MERJENJE *U-I* KARAKTERISTIK FOTONAPETOSTNIH MODULOV

Sebastijan SEME, Gorazd ŠTUMBERGER, Jože VORŠIČ, Aleš TOMAŽIČ

POVZETEK

Delo obravnava merjenja U-I karakteristik fotonapetostnih modulov. Merjenje U-I karakteristik fotonapetostnih modulov je določeno v standardih, ki jih pripravlja tehnični komite IEC TC 82. Ker žal nimamo na voljo tehnične opreme za merjenje U-I karakteristik fotonapetostnih modulov pri standardiziranih pogojih, smo meritve izvedli pri naravnih vremenskih pogojih. V delu primerajmo U-I karakteristike fotonapetostnih modulov izdelanih iz različnih materialov. Tako med seboj primerjamo fotonapetostne module iz monokristalnega silicija, polikristalnega silicija in amorfnega silicija (tankoplastnega). Primerjava U-I karakteristik posameznih tipov modulov je za dane pogoje merodajna, saj so meritve bile izvedene istočasno in pri enakih tehničnih in vremenskih pogojih.

ABSTRACT

This paper deals with measurement of the U-I characteristics of photovoltaic modules. Measurements of the U-I characteristics of photovoltaic modules are defined in standards developed by the Technical Committee IEC TC 82. Unfortunately, we do not have equipment required to perform measurements of U-I characteristics of photovoltaic modules in accordance with the standard. Therefore, a comparative analysis of U-I characteristics measured on different modules under the same technical and weather conditions is performed. The results are given for the photovoltaic modules made of monocrystalline silicon, polycrystalline silicon and amorphous silicon.

1. UVOD

S hitrim razvojem fotonapetostnih tehnologij [1]-[3], ki po definiciji pomeni skupino vseh naprav in posameznih enot, ki so potrebne za pravilno delovanje celotnega sistema, so nastali tudi standardi, ki jih proizvajalci morajo upoštevati. Če se omejimo zgolj na fotonapetostne module, proizvajalec poda tehnične podatke kot so: vršna moč, napetost pri vršni moči, tok pri vršni moči, napetost odprtih sponk in tok kratkega stika. V tehnični dokumetaciji proizvajalci podajajo tudi *U-I* karakteristike fotonapetostnega modula pri različnih vrednsotih sončnega sevanja.

Za preverjanje, če fotonapetostni moduli res deluje tako kot podaja proizvajalec, oziroma če želimo primerajat različne tipe fotonapetostnih modulov med seboj, moramo zato posneti *U-I* karakteristiko modula. Danes že obstaja kar nekaj komercialnih inštrumentov [4] za

uporabo v fotonapetostni tehniki, sem spadajo tudi inštrumenti s pomočjo katerih je mogoče posneti tudi *U-I* karakteristiko modula. V našem primeru nismo uporabili nobenega komercialnega inštrumenta za merjenje *U-I* karakteristik fotonapetostnih modulov, temveč smo si sestavili svoj eksperimetalni sistem.

Tako smo pri naravnih vremenskih pogojih (pri tem smo se poiskušali približati pogojem, ki so definirani v standardu), primerjali tri različne tipe fotonapetostnih modulov. Med seboj smo primerjali fotonapetostne module iz monokristalnega silicija, polikristalnega silicija in amorfnega silicija.

2. STANDARNI S PODROČJA MERJENJA UI KARAKTERISTIK FOTONAPETOSTNEGA MODULA

Definicija standarda: "Standard je dokument, ki nastane s konsenzom in ga odobri priznani organ in ki določa pravila, smernice ali značilnosti za dejavnosti ali njihove rezultate, ter je namenjen za občo in večkratno uporabo in usmerjen v doseganje optimalne stopnje urejenosti na danem področju".

S hitrim razvojem fotonapetostnih tehnologij, je leta 1981 nastal mednarodni tehnični komite IEC TC 82 (IEC TC 82 Solar photovoltaic energy system) [5], z nalogo pripraviti mednarodne standarde za sisteme pretvarjanja sončne energije v električno, in sicer za vse elemente celotnega fotonapetostnega sistema. Torej vse od zasnove in lastnosti fotonapetostnih naprav do celotnih sistemov za proizvodnjo električne energije in njihovega vključevanja v javne razdelilne sisteme. V [6] so zbrani trenutno veljavni standardi, ki jih je v zadnjeh letih izdal IEC TC 82. Dobro dvajsetletje za ustanovitvijo IEC TC 82 je bil v Sloveniji ustanovljen slovenski tehnični odbor, ki se ukvarja s področjem fotonapetostnih tehnologij, imenovan SIST/TC PVS. Tako lahko od leta 2005 dalje dobimo v slovenščino prevedeno tehnično poročilo IEC TR 61836:1997 kot SIST-TP IEC TR 61836:2005, Sončni fotonapetostni sistemi – Izrazi in simboli.

V nadaljevanju podajamo trenutno veljavne standarde, ki se posredno in neposredno navezujejo na merjenje *U-I* karakteristik fotonapetostnih modulov.

SIST EN 60891:2001 (EN 60891:1994),
Postopki za temperaturno in sevalno korekcijo izmerjenih karakteristik I-U fotonapetostnih generatorjev iz kristalnega silicija
SIST EN 60904-1:2001 (EN 60904-1:1993),
Fotonapetostne naprave – 1. del: Merjenje fotonapetostnih tokovno napetostnih karakteristik
SIST EN 60904-2:2001 (EN 60904-2:1993),
Fotonapetostne naprave – 2. del: Zahteve za referenčne sončne celice
SIST EN 60904-3:2001 (EN 60904-3:1993),
Fotonapetostne naprave – 3. del: Postopki merjenja prizemnih fotonapetostnih (PV) sončnih naprav s podatki referenčnega spektralnega sevanja
SIST EN 60904-5:2001 (EN 60904-5:1993),

Fotonapetostne naprave – 5. del: Določanje ekvivalentne temperature celice (ECT) fotonapetostnih (PV) naprav po metodi napetosti odprtih sponk
SIST EN 60904-6:2001 (EN 60904-6:1993),
Fotonapetostne naprave – 6. del: Zahteve za referenčne sončne module
SIST EN 61829:2001 (EN 61829:1998),
Fotonapetostno polje iz kristalnega silicija – Merjenje karakteristike I-U na mestu vgradnje

Če naredimo izvleček iz zgoraj navedenih standardov, so standardni testni pogoji (Standard Test Conditions) za merjenje *U-I* karakteristik fotonapetostnih modulov naslednji:

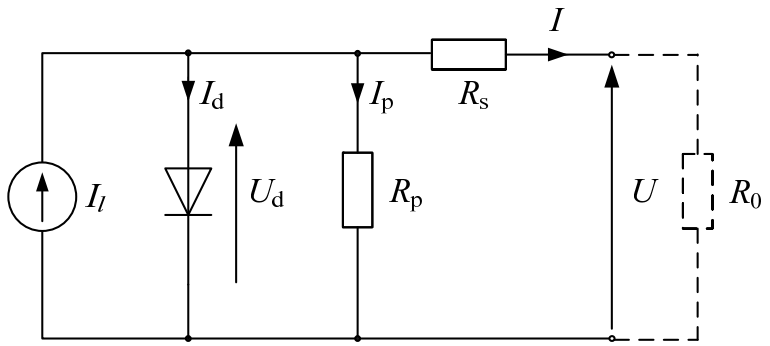
- **gostota moči sončnega sevanja**, ki vpada na enoto površine mora biti $G = 1000\ W/m^2$,
- **faktor zračne mase** (air mass) (SIST EN 60904-3:2001) ki določa dolžino poti žarka direktnega sončnega sevanja skozi ozračje, izražen kot večkratnik poti do točke na nadmorski višini 0 m, ko bi bilo sonce v zenitu. AM mora biti 1,5,
- **temperatura celice**, merjena s temperaturnim tipalom v stiku s celico ali izepljana iz meritve napetosti odprtih sponk oziroma iz enačbe toplotnega ravnovesja (SIST EN 60904-3:2001) mora biti $T_j = 25\ ^0C \pm 2\ ^0C$ in
- **vpadni kot** (SIST EN 60904-3:2001) med žarkom direktnega sončnega sevanja in normalo na opazovano ploskev mora bit $90\ ^0$.

3. SONČNE CELICE

V tem poglavju je predstavljen matematični model sončne celice, s pomočjo katerega smo analizirali vplive različnih parametrov na *U-I* karakteristiko sončnih celic oz modulov. Parametri, ki smo jih pri tem spreminjali so bili: gostota moči sončnega sevanja, površina sončnih celic, temperatura celic in število sončnih celic.

3.1 Matematični model sončne celice

Poznamo idealni in realni model sončne celice. Za nas nezanimiv idealni model sončne celice sestavljata dioda in tokovni izvor, ki sta vezana vzporedno. Poleg diode in tokovnega izvora, ki sestavljata idealni model sončne celice, upoštevamo še serijsko upornost R_s in vzporedno upornost R_p, katerih posledice so padec napetosti realne sončne celice in parazitni toki. Nadomestno vezje realne sončne celice je prikazano na sliki 1, matematični opis pa je podan z izrazom za tok I (3.1) in s Shockley-jevo enačbo za tok diode (3.2).



Slika 1: Nadomestno vezje sončne celice.

$$I = I_l - I_0\left(e^{q(U+R_S I)/mkT} - 1\right) - (U + R_S I)/R_P \tag{3.1}$$

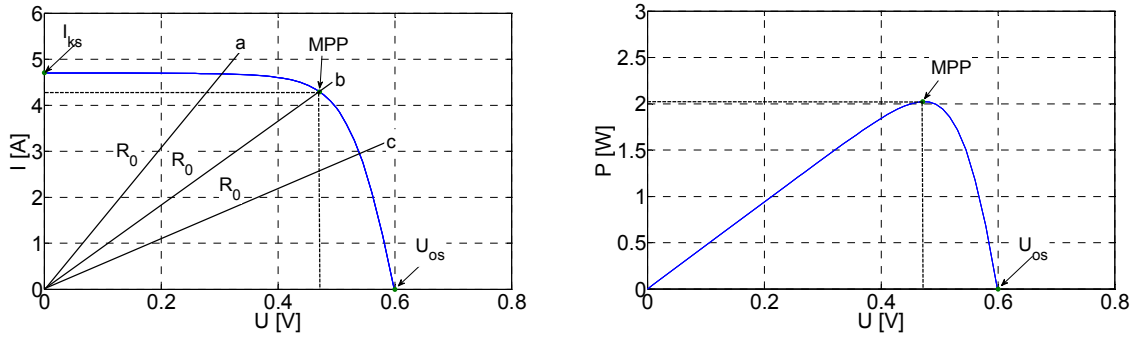
$$I_d = I_0\left(e^{qU_d/mkT} - 1\right) \tag{3.2}$$

Z I_0 je označen zaporni tok diod, I_l označuje tok sončnega generatorja, U_d je termična napetost, R_p je paralelna upornost, R_s pa označuje serijsko upornost. m je faktor kakovosti diode, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmannova konstanta, T je absolutna temperatura, $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As pa je naboj elektrona. Tok in napetost na izhodu nadomestnega vezja sončne celice sta označena z I in U. Omenjeni tok in napetost uporabljamo za predstavitev zunanjih karakteristik sončne celice.

3.2 Vplivi različnih parametrov na karakteristiko modula

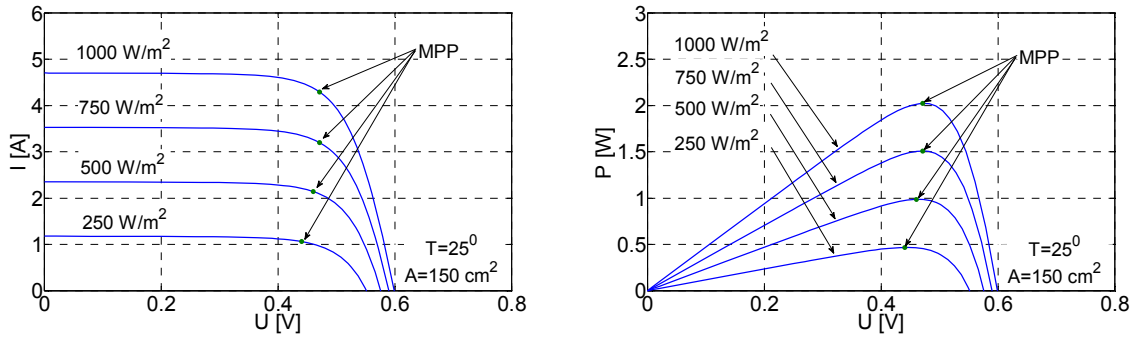
V nadaljevanju so s pomočjo v prejšnjem razdelku opisanim matematičnim modelom sončne celice pokazani različni parametri, ki vplivajo na električne karakteristike sončne celice in celotnega modula. Na sliki 2 sta predstavljeni *U-I* in *U-P* karakteristiki obremenjene sončne celice.

V primeru, ko na sončno celico ni priključenega porabnika, tok ne teče, napetost pa je najvišja. Ko se krivulja dotakne abscisne osi, je dosežena vrednost napetosti odprtih sponk U_OS (slika 2, levo). Ko sončno celico začnemo obremenjevati, tok narašča, napetost na izhodu pa počasi pada. Največji tok je tok kratkega stika I_KS, ki teče v primeru, ko je izhod sončne celice v kratkem stiku. V tem primeru je izhodna napetost enaka nič. Največjo izhodno moč sončne celice dosežemo, ko je produkt toka in napetosti največji (MPP, slika 2, desno), to pa je v kolenu *U-I* karakteristike, ki je razvidno iz slike 2, levo. Na omenjeno točko lahko vplivamo tako, da s spreminjanjem upornosti serijsko vezanega zunanjega upora R_0, ki se prišteva upornosti upora R_S s slike 1, zagotovimo največjo vrednost produkta toka in napetosti.



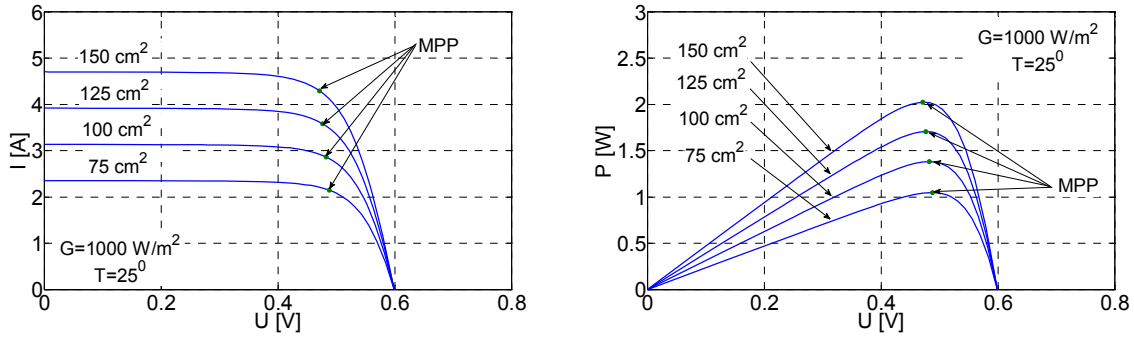
Slika 2: *U-I* in *U-P* karakteristika sončne celice.

Na sliki 3 so prikazane štiri *U-I* in *U-P* karakteristike celice posnete pri gostotah moči sončnega sevanja 250 W/m^2, 500 W/m^2, 750 W/m^2 in 1000 W/m^2. Iz slike 3 je razvidno, da se z večanjem jakosti sončnega sevanja veča tudi izhodni tok.



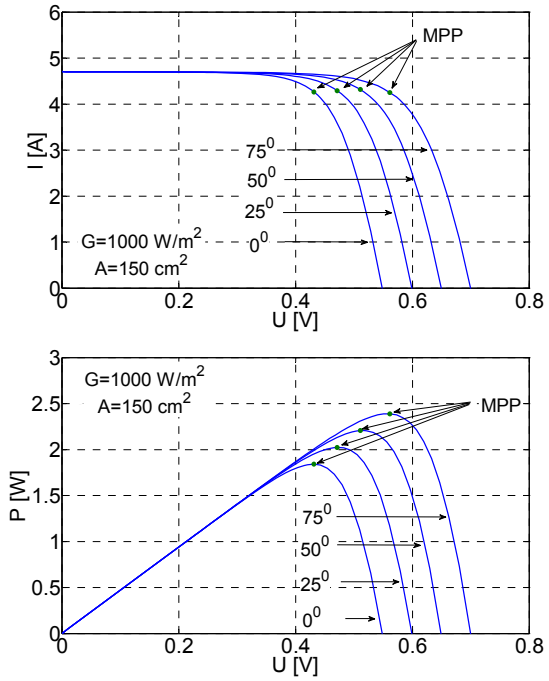
Slika 3: Vpliv sončnega obsevanja na *U-I* in *U-P* karakteristiko sončne celice.

Največji karakteristični tok je določen s površino vsake celice, kar je lepo razvidno iz slike 4. Iz primerjave na sliki 4 vidimo, da celica z večjo površino generira tudi do 25 % večji tok pri 0.5 V izhodne napetosti, saj je površina celice prav tako za približno 25 % večja.



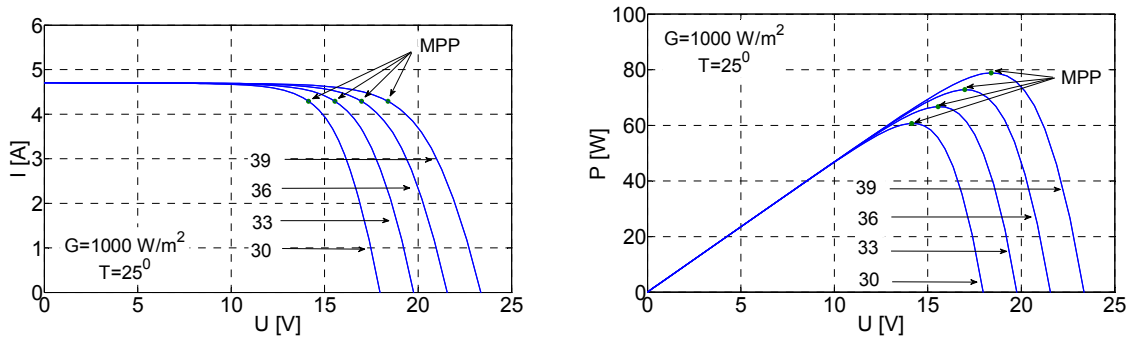
Slika 4: Vpliv površine sončne celice na *U-I* in *U-P* karakteristiko sončne celice.

Pri sevanju sončnih žarkov na celico se ta segreva in zato se spreminjajo tudi njene električne lastnosti. Pri direktnem sevanju na modul s gostoto moči sončnega sevnja 1000 W/m^2 in rastočih temperaturah nad 0 ^{0}C, napetost odprtih sponk U_{OC} pada, kratkostični tok I_{KS} pa rahlo narašča, kar je prikazano na sliki 5.



Slika 5: Vpliv temperature sončne celice na *U-I* in *U-P* karakteristiko sončne celice.

Da ohranimo sončne celice hladne, moramo pri montaži solarnih modulov zagotoviti cirkulacijo zraka okoli modulov. Pomembno je vedeti, da proizvajalci podajajo *U-I* karakteristiko modulov pri temperaturi modula 25 ^{0}C.
Vsaka sončna celica daje okoli 0,5 V napetosti. S serijsko vezavo sončnih celic vplivamo na izhodno napetost modula. Na sliki 6 so predstavljene *U-I* karakteristike za module sestavljene iz 30, 33, 36 in 39 celic.



Slika 6: Vpliv števila sončnih celic na *U-I* in *U-P* karakteristiko sončne celice.

4. EXPERIMENTALNI SISTEM IN REZULTATI MERITEV

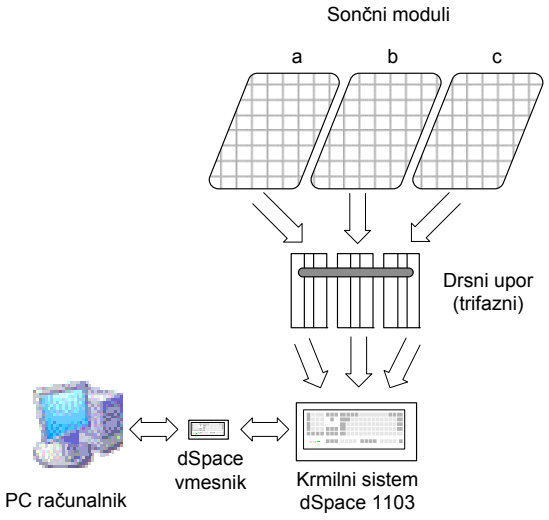
Uporabljen eksperimentalni sistem je namenjen za določitev *U-I* in *U-P* karakteristike sončnega modula.

4.1 EXPERIMENTALNI SISTEM IN POSTOPEK MERJENJA

Eksperimentalni sistem za določanje *U-I* in *U-P* karakteristik je zgrajen iz:

- *Osebnega računalnika*, je bil uporabljen za shranjevanje posnetih napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ preko krmilne enote. S pomočjo programskega paketa je bila pozneje narejena analiza dobljenih podatkov.
- *Krmilnega sistema dSpace PPC 1103 in pripadajočega vmesnika*. S pomočjo krmilnega sistema zajemamo podatke iz senzorjev toka in napetosti.
- *Merilnikov toka in napetosti*. Za merjenje toka so bili uporabljni merilni tokovni senzorji LEM tipa HY 10-P. Za merjenje napetosti pa diferenčne sonde HAMEG HZ 115.
- *Drsnega upora*. S pomočjo drsnega upora smo določili *U-I* in *U-P* karakteristiko sončnega modula od odprtih sponk do kratkega stika. Uporabljen je bil drsni upor METREL, tipa PRN 3/322, 3x10 Ω, 3x5.7 A, I_{max}=3x8 A / 15 min.
- *Temperaturnega senzorja*. Za merjenje temperature okolice in temperature modulov smo uporabili infrardeči termometer FLUKE 61.
- *Merjenega objekta*. Kot merjeni objekt smo uporabili tri različne tipe sončnih modulov (iz monokristalnega silicija, polikristalnega silicija in amorfnega silicija).

Na sliki 7 je shematsko prikazan eksperimentalni sistem za določanje *U-I* in *U-P* karakteristike sončnega modula.

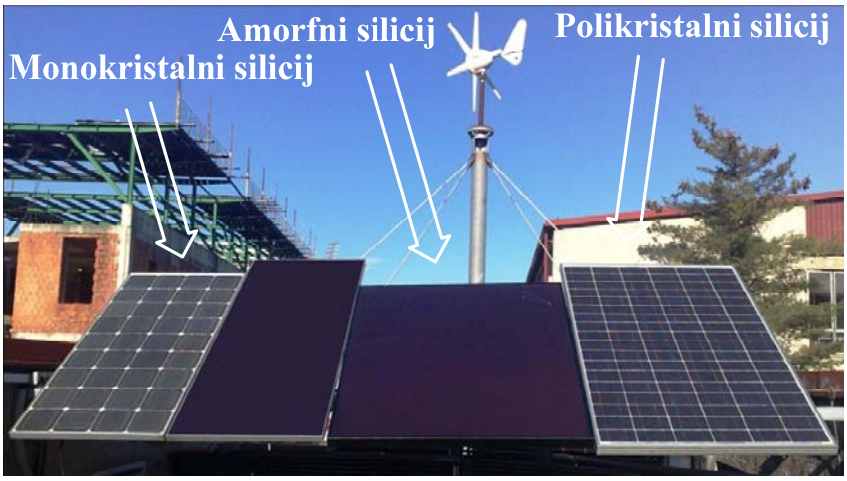


Slika 7: Eksperimentalni sistem.

Napetost in tok sončnih modulov smo merili pri različnih gostotah moči sončnega sevanja, ki se je spreminjala čez dan opravljanja meritve. S spreminjanje gostote moči sončnega sevanja se je spreminjala tudi temperatura sončnih modulov.

4.2 REZULTATI MERITEV

Za tri različne tipe sončnih modulov smo določili *U-I* in *U-P* karakteristike pri enakih vremenskih pogojih. *U-I* in *U-P* karakteristike smo določili za polikristalni (prvi iz desne), amorfni (drugi iz desne) in monokristalni modul (četrti iz desne), ki so prikazani na sliki 8.



Slika 8: Eksperimentalni sistem za določanje *U-I* in *U-P* karakteristik modulov.

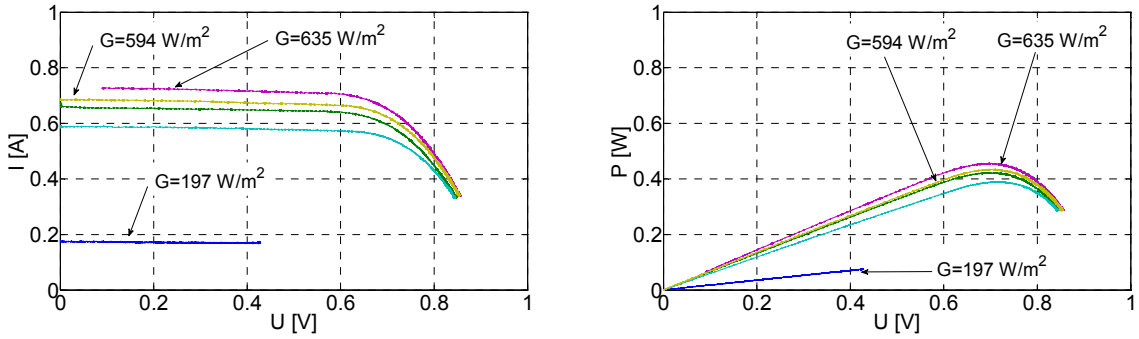
V tabeli 1 so zbrani tehnični podatki sončnih modulov, ki smo jih med seboj primerjali.

Tabela 1: Tehnični podatki sončnih modulov.

	Polikristalni silicij	Amorfni silicij	Monokristalni silicij
Dimenzije [mm] (površina [m^2])	1570x953x41 (1,496)	1308x1108x50 (1,449)	1445x645x34 (0,932)
Masa [kg]	18,23	19	11,2
Št. celic	18x6	XXX	4x9
P_{mpp} [W]	170	99 (81)*	105
U_{mpp} [V]	25,3	17,1	16,4
I_{mpp} [A]	6,72	4,73	6,41
U_{os} [V]	32,4	23	21
I_{ks} [A]	7,55	5,82	7,2
Predvidena cena [€/W]	3	2,5	3,5

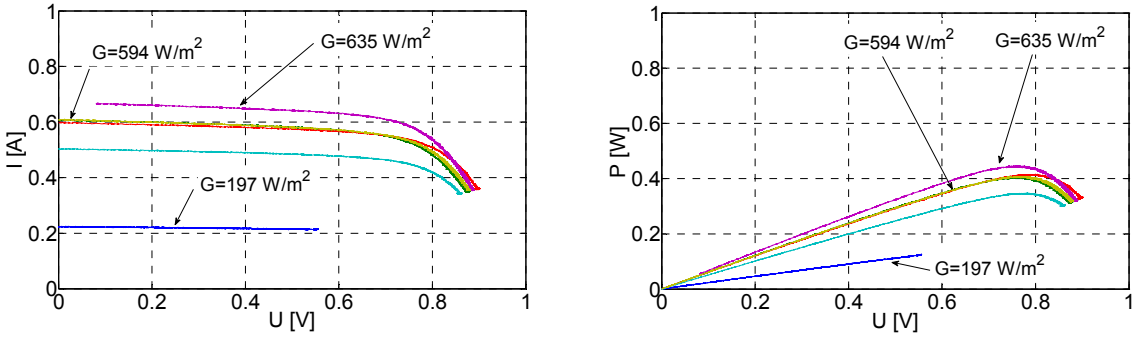
* P_{mpp} –začetna (P_{mpp} –stabilizirana) vršna moč

Na sliki 9 so prikazane *U-I* in *U-P* karakteristike določene pri različnih gostotah moči sončnega sevanja za modul iz ***polikristalnega silicija***. *U-I* in *U-P* karakteristike so za lažjo primerjavo med ostalimi moduli predstavljene v enotinih vrednostih.



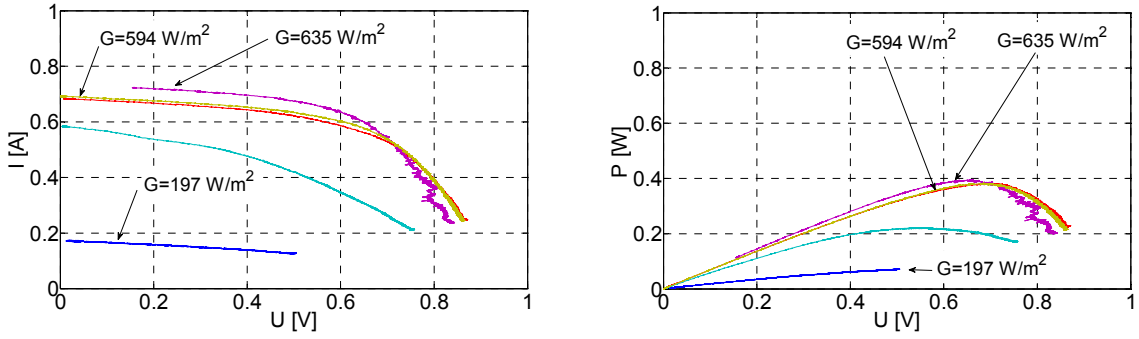
Slika 9: *U-I* in *U-P* karakteristike za modul iz polikristalnega silicija.

Na sliki 10 so prikazane *U-I* in *U-P* karakteristike določene pri različnih gostotah moči sončnega sevanja za modul iz ***amorfnega silicija***.



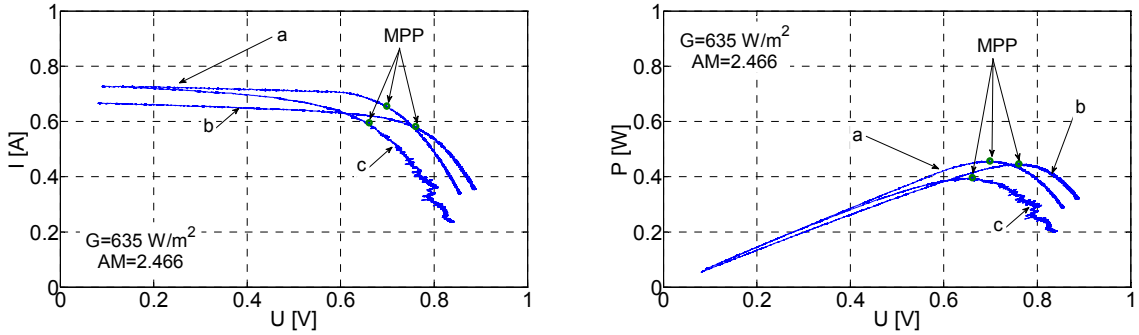
Slika 10: *U-I* in *U-P* karakteristike za modul iz amorfnega silicija.

Na sliki 11 so prikazane *U-I* in *U-P* karakteristike določene pri različnih gostotah moči sončnega sevanja za modul iz ***monokristalnega silicija***.



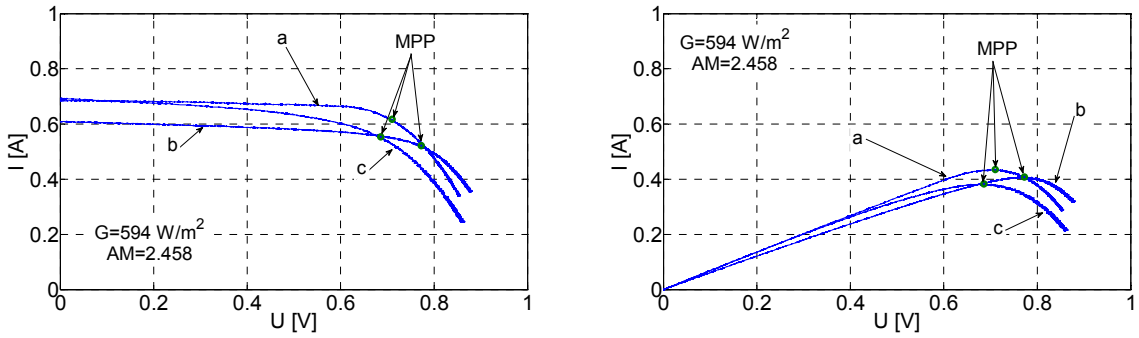
Slika 11: *U-I* in *U-P* karakteristike za modul iz monokristalnega silicija.

Na slikah 12 in 13 je narejena primerjava med fotonapetostnimi moduli iz polikristalnega silicija, amorfnega silicija in monokristalnega silicija. Na sliki 12 je narejena primerjava med moduli pri gostoti moči sončnega sevanja G = 635 W/m^2 medtem, ko je na sliki 13 narejena primerjava med moduli pri gostoti moči sončnega sevanja G = 594 W/m^2. Na slikah 12 in 13 je z a označen modul iz polikristalnega silicija, z b modul iz amorfnega silicija in s c modul iz monokristalnega silicija.



Slika 12: Primerjava *U-I* in *U-P* karakteristike pri gostoti moči sončnega sevanja G = 635 W/m^2.

V primeru iz slike 12 je temperatura vseh treh modulov znašala 27,2 ^{0}C, kar je malenkost več od zgornje meje standardnih pogojev, ki so 25 ^{0}C ±2 ^{0}C.



Slika 13: Primerjava UI in UP karakteristike pri gostoti moči sončnega sevanja G = 594 W/m^2.

V primeru iz slike 13 je temperatura modulov a (polikristalni silicij) in b (amorfni silicij) znašala 25,6 ^{0}C, temperatura modula c (monokristalnega silicija) pa 26,4 ^{0}C, kar ustreza standardnim pogojem.

V danih primerih nismo dosegli pogojev, ki se navezujejo na gostoto moči sončnega sevanja, ki je G = 1000 W/m^2 in zračne mase AM = 1,5.

5. SKLEP

V delu so navedeni standardi, ki se obravnavajo merjenje *U-I* karakteristik fotonapetostnih modulov. Prikazan je tudi eksperimetnalni postopek, s pomočjo katerega smo primerjali *U-I*

in *U-P* karakteristike različnih tipov fotonapetostnih modulov. Pri tem smo primerjali fotonapetostne module iz polikristalnega silicija, amorfnega silicija in monokristalnega silicija. Glede na podane rezultate prepuščamo svobodno presojo, kateri izmed fotonapetostnih modulov daje dejansko najboljše rezultate.

6. VIRI, LITERATURA

[1] U. Eicker, "Solar Technologies for Buildings," University of Applied Sciences, Stutttgart, Germany, 2001
[2] F. Kreith, J. F. Kreider, "Principles of Solar Engineering," London, 1978
[3] D. Lenardič, "Fotonapetostni sistemi," Agencija poti, Ljubljana, 2009
[4] D. Lenardič, "Namenski merilni inštrumenti za uporabo v fotonapetostnih sistemih," Elektrotehniška revija, št. 03, 2009
[5] http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=102:7:0::::FSP_ORG_ID:1276
[6] V. Martinčič, M. Koprivšek, "Fotonapetostni sistemi – pregled obstoječih in priprava novih IEC standardov za fotovoltaične varovalke," 30. Kotnikovi dnevi, Radenci, 2009

NASLOV AVTORJEV

Sebastijan Seme, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Gorazd Štumberger
red. prof. dr. Jože Voršič
Aleš Tomažič, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 72 Fax: + 386 2 252 54 81
Elektronska pošta: sebastijan.seme@uni-mb.si