

dr. sc. Marinko Stojkov, mag. el.  
HEP-ODS d.o.o. Zagreb, Elektra Slavonski Brod  
[marinko.stojkov@hep.hr](mailto:marinko.stojkov@hep.hr)

Igor Provči, mag. el.  
HEP-OPS d.o.o Zagreb, PrP Osijek  
[igor.provci@hep.hr](mailto:igor.provci@hep.hr)

Josip Bandaló, bacc. el.  
Selec d.o.o. Đakovo  
[josip.bandalo@os-t.com.hr](mailto:josip.bandalo@os-t.com.hr)

## PREGLED PARAMETARA FOTONAPONSKIH ČELIJA I SNIMANJE PROMJENA KARAKTERISTIKA TIJEKOM DANA

### SAŽETAK

Provedena su mjerenja za jedan specifični FN modul tijekom dana uz precizno bilježenje vanjske temperature i naoblake, i to posebno za slučaj horizontalno postavljenog modula kao i posebno za modul postavljen približno okomito na sunčevo zračenje.

Grafički i tablično su prikazani napon praznog hoda i struja kratkog spoja FN ćelije od kojih je modul sastavljen tijekom dana (po danu).

Također, načinjena je analiza napona, struje i snage za satne periode 7:00-19:00, snimajući karakteristike svaka dva sata sa srednjom vrijednošću za period od 20 minuta i to za različite vrste trošila spojenih u strujni krug FN modula.

**Ključne riječi:** FN modul, mjerenje, kut, naoblaka, napon praznog hoda, struja kratkog spoja

## PV CELLS PARAMETERS REVIEW AND REGISTERING PARAMETER'S CHANGES DURING THE DAY

### SUMMARY

Measuring are carried out for specific PV module during the day light, with simultaneously ambient temperature and amount of cloud registering for two cases: horizontal PV module and approximately orthogonal to solar beam.

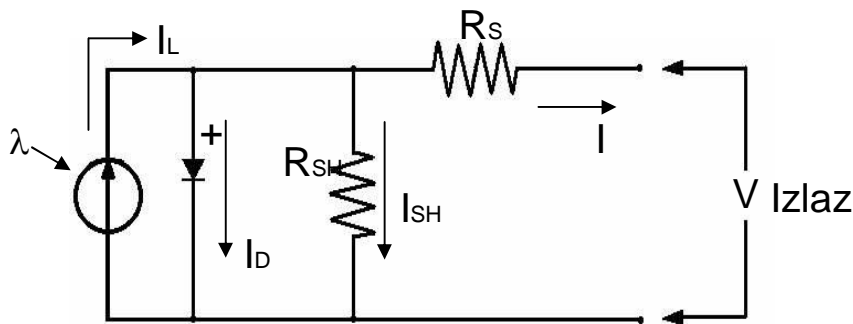
Open – circuit voltage and short – circuit current values of the PV cell for a several day hours are presented in the table and diagram. PV cell voltage, current and power are analyzed between 7:00 and 19:00, registering characteristic working points each two hours with average value of each measured parameter during 20 minutes for different types of electric devices connected in PV cell circuit.

**Key words:** PV module, measurement, angle, cloudy, open - circuit voltage, short - circuit current

## 1. UVODNA TEORETSKA RAZMATRANJA

### 1.1. Pregled parametara

Za ispravan odabir fotonaponskih modula i područja upotrebe potrebno je poznavati parametre ćelija od kojih je stvoren. Osnovni parametri solarnih sustava su napon praznog hoda ćelije, struja kratkog spoja, karakteristični otpor FN ćelije, snaga FN ćelije, stupanj korisnog djelovanja FN ćelije, ovisnost stupnja korisnog djelovanja ili spektralni odziv FN ćelije, ovisnost stupnja korisnog djelovanja ćelije o širini zabranjenog pojasa, te ovisnost navedenih parametara o temperaturi. Za lakše shvaćanje pojedinih parametara FN ćeliju možemo prikazati pomoću nadomjesnog strujnog kruga kao strujni izvor.



Slika 1. Ekvivalentna električna shema

Izlazna struja  $I$  je jednaka struji koju proizvodi sunčeva svjetlost  $I_L$ , umanjenoj za zanemarivu struju diode  $I_D$  i struju šanta  $I_{SH}$ . Serijski otpor  $R_S$  predstavlja unutarnji otpor toka struje i ovisi o dubini PN-spoja, nečistoćama i otporu spoja. Otpor šanta  $R_{SH}$  je obrnuto razmjerni rasipnoj struji prema zemlji.

### 1.2. Napon praznog hoda

Elektromotorna sila ćelije ili napon praznog hoda koja se javlja na stezaljkama ćelije kada je strujni krug otvoren (struja  $I = 0$ ), je uz struju kratkog spoja najvažniji parametar za opisivanje električne učinkovitosti neke ćelije. Maksimalni foto-napon ( $U_{PH}$ ) se dobiva u praznom hodu strujnog kruga fotonaopne ćelije pod punim osvjetljenjem. Ignorirajući gubitke, odnosno struju rasipanja prema zemlji, uzimamo za  $I = 0$  i napon iznosi:

$$U_{PH} = \frac{kT}{Q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_D} + 1\right) \quad [V] \quad (1)$$

gdje je:

$kT/Q$  – apsolutna temperatura izražena u voltima ( $300 \text{ K} = 0.026 \text{ V}$ )

$I_L$  – fotogenerirana struja

$I_D$  – struja zasićenja diode

$Q = \text{naboj} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$k = \text{Boltzmannova konstanta} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$T$  – temperatura u K

### 1.3. Struja kratkog spoja

Struja kratkog spoja ( $I_{KS}$ ) je ona struja koja će poteći ako su stezaljke ćelije kratko spojene, odnosno napon između stezaljki  $U = 0$ .

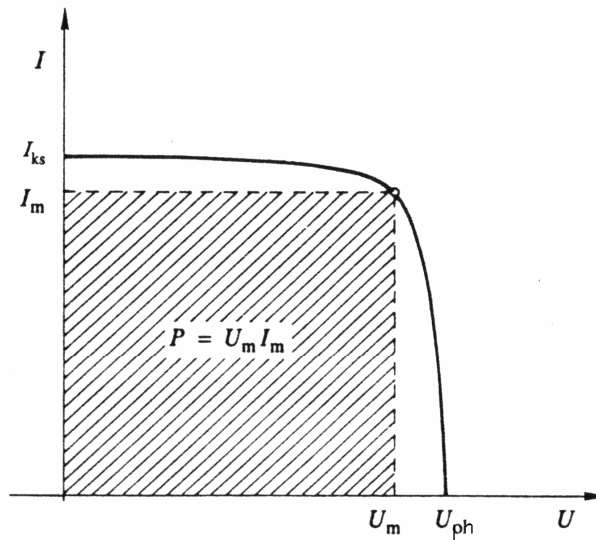
Ukupna izlazna struja ( $I_{KS}$ ) računa se prema izrazu (2):

$$I_{KS} = I_L - I_D \left[ e^{\frac{QU_{PH}}{kT}} - 1 \right] - \frac{U_{PH}}{R_{SH}} \quad [A] \quad (2)$$

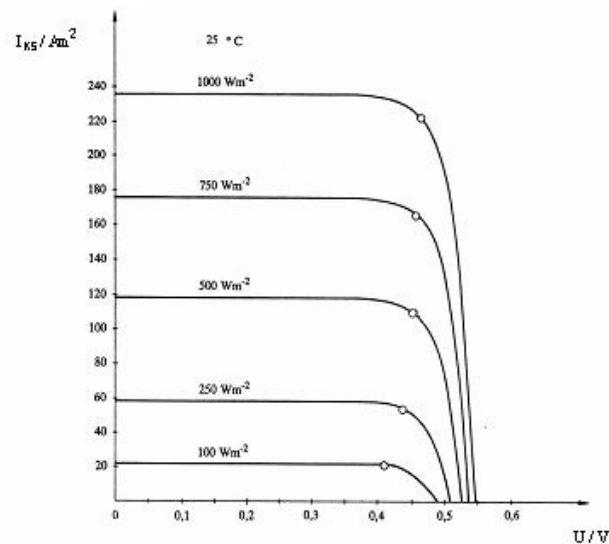
gdje je  $R_{SH}$  – otpor šanta.

U gore navedenom izrazu posljednji član izraza ( $U_{PH}/R_{SH}$ ) predstavlja struju rasipanja u zemlju, koja je znatno manja u odnosu na struje  $I_L$  i  $I_D$ , pa se može zanemariti.

Struja zasićenja diode može se eksperimentalno odrediti primjenjujući napon  $U_{PH}$  u mraku i mjereći struju koja odlazi u ćelije. Ova struja često se naziva «struja mraka» ili obrnuta struja zasićenja diode. Na ovaj se način dobivaju dvije granične točke u strujno-naponskoj karakteristici FN ćelije, a ostale se točke dobiju mjerenjem (slika 2). Postoji i ovisnost ove karakteristike u odnosu na jakost sunčeva zračenja (slika 3).



Slika 2. Strujno naponska (i-u) karakteristika FN ćelije



Slika 3. Ovisnost i-u karakteristike o jakosti Sunčeva zračenja

#### 1.4. Karakteristični otpor i snaga fotonaponske ćelije

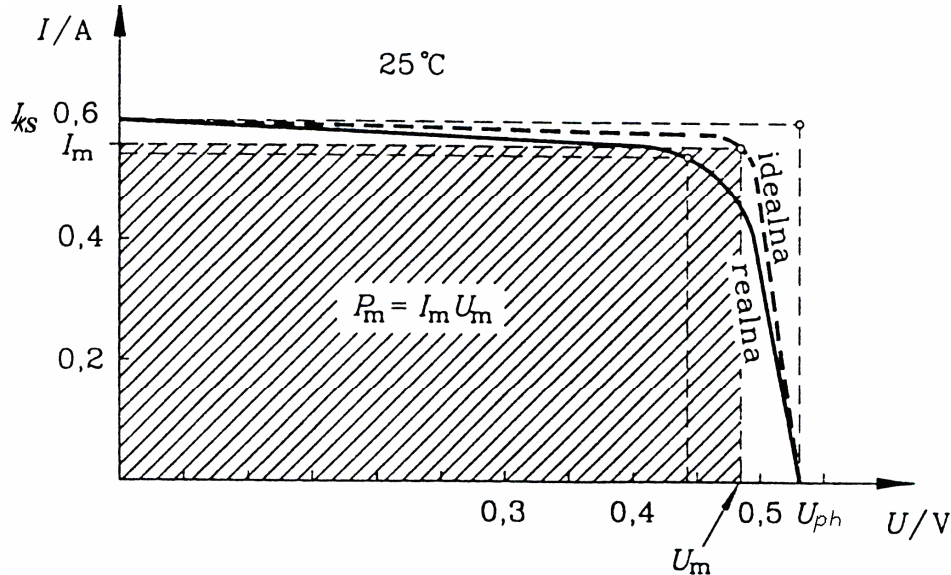
Pomoću napona praznog hoda i struje kratkog spoja može se definirati karakteristični otpor

$$R_k = U_{PH} / I_{KS} \quad [\Omega] \quad (3)$$

Snaga fotonaponske ćelije dobiva se kao umnožak napona i struje

$$P = U \cdot I = U \cdot \left[ I_L - I_D e^{\frac{qU}{kT}} + I_D \right] \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Snaga koju idealna ćelija može dati je različita u odnosu na snagu koju može dati realna. Računski se može dobiti traženjem ekstrema funkcije (4) odnosno određivanjem površine pravokutnika na slici 4 koji ima maksimalnu površinu.



Slika 4. Maksimalna snaga idealne i realne FN ćelije

Maksimalna (vršna) snaga  $P_m$  koju FN ćelija može dati može se prikazati i pomoću napona praznog hoda i struje kratkog spoja

$$P_m = I_{KS} U_{PH} = I_{KS} U_{PH} FF \quad [\text{Wp}] \quad (5)$$

gdje je :

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{PH} I_{KS}} \quad (6)$$

Faktor punjenja ( $FF = \text{Fill Factor}$ ) definiran je omjerom površine pravokutnika  $U_m$  i  $I_m$  i površine drugog sa stranicama  $U_{PH}$  i  $I_{KS}$ .

Faktor punjenja pokazuje koliko je stvarna ćelija blizu idealnoj, po karakteristikama, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora FN ćelije. Faktor punjenja  $FF$  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 FN ćelije i obično iznosi  $0.7 < FF < 0.9$ .

Serijski otpor ćelije  $R_S$  je rezultatni otpor unutrašnjeg omskog otpora ćelije i otpora kontakata ćelije. Produkt serijskog otpora i površine ćelije  $R_S A$  reda je veličine  $0.0025 \Omega/\text{m}^2$  za uobičajene FN ćelije.

Paralelni otpor ćelije  $R_P$  uzrokovan je lokalnim defektima u PN spoju. Za idealnu ćeliju on bi bio beskonačno velik, ali u stvarnoj ćeliji struje gubitaka proporcionalne su naponu na ćeliji.

## 1.5. Stupanj korisnog djelovanja

Stupanj korisnog djelovanja ćelije definira se omjerom njezine izlazne maksimalne snage  $P_m$  i snage Sunčeva zračenja koje upada na površinu ćelije  $A$ .

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{I_m U_m}{EA} \quad (7)$$

$$\eta = FF \cdot \frac{U_{PH} J_{KS}}{E} \quad (8)$$

Ovdje je FF faktor punjenja,  $J_{KS}$  gustoća struje kratkog spoja i E ozračenje po jedinici površine. Da bi stupanj korisnog djelovanja bio što veći, prema (8), uz dano ozračenje po jedinici površine potrebno je da gustoća struje kratkog spoja  $J_{KS}$  [A/m<sup>2</sup>] bude što veća a faktor punjenja FF što bliže jedinici.

Teorijska vrijednost silicijeve sunčane ćelije za maksimalnu vrijednost foto-struje je oko 40 mA/cm<sup>2</sup> pri ozračenju 1 kW/m<sup>2</sup>, za napon praznog hoda oko 0.6 V, maksimalni teorijski faktor punjenja 0.88 a maksimalna teorijska vrijednost korisnog stupnja djelovanja je oko 21%. Dok su tipične vrijednosti za realne silicijske ćelije:

$$FF \approx 0.82, \eta \approx 10\%.$$

## 2. MJERENJE PARAMETARA FOTONAPONSKE ĆELIJE

### 2.1. Opis mjerenja napona praznog hoda i struje kratkog spoja

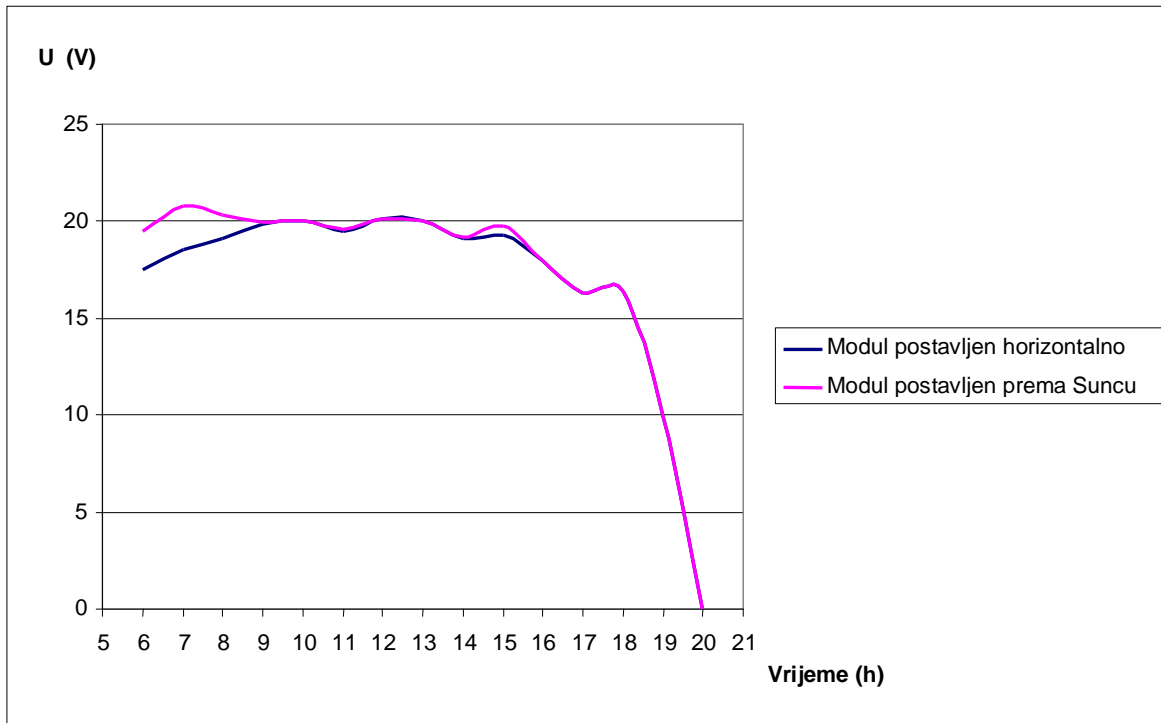
Izvršena su mjerenja struje kratkog spoja ( $I_{KS}$ ) i napona praznog hoda ( $U_{PH}$ ) tijekom dana. Mjerenja su izvedena dana 05.05.2007. od 6 h do 20 h u Đakovu. Prema Državnom hidrometeorološkom zavodu, sunce je izašlo u 05:38 (h.dec.: 5.63), solarno podne bilo je u 12:53 (h.dec.: 12.89), a Sunce je zašlo u 20.08 (h.dec.: 20.13). Trajanje Sunčeva dana bilo je 14 h, 29 min, 39 s (h.dec.: 14.49). Vrijeme je bilo vrlo promjenljivo, a temperatura zraka kretala se od 13.1 °C, izmjereno u 6h, do 27.6 °C u 15 h.

Mjerenja su provedena za jedan specifični FN modul tijekom dana - u ovisnosti o položaju modula prema Suncu uz precizno bilježenje vanjske temperature i naoblake, posebno za slučaj horizontalno postavljenog modula i posebno za modul postavljen približno okomito na sunčevo zračenje. Grafički i tablično su prikazani napon praznog hoda i struja kratkog spoja FN ćelije od kojih je modul sastavljen tijekom dana.

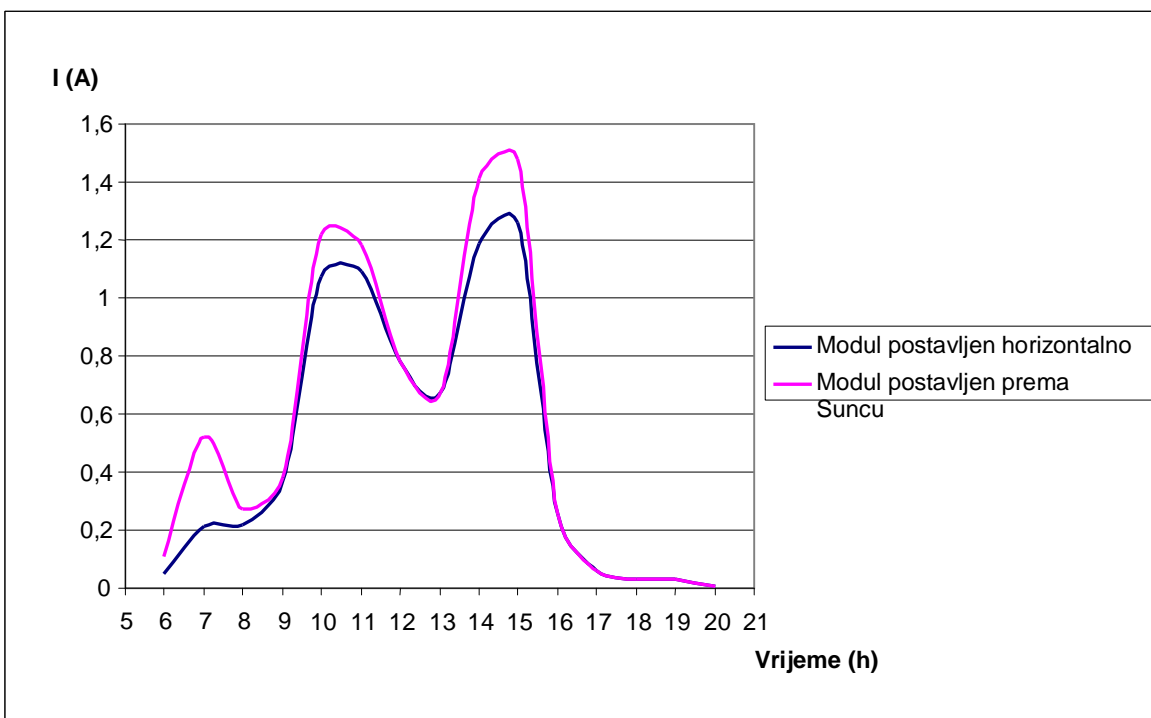
Tablica I. Rezultati mjerenja napona praznog hoda i struje kratkog spoja tijekom dana

VRIJEME, VREMENSKE PRILIKE	MODUL POSTAVLJEN HORIZONTALNO		MODUL POSTAVLJEN PREMA SUNCU	
	NAPON PRAZNOG HODA, $U_{PH}$ (V)	STRUJA KRATKOG SPOJA, $I_{KS}$ (A)	NAPON PRAZNOG HODA, $U_{PH}$ (V)	STRUJA KRATKOG SPOJA, $I_{KS}$ (A)
06:00, T: 13.1°C, VEDRO – SUNČANO	17,5300	0,0500	19,4900	0,1100
07:00, T: 15.3°C, VEDRO – SUNČANO	18,5000	0,2100	20,8000	0,5200
08:00, T: 17.6°C, SLABIJA NAOBLAKA	19,0900	0,2200	20,3000	0,2700
09:00, T: 18°C, OBLAČNO	19,8900	0,3700	19,9000	0,3800
10:00, T: 23.2°C, VEDRO – SUNČANO	20,0200	1,0700	20,0600	1,2200
11:00, T: 24.5°C, SLABIJA NAOBLAKA	19,4800	1,0900	19,5800	1,1800
12:00, T: 25.4°C, JAKA NAOBLAKA	20,1000	0,7800	20,1000	0,7800
13:00, T: 25.3°C, JAKA NAOBL. + KIŠA	20,0500	0,6700	20,0500	0,6700
14:00, T: 26.7°C, VEDRO – SUNČANO	19,1000	1,1900	19,2200	1,4100
15:00, T: 27.6°C, VEDRO – SUNČANO	19,300	1,2600	19,8000	1,4800
16:00, T: 26.1°C, JAKA NAOBLAKA	17,9700	0,2570	17,9700	0,2570
17:00, T: 25.8°C, JAKA NAOBLAKA	16,3200	0,0590	16,3200	0,0590
18:00, T: 21.6°C, JAKA NAOBLAKA	16,3700	0,0315	16,3700	0,0315
19:00, T: 16.8°C, JAKA NAOBL.+KIŠA	9,8100	0,0320	9,8100	0,0320
20:00, T: 15.2°C, SUMRAK	0,0002	0,0080	0,0002	0,0080

U tablici su uz vrijeme mjerenja opisane trenutne vremenske prilike i temperatura zraka kako bi se pobliže definirali i bolje razumjeli dobiveni rezultati. Budući da su vremenske prilike bile vrlo promjenjive i vrijednosti dobivene mjerenjem međusobno se vrlo razlikuju, ali su u skladu sa očekivanjima. Uz promjene vremenskih prilika, od vedrog neba i sunčanog vremena do trenutaka s vrlo gustom naoblakom i kišom, mijenjale su se vrijednosti insolacije i ukupne dozračene energije, što je direktno utjecalo na proizvodnju električne energije i rezultate mjerenja. Za periode mjerenja kada je vrijeme bilo sunčano, a nebo vedro primjetna je razlika u vrijednostima struje kratkog spoja i napona praznog hoda u ovisnosti o položaju modula prema Suncu. Rezultati mjerenja po vrlo oblačnom vremenu pokazuju da položaj modula nema utjecaja na mjerene veličine jer ćelije u tim trenucima iskorištavaju samo raspršenu svjetlost. Izmjerene su vrijednosti u tim trenucima jednake, neovisno o položaju modula i u tablici su osjenčane. Grafički prikaz rezultata dobivenih mjerenjem prikazan je grafovima na slikama 5. i 6.



Slika 5. Napon praznog hoda tijekom dana



Slika 6. Struja kratkog spoja tijekom dana

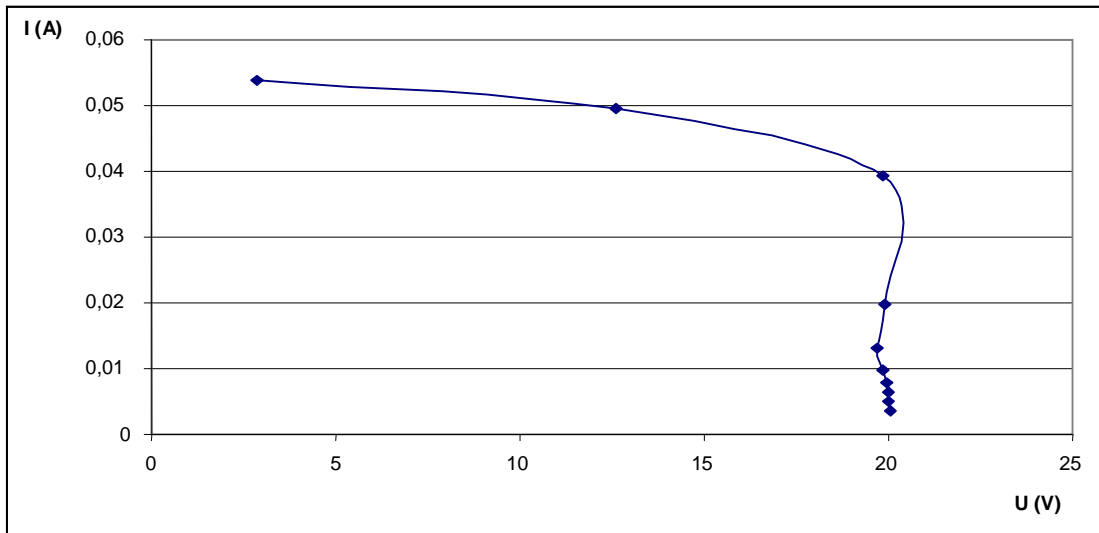
## 2.2. Rezultati mjerenja struja i napona fotonaponskog modula za različite terete

Izvršena su mjerenja struje i napona u ovisnosti o spojenom trošilu svaka 2 sata, od 7 h do 19 h. Mjerenja su rađena u ovisnosti o položaju modula, a otpor trošila mijenjao se u rasponu od 50 – 5500  $\Omega$ . Pomoću dobivenih rezultata konstruirane su strujno naponske karakteristike modula u ovisnosti o spojenom trošilu i položaju modula.

Iz rezultata mjerenja i dobivenih strujno naponskih karakteristika vidi se razlika u vrijednostima proizvedenog napona i struje u ovisnosti o položaju modula. Zamjetan je porast napona s povećanjem otpora trošila i istodoban pad generirane struje. Ovdje je prikazana mjerena karakteristika za 11 sati ( $T = 24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; naoblaka), a potom je tablično prikazana usporedba dobivenih rezultata struje, napona i snage na fotonaponskom modulu za trošilo 500  $\Omega$  tijekom dana s grafičkim prikazom predmetnog mjerenja.

Tablica II. Mjerne vrijednosti za 11 h uz različite terete

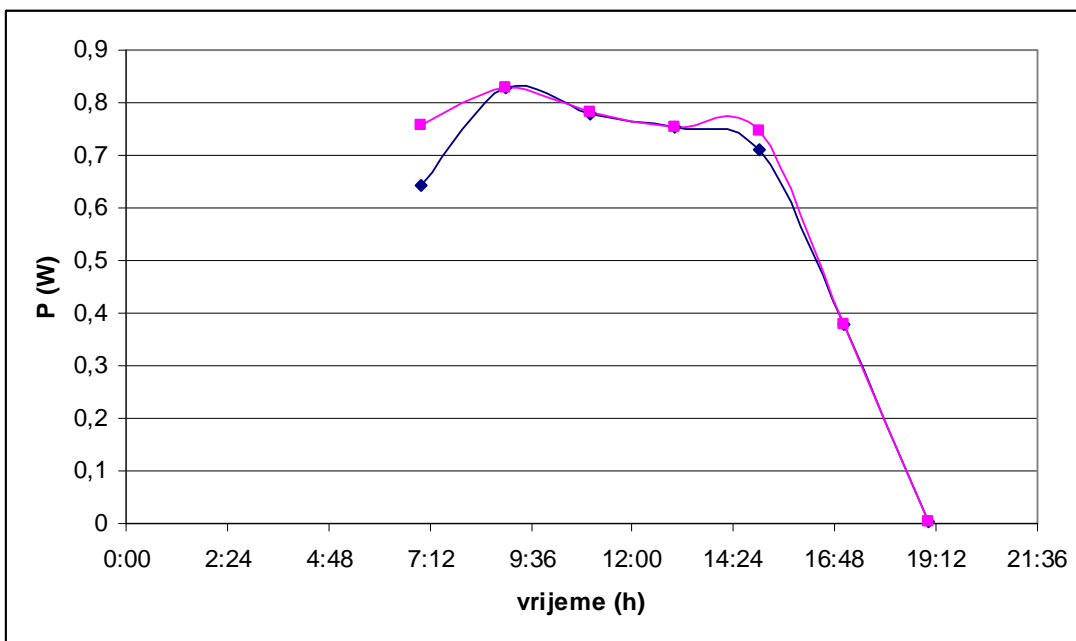
POTROŠAČ, R ( $\Omega$ )	MODUL POSTAVLJEN HORIZONTALNO			MODUL USMJEREN PREMA SUNCU		
	U (V)	I (A)	P (W)	U (V)	I (A)	P (W)
50	2,8500	0,0538	<b>0,1533</b>	3,1500	0,0594	<b>0,1871</b>
250	12,6100	0,0496	<b>0,6255</b>	13,2600	0,0514	<b>0,6816</b>
500	19,8500	0,0393	<b>0,7801</b>	19,8900	0,0394	<b>0,7838</b>
1000	19,9000	0,0197	<b>0,3920</b>	19,9100	0,0197	<b>0,3923</b>
1500	19,7000	0,0131	<b>0,2581</b>			
2000	19,8500	0,0098	<b>0,1945</b>			
2500	19,9600	0,0078	<b>0,1565</b>			
3000	19,9800	0,0064	<b>0,1278</b>			
4000	20,0200	0,0049	<b>0,0981</b>			
5500	20,0700	0,0036	<b>0,0722</b>			



Slika 7. i-u karakteristika prema tablici II

Tablica III. Mjerne vrijednosti fotnaponskog modula za teret  $500 \Omega$  tijekom dana

VRIJEME (h)	MODUL POSTAVLJEN HORIZONTALNO			MODUL USMJEREN PREMA SUNCU		
	U (V)	I (A)	P (W)	U (V)	I (A)	P (W)
<b>07 : 00</b>	18,36000	0,00350	<b>0,64260</b>	19,96000	0,03800	<b>0,75850</b>
<b>09 : 00</b>	19,75000	0,04200	<b>0,82950</b>	19,75000	0,04200	<b>0,82950</b>
<b>11 : 00</b>	19,85000	0,03930	<b>0,78010</b>	19,89000	0,03940	<b>0,78380</b>
<b>13 : 00</b>	19,60000	0,03850	<b>0,75460</b>	19,60000	0,03850	<b>0,75460</b>
<b>15 : 00</b>	18,98000	0,03750	<b>0,71170</b>	19,40000	0,03850	<b>0,74530</b>
<b>17 : 00</b>	14,06000	0,02700	<b>0,37960</b>	14,06000	0,02700	<b>0,37960</b>
<b>19 : 00</b>	1,43000	0,00233	<b>0,00405</b>	1,43000	0,00233	<b>0,00405</b>



Slika 8. ovisnost snage fotonaponskog modula o teretu od  $500 \Omega$  tijekom dana

### 3. ZAKLJUČAK

Iz rezultata mjerenja, koji zbog ograničenosti prostora nisu ovdje prikazani u potpunosti, vidljiv je porast izmjerenih vrijednosti napona i struje prilikom razvedravanja. Također se lako vidi da se naoblacenjem gubi razlika između vrijednosti izlaznih veličina u ovisnosti o položaju modula (do ćelija dopire samo difuzna svjetlost). Jasno je vidljiva ovisnost vrijednosti izlaznih veličina, ne samo o količini zračenja, već i o kutu upada sunčevih zraka. Razlika između izlaznih veličina horizontalno postavljenog modula i modula usmjerenog prema Suncu najizraženija je u ranim prijepodnevnim i kasnim poslijepodnevnim satima, kada je kut između upadnih Sunčevih zraka i normale na horizontalnu plohu modula najmanji. Vidljivo je da uz nastajanje naoblake opada vrijednost generirane struje i napona, a time i snage. Zbog naoblake ćelije iskorištavaju samo raspršenu svjetlost, a ovisnost izlaznih veličina sve manje ovisi ili uopće ne ovisi o položaju modula.

### LITERATURA

- [1] Ed. L.L. Grigsby, The Electric Power Engineering Handbook, 2nd edition, CRC Press LLC, 2001
- [2] Ed. Richard C. Dorf, The Electrical Engineering Handbook, CRC Press LLC, 2000
- [3] F. Batrinu, E. Carpaneto, G. Chicco, S. Gagliano, F. Spertino, G.M. Tina, ASSESSING THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SITES AND GRID-CONNECTED SYSTEMS: A STUDY CASE, The Sixth Energy System Conference, Torino, Italy, July 10-12, 2006
- [4] A. Canova, L. Giacone, F. Spertino, M. Tartaglia, ELECTRICAL IMPACT OF PHOTOVOLTAIC PLANT IN URBAN DISTRIBUTED NETWORK, The Sixth World Energy System Conference, Torino, Italy, July 10-12, 2006
- [5] Z. Matić, SUNČEVO ZRAČENJE NA PODRUČJU REPUBLIKE HRVATSKE – priručnik za energetske korištenje Sunčevog zračenja, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007
- [6] <http://www.eihp.hr/indeks.php>

- [7] <http://www.energetika-net.hr>
- [8] <http://www.hera.hr>
- [9] <http://www.hrote.hr>
- [10] <http://www.solarwatt.de>
- [11] <http://solaris-novigrad.hr>
- [12] <http://www.sunato.hr/indeks.htm>
- [13] [http://ksip.hr/ss\\_hr.htm](http://ksip.hr/ss_hr.htm)
- [14] <http://www.coseia.org/ConsumerCtrSolarElectricEd.html>
- [15] <http://www.advancedenergyonline.com>
- [16] <http://sollarhouse.umd.edu/page.php>
- [17] <http://www.solener.com>
- [18] [18] <http://meteo.hr>