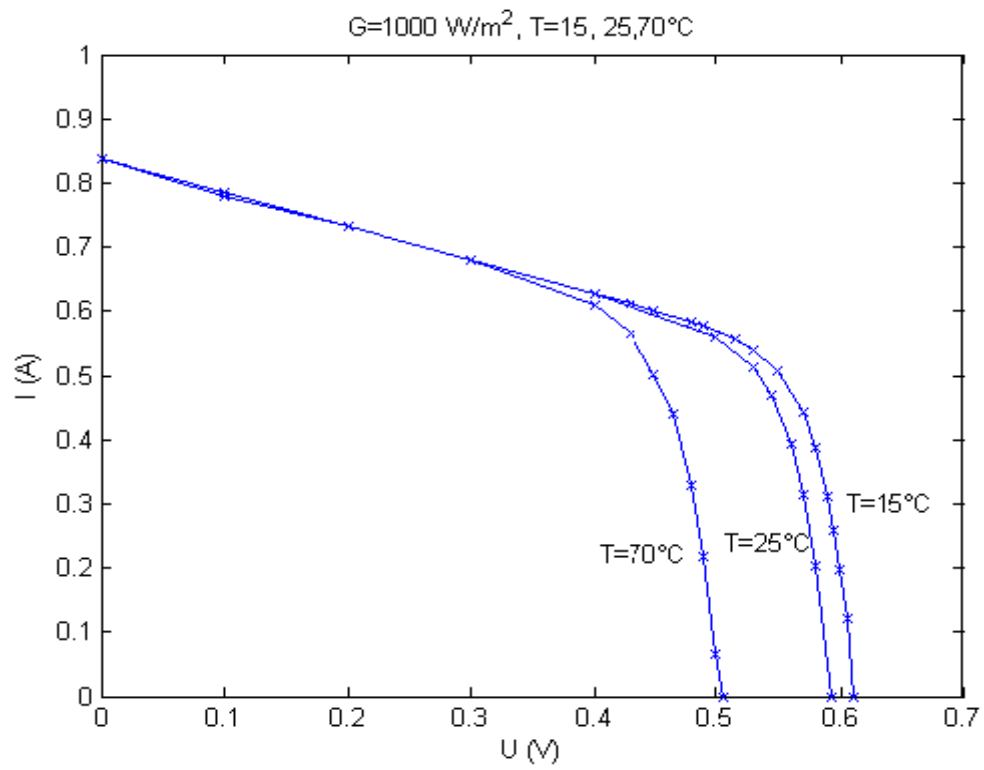
	monokristalni Si	polikristalni Si	a-Si/a-Si:Ge	CdS/Cu(Ga,In)(S,Se)
$P_{ref}$ (W)	65.2	14.0	10.0	40.0
$\gamma$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	-0.0019	-0.0055	-0.0090	-0.0041
$RMS_{pro}$	0.095	0.013	0.004	0.005
$RNS_{std}$	1.060	0.160	0.013	0.045

Na sljedećim slikama (12.) i (13.) grafički su prikazane karakteristike testiranog polikristalnog silicijskog panela pri različitim temperaturama i razinama ozračenosti.



Slika 12. Ovisnost I-V krivulje o promjeni iradijacije





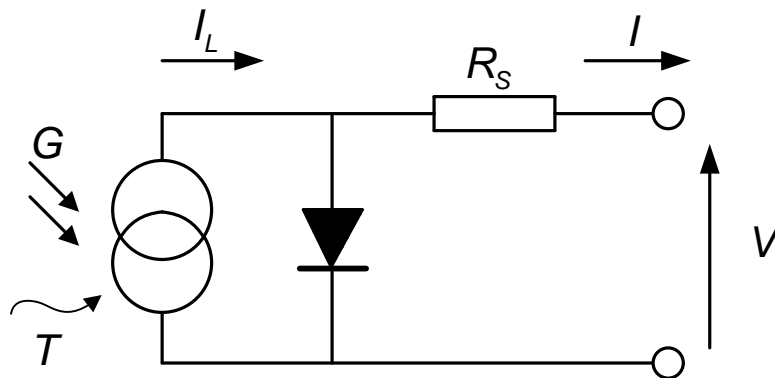
**Slika 13. Ovisnost  $I$ - $V$  krivulje o promjeni temperature**

Navedene slike su dobivene uvrštavanjem različitih razina temperatura i iradijacija u izraz (7). Pokazuju veliku podudarnost s eksperimentalnim rezultatima iz [2].

## 4. Model fotonaponskog panela u programskom paketu "Matlab"

Ovaj model [4] se temelji na Shockleyevoj jednadžbi diode. Na slici 11. prikazan je najjednostavniji nadomjesni strujni krug solarne ćelije kod kojega su strujni izvor i dioda smješteni u paralelu. Struja izvora direktno je proporcionalna Sunčevu zračenju koje pada na ćeliju.  $I$ - $V$  karakteristiku ćelije određuje dioda. Preciznost modela se povećava kada se u izraze uvedu:

- temperaturna ovisnost struje zasićenja diode  $I_0$
- temperaturna ovisnost fotonaponske struje  $I_L$
- serijski otpor  $R_S$ , koji povećava točnost  $I$ - $V$  karakteristike između točke maksimalne snage i točke napona otvorenog kruga
- paralelni otpor  $R_P$  (u paraleli s diodom)
- faktor kvalitete diode  $n$  koji se koristi kao promjenjivi parametar (umjesto da mu se pridruži fiksna vrijednost između 1 i 2) ili dvije diode (jedna s  $n=1$ , druga s  $n=2$ ) s nezavisnim strujama zasićenja



Slika 11. Strujni krug fotonaponskog modela

U ovom modelu u izraze neće biti uvršten paralelni otpor već će se njegov učinak nadomjestiti faktorom kvalitete diode. Ovdje je predstavljena pojednostavljena verzija modela s dvije diode kojeg su razvili Gow i Manning [5]. Jednadžbe koje se koriste za opis  $I$ - $V$  karakteristike:

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{e(V + IR_S)}{nkT} - 1 \right) \right) \quad (9)$$

$$I_L = I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \quad (10)$$

$$I_{L(T_1)} = I_{ks(T_1, nom)} \times \left( \frac{G}{G_{(ref)}} \right) \quad (11)$$

$$K_0 = \frac{I_{ks(T_2)} - I_{ks(T_1)}}{T_2 - T_1} \quad (12)$$

$$I_0 = I_{0(T_1)} \times \left( \frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} \times \exp \left( \frac{-eE_g}{nk} \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right) \right) \quad (13)$$

$$I_{0(T_1)} = \frac{I_{ks(T_1)}}{\exp \left( \frac{eV_{ok(T_1)}}{nkT_1} - 1 \right)} \quad (14)$$

$$R_S = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{ok}} - \frac{1}{X_V} \quad (15)$$

$$X_V = I_{0(T_1)} \times \frac{e}{nkT_1} \times \exp \left( \frac{eV_{ok(T_1)}}{nkT_1} \right) \quad (16)$$

Sve konstante iz navedenih jednadžbi moguće je odrediti iz podataka proizvođača i navedene ili izmjerene  $I$ - $U$  karakteristike. Za ilustraciju i ispitivanje točnosti ovoga modela koristit ćemo fotonaponski modul "Solarex MSX60" ([6]). Radi se o polikristalnom silicijskom panelu snage 60W. Panel čini 36 serijski povezanih ćelija. Najvažnije značajke panela prikazane su u tablici 4.

Parametri modela MSX60 modula dobiveni su pomoću gore navedenih podataka iz tablice i jednadžbi (9)-(16) pomoću Matlaba.

Fotostruja  $I_L$  je direktno proporcionalna iradijaciji  $G$ . Kada je ćelija kratko spojena, struja koja teče kroz diodu je zanemariva. Zbog toga je konstanta proporcionalnosti u izrazu (11) podešena prema struji kratkog spoja pri standardnoj iradijaciji ( $1 \text{ Sun} = 1000 \text{ Wm}^{-2}$ ). Za MSX60  $I_{L(T_1)} = 3.8 \text{ A/Sun}$  pri  $T_1 = 25^\circ \text{C}$  (298K).

Tablica 4. Glavne karakteristike panela Solarex MSX60

Temperatura	$T$	25	°C
Napon otvorenog kruga	$V_{ok}$	21.0	V
Struja kratkog spoja	$I_{ks}$	3.74	A
Napon pri maksimalnoj snazi	$V_m$	17.1	V
Struja pri maksimalnoj snazi	$I_m$	3.5	A
Maksimalna snaga	$P_m$	59.9	W

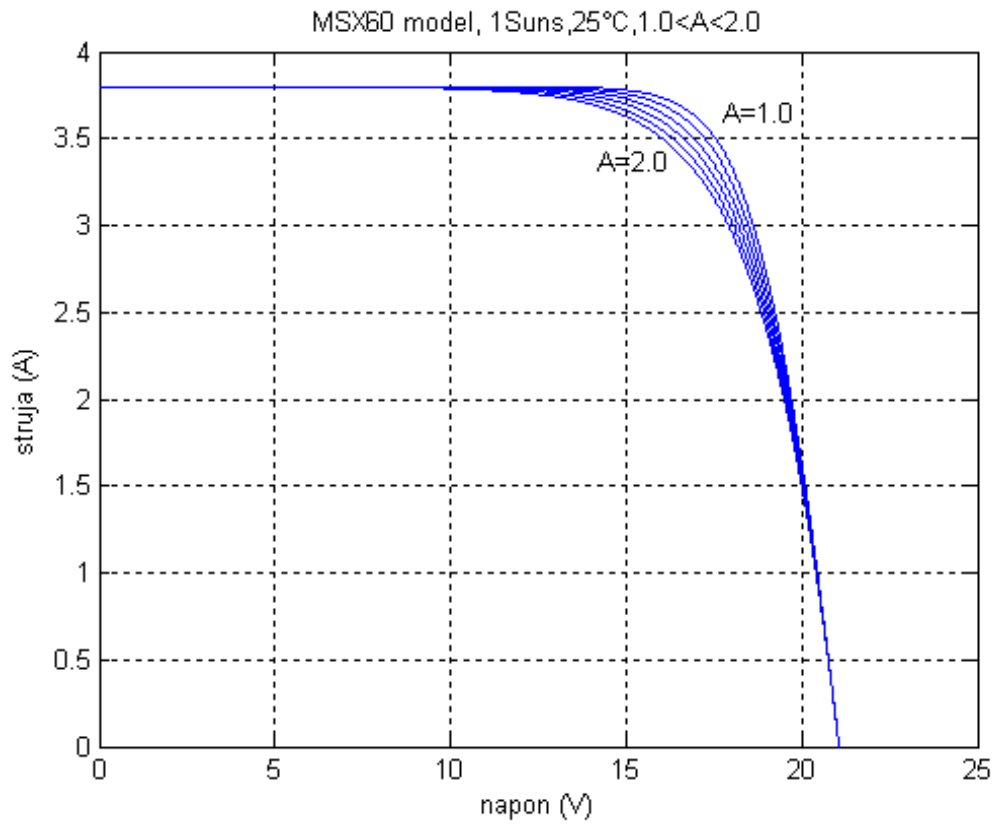
Odnos između fotostruje i temperature je linearan (jednadžba 10.) što zaključujemo iz promjene fotostruje s promjenom temperature (jednadžba 12.), pri čemu je  $K_0$  koeficijent proporcionalnosti. Za MSX60  $I_L$  se mijenja od 3.80 do 3.92 A (3%) pri promjeni temperature od 25 do 75°C.

Kada ćelija nije ozračena, odnos između napona i struje ćelije dan je Shockleyevom jednadžbom diode. Dok je ćelija ozračena i u praznom hodu, cjelokupna fotostruja teče kroz diodu.

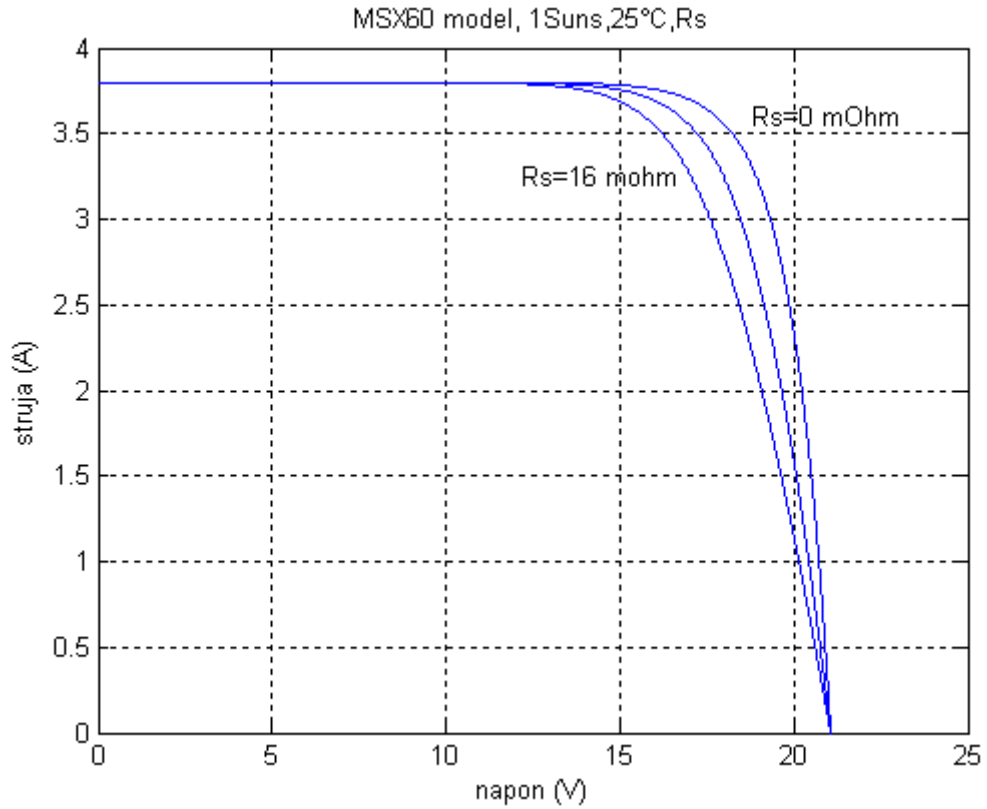
Vrijednost struje zasićenja  $I_0$  pri 25°C računa se uz pomoć napona otvorenoga kruga i struje kratkoga spoja (jednadžba 14.).

Prema Greenu [7], emisijski faktor rima vrijednosti između 1 i 2; za veće struje bliži je broju 1, a za manje struje raste prema broju 2. Za početak se predlaže vrijednost 1.3 u normalnim operacijskim uvjetima. Kasnije se, podešavanjem  $I-U$  karakteristike ovoga modela prema karakteristici koju navodi proizvođač, odredi precizniji faktor idealizacije. Utjecaj različitih faktora emisije na  $I-U$  karakteristiku modula MSX60 prikazan na slici 12. - viši faktori smanjuju koljeno krivulje.

Serijski otpor  $R_S$  ima veliki utjecaj na nagib  $I-U$  krivulje pri naponu jednakom naponu otvorenoga kruga, što se vidi na slici 13. Jednadžbe (15) i (16) su dobivene diferenciranjem jednadžbe (9) za  $V=V_{ok}$ , i izdvajanjem serijskog otpora  $R_S$ . Pomoću podataka proizvođača izračunat je serijski otpor:  $R_S=8m\Omega$ .



Slika 12. Matlab model *I-U* krivulje za različite faktore idealizacije diode



Slika 13. Matlab model *I-V* krivulje za različite vrijednosti serijskog otpora

Za proračun ovoga modela korištena je skripta msx60i.m iz [4] koja za ulaze prima napon panela, temperaturu i iradijaciju, a kao rezultat daje struju panela. Ako je ulazni napon vektor tada je i struja na izlazu vektor. Skripta se poziva sljedećom naredbom: msx60i(Va, Suns, TaC), gdje je Va napon ćelije, Suns Sunčeva ozračenost ( $1\text{ Sun}=1000\text{ W/m}^2$ ) i TaC temperatura panela u °C. Skripta ima sljedeći sadržaj:

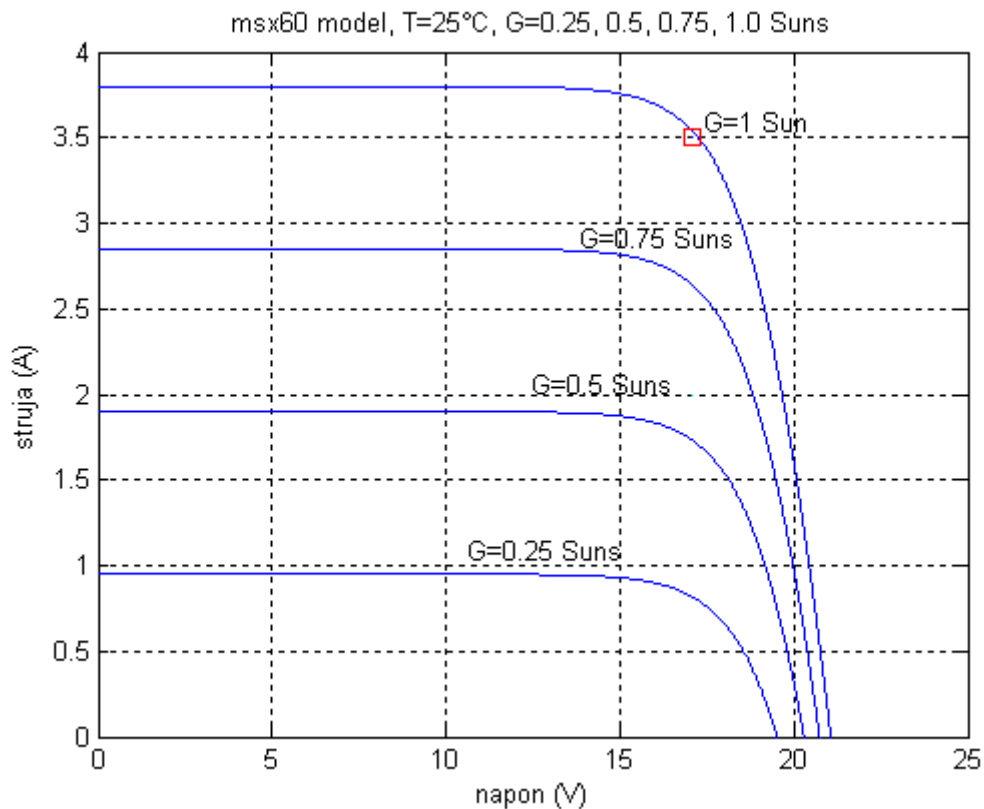
```
function Ia = msx60i( Va, Suns, TaC)
% msx60i.m model za MSX-60 solarnu ćeliju;
% struja za pripadni napon, iradijaciju i temperaturu
% Ia, Va = struja i napon ćelije
% G = iradijacija (1 Sun = 1000 W/m2)
% T = temperatura u °C
k = 1.38e-23; % Boltzmannova konstanta
q = 1.60e-19; % elementarni naboj
A = 1.2; % factor kvalitete diode
Vg = 1.12; % širina zabranjenog pojasa, 1.12eV za kristalni Si, ~1.75 za
amorfni Si
Ns = 36; % broj serijski povezanih ćelija
T1 = 273 + 25;
Voc_T1 = 21.06 /Ns; % napon otvorenog kruga po ćeliji pri temperaturi T1
Isc_T1 = 3.80; % struja kratkog spoja po ćeliji pri temperaturi T1
T2 = 273 + 75;
Voc_T2 = 17.05 /Ns; % napon otvorenog kruga pri temperaturi T2
Isc_T2 = 3.92; % struja kratkog spoja pri temperaturi T2
TaK = 273 + TaC; % radna temperatura
TrK = 273 + 25; % referentna temperatura
% kada je Va = 0, fotostruja Iph_T1 = struja kratkog spoja
% konstanta "a" se može odrediti iz odnosa Isc i T
Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;
a = (Isc_T2 - Isc_T1)/Isc_T1 * 1/(T2 - T1);
Iph = Iph_T1 * (1 + a*(TaK - T1));
Vt_T1 = k * T1 / q; % = A * kT/q
Ir_T1 = Isc_T1 / (exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2 = Isc_T2 / (exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b = Vg * q/(A*k);
Ir = Ir_T1 * (TaK/T1).^ (3/A) .* exp(-b.*(1./TaK - 1/T1));
X2v = Ir_T1/(A*Vt_T1) * exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
dVdI_Voc = - 1.15/Ns / 2; % dV/dI pri Vok po ćeliji --
% iz proizvođačevog grafa
Rs = - dVdI_Voc - 1/X2v; % serijski otpor po ćeliji
% Ia = 0:0.01:Iph;
```

```

Vt_Ta = A * 1.38e-23 * TaK / 1.60e-19; % = A * kT/q
% Ia1 = Iph - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1);
% solve for Ia: f(Ia) = Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1) = 0;
% Newton's method: Ia2 = Ia1 - f(Ia1)/f'(Ia1)
Vc = Va/Ns;
Ia = zeros(size(Vc));
% Iav = Ia;
for j=1:5;
Ia = Ia - (Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1))./ (-1 - (Ir.*(
exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1)).*Rs./Vt_Ta);
% Iav = [Iav;Ia]; % praćenje konvergencije
end

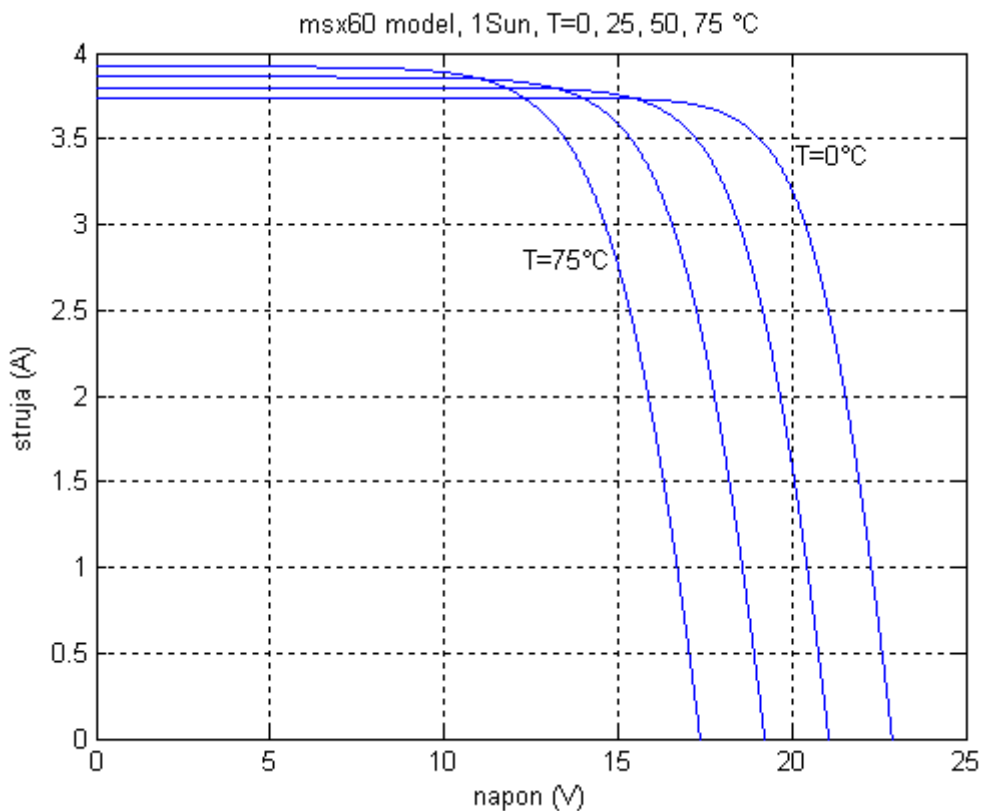
```

Uvrštavanjem serijskog otpora u jednadžbu (1) dobili smo povratnu jednadžbu za struju. Iterativnom tehnikom riješena je ova jednadžba koja konvergira samo za pozitivne vrijednosti struje. Newton-Raphson-ova metoda je brža i njenom primjenom konvergiraju i pozitivne i negativne vrijednosti struje. Uz pomoć navedene skripte dobivene su i sljedeće dvije slike.



Slika 14. Matlab model I-V krivulje za različite vrijednosti iradijacije

Na slici 14. crvenim kvadratićem označena je točka maksimalne snage panela koju navodi proizvođač i ona se podudara s Matlab modelom. Slika pokazuje kako se ponaša  $I-U$  karakteristika pri različitim razinama ozračenosti panela. Na slici 15. prikazana je promjena  $I-U$  krivulje pri promjeni temperature i standardnoj ozračenosti.



**Slika 14. Matlab model  $I-V$  krivulje za različite vrijednosti temperature**

Na ovaj način dobiveni rezultati pokazuju veliki stupanj podudarnosti sa stvarnim eksperimentalno dobivenim podacima u ([4]).



## Zaključak

U ovom radu je prezentirana metoda procjene karakteristike fotonaponskoga modula u različitim vanjskim uvjetima. Metoda je bazirana na procjeni dobro poznate  $I-U$  krivulje modula koja je blago modificirana novim izrazu za snagu. Preciznost metode je potvrđena u širokom rasponu operacijskih uvjeta. Najvažniji zaključak jest da se  $I-U$  krivulja modela slaže s eksperimentalnim rezultatima.

Glavna prednost ove metode jest ta da omogućuje korisnicima fotonaponskih modula kontrolu snage panela baziranu na mjerenjima koja mogu biti obavljena daleko od specijaliziranih laboratorija, čak i onda kada standardni uvjeti ne mogu biti ostvareni.

Uz pomoć jednadžbi nadomjesne sheme implementiranih u skriptu Matlab-a i unaprijed poznatih najvažnijih karakteristika modula moguće je vrlo precizno odrediti ponašanje modula u različitim operacijskim uvjetima. To omogućava predviđanje ponašanja fotonaponskih panela u različitim uvjetima.

## Literatura

- [1] Kulišić,P; Vuletin, J; Zulim, I: "Sunčane ćelije", Školska knjiga, Zagreb, 1994
- [2] Rosell J.I; Ibañez M : "Modelling power output in photovoltaic modules for outdoor operating conditions", *Energy Conversion and Management* 47, 2006
- [3] Menicucci D; Fernandez JP : Priručnik za PVFORM: "A photovoltaic system simulation program for stand-alone and grid-interactive applications"; Sandia National Laboratories, SAND85-0376, Albuquerque, USA, 1988.
- [4] Walker G: "Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model", *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Australia, 2001
- [5] Gow J. A; Manning C. D ; "Development of a photovoltaic array model for use in powerelectronics simulation studies," *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, March 1999.
- [6] Solarex MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules, <http://www.californiasolarcenter.org/newssh/pdfs/Solarex-MSX64.pdf> , 12.lipanj. 2009
- [7] Green M.A., "Solar Cells", University of New SouthWales, 1992.

# PRORAČUN KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKOG MODULA

## Sažetak

U prvom dijelu rad se bavi fizikalnom osnovom funkcioniranja fotonaponske ćelije. Dana je nadomjesna shema i pripadne jednadžbe solarne ćelije. Zatim su opisani najvažniji parametri sunčane ćelije i njihov utjecaj na strujno-naponsku krivulju.

Nadalje je predstavljena metoda procjene unaprijed poznate karakteristike modula u različitim operacijskim uvjetima, tj. za različite vrijednosti temperature i Sunčeve ozračenosti. Metoda je razvijena radi provjere performansi fotonaponskog modula u svim operacijskim uvjetima u kojima se tipičan model može naći.

U posljednjem dijelu rada na odabranom je modulu pomoću Matlaba demonstrirano ponašanje  $I$ - $U$  krivulje modula u različitim operacijskim uvjetima.

## Ključne riječi

fotonaponski efekt (eng. photovoltaic effect)

fotonaponski modul (eng. photovoltaic module)

$I$ - $U$  krivulja (eng.  $I$ - $V$  curve)

temperaturna ovisnost (eng. temperature dependent)

polikristalni Si (eng. multicrystal Si)

Matlab model (eng. Matlab model)

izlazna snaga (eng. power output)

simulacija (eng. simulation)

fotogenerirana struja (eng. photogenerated current)