

# Ispitivanje performansi fotonaponskih modula

---

Rajič, Vinko

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:409668>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**ISPITIVANJE PERFORMANSI FOTONAPONSKIH  
MODULA**

**Završni rad**

**Vinko Rajič**

**Osijek, 2023.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED LITERATURE</b> .....	<b>2</b>
<b>3. SUNČEVA ENERGIJA</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1. Sunčevo zračenje</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2. Karakteristike sunčevog zračenja</b> .....	<b>6</b>
3.2.1. Spektar sunčevog zračenja .....	8
<b>4. FIZIKALNE OSNOVE</b> .....	<b>10</b>
<b>4.1. Poluvodička dioda</b> .....	<b>10</b>
<b>4.2. Fotonaponski proces</b> .....	<b>11</b>
<b>5. FOTONAPONSKE ČELIJE I FOTONAPONSKI MODULI</b> .....	<b>13</b>
<b>5.1. Fotonaponska ćelija</b> .....	<b>13</b>
<b>5.2. Tehnologije fotonaponskih ćelija</b> .....	<b>16</b>
5.2.1. Fotonaponske ćelije od monokristalnog silicija .....	17
5.2.2. Fotonaponske ćelije od polikristalnog silicija .....	17
5.2.3. Tankoslojne fotonaponske ćelije .....	18
<b>5.3. Fotonaponski moduli</b> .....	<b>20</b>
<b>5.4. Tehničke karakteristike FN modula i standardni testni uvjeti (STC)</b> .....	<b>23</b>
<b>6. ISPITIVANJE PERFORMANSI FOTONAPONSKIH MODULA</b> .....	<b>27</b>
<b>6.1. Opis mjernog instrumenta</b> .....	<b>27</b>
6.1.1. Mjerenje parametara okoliša (Snaga sunčevog zračenje i temperatura ćelije) .....	27
6.1.2. Mjerenje strujno-naponske karakteristike .....	28
<b>6.2. Tehničke karakteristike ispitivanih fotonaponskih modula</b> .....	<b>30</b>
<b>6.3. Mjerenje i analiza rezultata mjerenja</b> .....	<b>35</b>
6.3.1. Polikristalni fotonaponski modul BISOL BMU 250 W .....	36
6.3.2. Monokristalni fotonaponski modul BISOL BMO 250 W .....	39
6.3.3. HIT fotonaponski modul PANASONIC VBHN240SE10 .....	42
6.3.4. Vremenski uvjeti tijekom ispitivanja .....	46
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>47</b>

<b>LITERATURA .....</b>	<b>48</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>51</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>52</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>53</b>

# 1. UVOD

Prirodni oblici energije prema obnovljivosti mogu se podijeliti na neobnovljive i obnovljive izvore energije. Obnovljive izvore energije definiramo kao izvore energije koji se iz dana u dan obnavljaju. U obnovljive izvore energije uvrštavamo energiju sunčevog zračenja, energiju vjetra, biomasu, hidroenergiju (plima i oseka, morske struje i valovi, vodotoci) i unutarnju toplinu zemlje (geotermalna energija). Neobnovljive izvore energije definiramo kao iscrpive izvore energije odnosno izvore čiji se resursi korištenjem smanjuju i mogu potpuno potrošiti. Kao neobnovljive izvore navodimo fosilna goriva (zemni plin, nafta, ugljen, uljni škriljevci) i nuklearna goriva (torij, uran). Zbog nedostatka neobnovljivih izvora energije kao što su utjecaj na ozon, emisije stakleničkih plinova i ograničenosti rezerva okrećemo se obnovljivim izvorima energije. Sunce kao najvažniji obnovljivih izvor energije ima veliki potencijal u iskorištavanju energije i ne šteti okolišu. Sunčevu energiju iskorištavamo pomoću solarnih kolektora, fotonaponskih ćelija i solarnih termoelektrana. Pretvorbu energije sunčevog zračenja vršimo pomoću fotonaponskih ćelija. Za proizvodnju fotonaponskih ćelija koristi se najzastupljeniji poluvodljivi materijal kao što je kristalni silicij. Prednosti fotonaponskih sustava su besplatna, čista i pouzdana energija. Nedostatci su ti da proizvodnja energije ovisi o osunčanosti i potrebne su velike površine za izgradnju većih elektrana. Hrvatska ima jako povoljan geografski položaj za iskorištavanje sunčeve energije.

## 1.1. Zadatak

Opisati princip pretvorbe energije sunčevog zračenja u električnu uporabom fotonaponskih ćelija. Definirati osnovne tehničke karakteristike fotonaponskih modula i načine ispitivanja njihovih električnih performansi. Ispitati električne performanse fotonaponskih modula različitih tehnologija izrade u laboratoriju i analizirati rezultate mjerenja

## 2. PREGLED LITERATURE

Prema literaturi [1], kvarovi koji se navode kod fotonaponskih modula su: pojavljivanje vrućih točaka (engl. *hot spot*), promjena boje unutarnjeg strujnog kruga, napuknute fotonaponske ćelije, puževi tragovi (engl. *snail trail*), pucanje stakla, promjena boje inkapsulacije, degradacija uzrokovana električnim potencijalom (engl. *potential induced degradation*), degradacija uzrokovana svjetlom, degradacija izazvana svjetlom i povišenom temperaturom, kvar zaobilaznih dioda, kvar na razvodnoj kutiji, raslojavanje (engl. *delamination*) i kvar brzog konektora.

Prema radu [2] pojavljivanje vrućih točaka nastaje kada jedna od ćelija ili dio nje proizvede manje nosilaca pa višak struje proizveden od ostalih ćelija prisiljava je u reverzni smjer te dolazi do disipacije snage koja se onda pretvara u toplinu. Rad [3] govori nam da promjena boje unutarnjeg strujnog kruga opisuje proces korozije vodljivih dijelova unutar fotonaponskog modula. Isti rad također opisuje kako su napuknuća fotonaponskih ćelija vidljiva u ćelijama kristalnog silicija zbog njihove kristalne strukture i male debljine. Napuknuća nastaju mehaničkim ili toplinskim naprezanjem i nisu vidljiva ljudskim okom, ali se mogu vizualizirati elektroluminiscencijom gdje se pojavljuju kao tanke sive linije ili tamna područja ako pukotina odvaja cijele dijelove ćelije. Prema [4] navodi se kako su puževi tragovi vidljivi ljudskim okom. Uz rubove ili pukotine u ćelijama, srebrna pasta prednjeg kontakta može poprimiti sivkastu boju te onda izgleda kao pužev trag iznad ćelije. Obično ako postoji pukotina, pužev trag nastaje nakon 3-12 mjeseci, ovisno o vremenskim uvjetima. Autori u [5] navode kako pucanje stakla može biti uzrokovano unutarnjim naprezanjem modula ulaskom vlage, širenjem ili drugim efektima, ili izvana kroz mehaničko naprezanje uzrokovano nosačima za module bez okvira i mehanička opterećenja poput tuče ili oluje. Staklo može napuknuti, razbiti se ili okrhnuti se. U navedenom radu se također navodi da promjena boje inkapsulacije nastaje kroz fotodegradaciju tijekom izlaganja ultraljubičastom svjetlu. Rad [6] opisuje kako do degradacije uzrokovane razlikom potencijala dolazi zbog razlike potencijala između okvira modula i fotonaponskih ćelija fotonaponskog sustava u radu. Ova razlika potencijala je vrlo velika na oba kraja niza modula. U istraživanju [7] navodi se kako degradacija uzrokovana svjetlom opisuje smanjenje performansi modula ubrzo nakon ugradnje i pojavljuje se u monokristalnom siliciju i tankoslojnim fotonaponskim ćelijama. Kao najčešći uzrok degradacije svjetlom navodi se Czochralski proces koji se koristi u proizvodnji monokristalnih fotonaponskih ćelija. Rad [8] govori kako je degradacija uzrokovana svjetlom i povišenom temperaturom degradacijski način uglavnom opisan u fotonaponskim modulima s p-tipom pasiviziranih emitterskih ćelija sa stražnjim kontaktom. Nedavno je otkriveno da se također pojavljuje u drugim vrstama ćelija kristalnog silicija, ali manje ozbiljno. Nastaje pri temperaturama

većim od 50 °C. Prema [9] navodi se da se kvarovi na zaobilaznim diodama uglavnom manifestiraju kao kratki spoj ili prazni hod zaobilazne diode. Isti rad navodi kako razvodne kutije pokrivaju zaobilazne diode te problemi razvodne kutije nastaju zbog degradacije materijala, nepravilne zatvorenosti ili nedostatka poklopca i odvajanje razvodne kutije od modula. U radu [10] se opisuje kako se fotonaponski modul sastoji od različitih slojeva materijala naslaganih jedno na drugo. Raslojavanje opisuje prekid prijanjanja između slojeva i javlja se na granici materijala. Zbog raslojavanja dolazi do ulaska vlage i korozije. Prema istraživanjima [10] i [11] navodi se kako je spoj između fotonaponskog modula i pretvarača ili kutije s osiguračima napravljen pomoću brzih konektora. Korozija zbog vlage ili starenje polimera mogu učiniti materijal konektora poroznim i lomljivim.

U literaturi [1] navode se sljedeće metode za ispitivanje fotonaponskih modula: snimanje  $I-U$  karakteristike, vizualna inspekcija, infracrvena termografija, ultraljubičasta fluorescencija i tehnike luminiscencije (elektroluminiscencija i dnevna fotoluminiscencija). Iz rada [12] doznajemo kako se  $I-U$  krivulja može izmjeriti u različitim uvjetima: unutar laboratorija pomoću standardnih testnih uvjeta ili vani na terenu. Prema izvješću [10], određeni defekti se mogu otkriti pomoću specifičnih obrazaca na strujno-naponskoj karakteristici fotonaponskog modula ili čak i niza. Prema [13] doznajemo kako je vizualna inspekcija česta metoda ispitivanja i bazira se na jednostavnosti. Iako je uočavanje defektnosti ograničeno s obzirom da se većina defektnosti događa unutar materijala bez vizualnih efekta, vizualna inspekcija je učinkovita, brza i nije potrebna dodatna oprema. Rad [14] opisuje infracrvenu termografiju kao snimanje prostorno određene temperature slike fotonaponskog modula. Prema radu [15] saznajemo da je ultraljubičasta fluorescencija metoda koja dopušta detaljno istraživanje inkapsulacije materijala unutar fotonaponskog modula. Iz izvješća [16] se doznaje kako je luminiscencijsko zračenje oblik svjetlosti koji emitira zračenje rekombinacije nosilaca naboja u poluvodiču. Elektroluminiscencija koristi vanjski izvor istosmjerne struje za pokretanje signala luminiscencije [17], a dnevna fotoluminiscencija se uglavnom izvodi tijekom procesa proizvodnje fotonaponske ćelije gdje je fotonaponska ćelija ili fotonaponski modul osvijetljen vanjskim, homogenim, umjetnim svjetlosnim izvorom [18].

## 3. SUNČEVA ENERGIJA

### 3.1. Sunčevo zračenje

Sunce kao zvijezda u središtu našeg solarnog sustava koja omogućava život na zemlji. Procesom termonuklearne fuzije koji se odvija u jezgri Sunca, spajanjem atoma vodika u helij, Sunce svojim zračenjem emitira otprilike  $3,8 \cdot 10^{23}$  kW ili  $3,3 \cdot 10^{27}$  kWh/godišnje elektromagnetske energije u svemir i prema Zemlji. Do Zemljine atmosfere dolazi oko  $1,75 \cdot 10^{14}$  kW ili  $1,53 \cdot 10^{18}$  kWh/godišnje, a ostatak se reflektira u svemir. Sunčeva energija može se direktno transformirati u iskoristive oblike energije kao na primjer toplinska i električna energija. Sunčevo zračenje slabi prolaskom kroz atmosferu jer se apsorbira u interakciji s vodenom parom i plinova te raspršuje na česticama prašine i molekulama plinova. Sunčevo zračenje dakle dopire do nas kao raspršeno ili izravno zračenje [19].

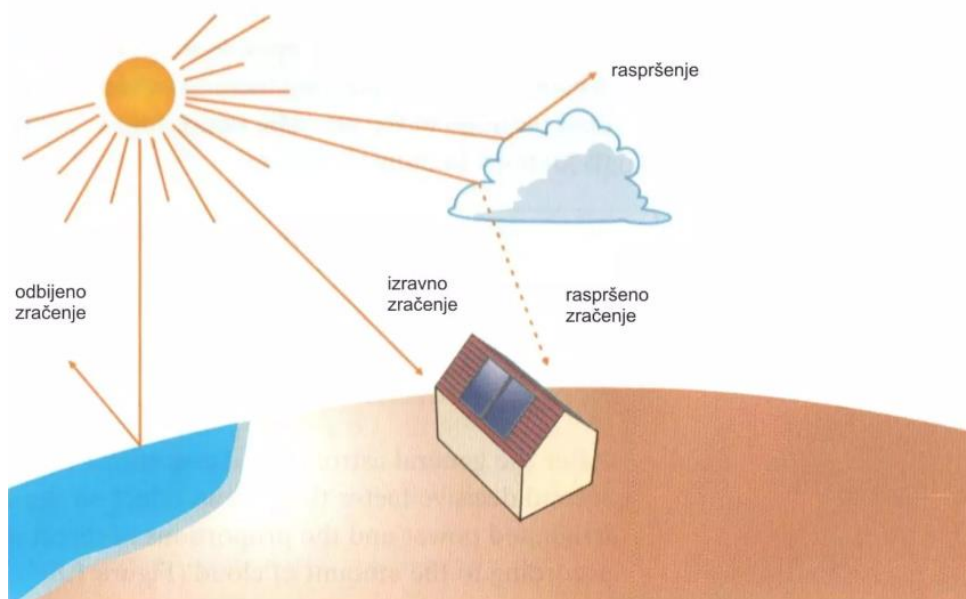
Sunčevo zračenje može se podijeliti na [19]:

- Izravno (direktno) sunčevo zračenje: zračenje koje dolazi iz smjera izvora i nije se raspršilo ili apsorbiralo.
- Raspršeno (difuzno) sunčevo zračenje: zračenje koje dolazi iz svih smjerova jer se raspršilo u atmosferi na atmosferskim sastojcima.
- Odbijeno (reflektirano) sunčevo zračenje: zračenje koje dolazi na površinu nakon odbijanja od neke druge površine (tla ili vodena površina).

Bitni pojmovi vezani za sunčevo zračenje [19]:

- Snaga sunčevog zračenja (engl. *Irradiance*) je gustoća energetskega toka sunčevog zračenja, gleda se kao omjer energetskega toka sunčevog zračenja i površine plohe koja je okomita na smjer istog zračenja.  $W/m^2$  je mjerna jedinica za snagu sunčevog zračenja.
- Ozračenost (engl. *Irradiation*) je gustoća energije zračenja koja u određenom vremenu dopiye na jedinicu površine. Mjerna jedinica za ozračenost je  $Wh/m^2$  ili  $J/m^2$ .
- Trajanje osunčavanja (eng. *Insolation*) je period kada direktno Sunčevo ozračenje iznosi  $120 W/m^2$  ili više. Mjeri se u satima.





Sl. 3.1. Sunčevo zračenje [20]

Na slici 2.1 prikazane su vrste sunčevog zračenja. Usprkos toj velikoj količini sunčeve energije koja dolazi do zemljine površine svaki dan, eksploatiranje takve energije pokriva jako manji dio svjetskih potreba za energijom. Razlozi toga su slaba razvijenost trenutnih tehnologija za eksploatiranje sunčeve energije kao i nepovoljne karakteristike koje su izražene kod sunčeve energije poput male gustoće energetskega toka, promjenjivost snage sunčevog zračenja, klimatski uvjeti i slično. Prema [21], kao problem pri eksploataciji sunčeve energije spominju se:

- mala gustoća toka energije
- promjenjivost snage sunčevog zračenja
- ovisnost zračenja o klimatskim uvjetima
- nepoklapanje jačine zračenja s količinom potrošnjom
- nemogućnost skladištenja takve energije

Zbog opisanih problema sunčeva energija uglavnom se koristi za dobivanje toplinske energije gdje je djelotvornost takve pretvorbe veća nego kod pretvorbe u električnu energiju i u manjem dijelu za fotonaponsku pretvorbu odnosno direktnu pretvorbu u električnu energiju. Iako u zadnje vrijeme, zbog snažnog razvoja tehnologije i visokih poticaja uglavnom se koriste i prave fotonaponski sustavi i sustavi solarnog grijanja u cijelom svijetu.

### 3.2. Karakteristike sunčevog zračenja

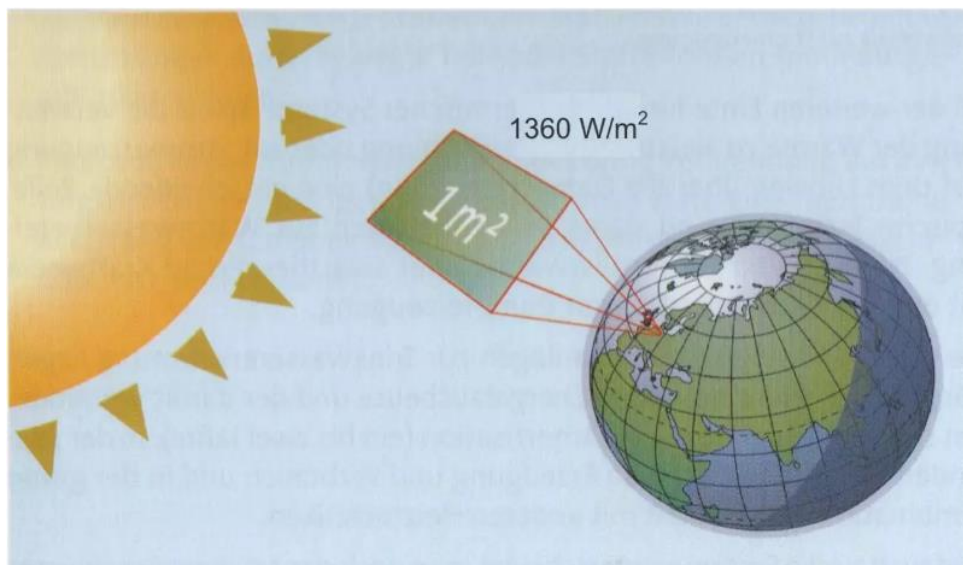
Ekstraterestičkim zračenjem nazivamo energiju sunčevog zračenja  $E_0$  koja dolazi do ruba zemljine atmosfere. Srednju vrijednost ekstraterestičkog zračenja nazivamo solarna konstanta te iznosi  $E_{0sr} = 1367,7 \text{ W/m}^2$ . Za najmanju udaljenost Zemlje i Sunca iznosi  $1399 \text{ W/m}^2$  dok za najveću udaljenost iznosi  $1307 \text{ W/m}^2$ . Ekstraterestičko zračenje  $E_0$  za druge udaljenosti Zemlje od Sunca možemo izračunati pomoću sljedećeg izraza [21]:

$$E_0 = E_{0sr} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (3-1)$$

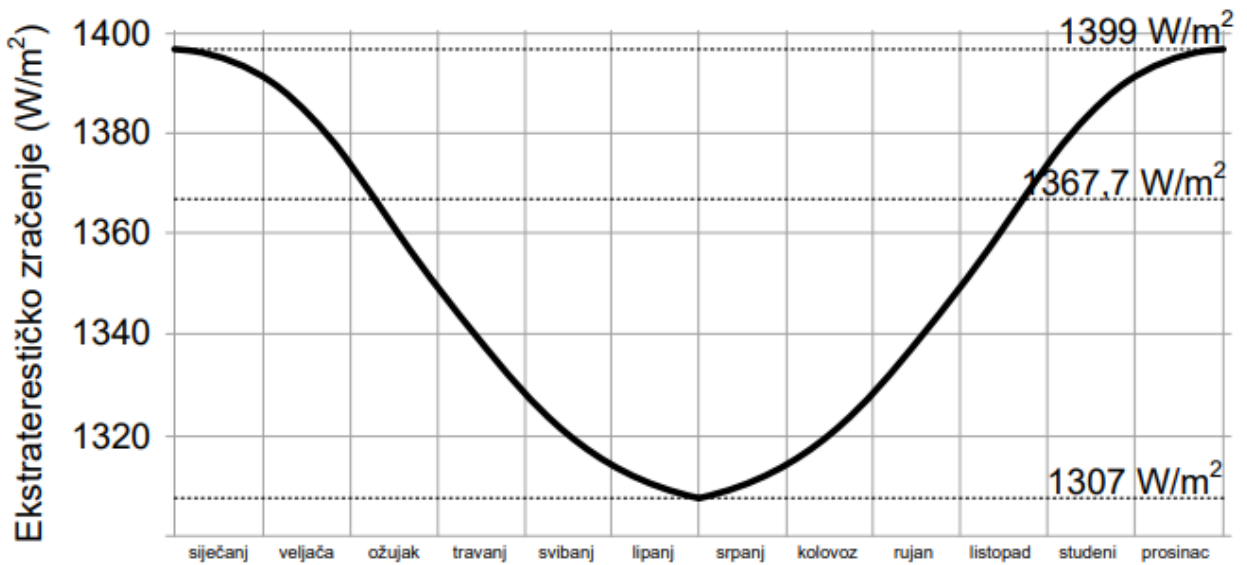
gdje su:

- $R$  – stvarna udaljenost između Zemlje i Sunca
- $r$  – prosječna udaljenost Zemlje i Sunca

Na slici 3.2 vidimo solarnu konstantu, a na slici 3.3. možemo vidjeti promjenu ekstraterestičkog zračenja ovisno o dobu godine gdje je najveća vrijednost u siječnju, a najmanja u srpnju.

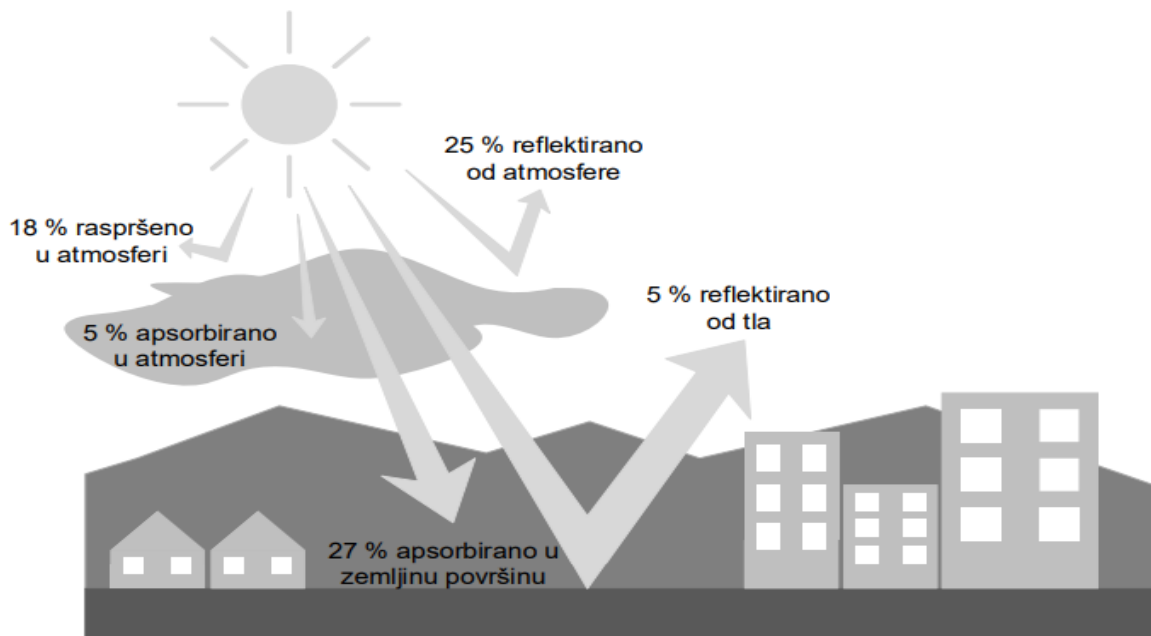


Sl. 3.2. Solarna konstanta [20]



Sl. 3.3. Promjena ekstraterestičkog zračenja ovisno o dobu godine [21]

Na slici 3.4. vidimo tok sunčevog zračenja od Sunca do Zemlje. Prema [21], oko 30% ekstraterestičkog sunčevog zračenja reflektira se u svemir, a od toga 20% od oblaka, 5% od atmosfere i 5% od zemljinu površinu. Atmosfera apsorbira oko 5% zračenja, 18% se rasprši u atmosferi i oko 27% apsorbiraju tlo, mora i oceani.



Sl. 3.4. Tok Sunčevog zračenja prema zemljinoj površini [21]

### 3.2.1. Spektar sunčevog zračenja

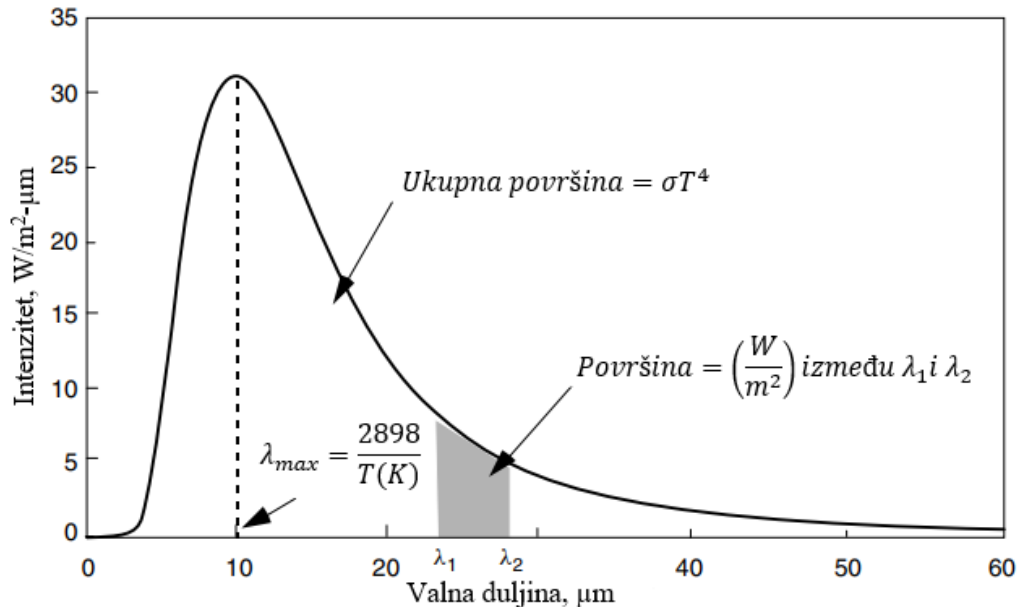
Svaki objekt emitira energiju zračenja u količini koja je funkcija njegove temperature. Najčešći način da se opiše koliko zračenja neki objekt emitira je da se uspoređi s teoretskom apstrakcijom zvanom crno tijelo. Crno tijelo je definirano kao savršen emiter i apsorber. Kao savršen emiter zrači više energije po jedinice površine od bilo kojeg realnog objekta iste temperature. Kao savršeni apsorber, apsorbera svo zračenje koje zadire u njega, odnosno ništa se ne reflektira i ne prenosi kroz njega. Valne duljine koje emitira crno tijelo ovise o njegovoj temperaturi kako je opisano Planckovim zakonom [22]:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \cdot 10^8}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{14,400}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (3-2)$$

gdje je:

- $E_{\lambda}$  – snaga emisije po jedinice površine crnog tijela
- $T$  – apsolutna temperatura tijela
- $\lambda$  – valna duljina.

Prikazivanjem Zemlje kao crno tijelo temperature 288 K (15 °C) rezultira spektrom emisije kao što se može primijetiti na slici 3.5.



Sl. 3.5. Spektralna snaga emisije crnog tijela od 288 K [22]

Površina ispod Planckove krivulje između bilo koje dvije valne duljine je emitirana snaga tih valnih duljina tako da je ukupna površina ispod krivulje ukupna emitirana snaga zračenja. Iskazuje se Stefan-Boltzmannovim zakonom radijacije [22]:

$$E = A\sigma T^4 \quad (3-3)$$

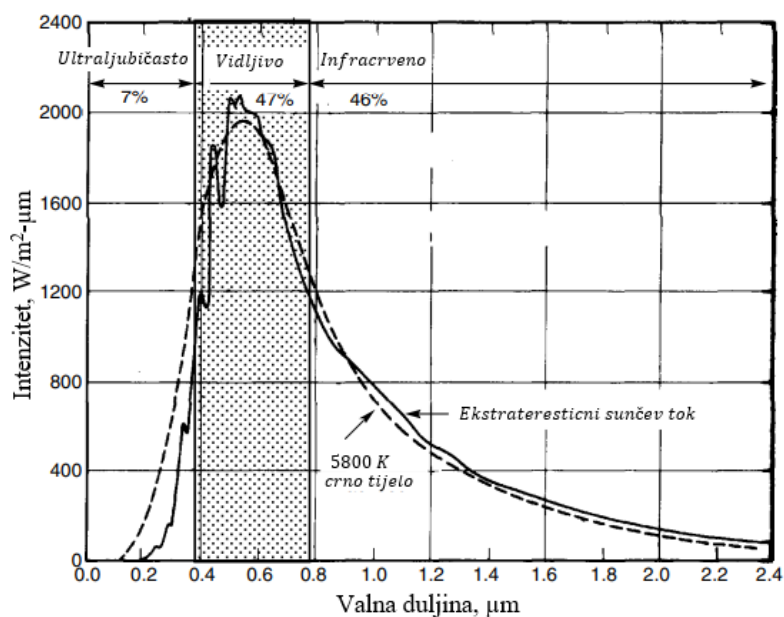
gdje su:

- $E$  – ukupna stopa emisije crnog tijela
- $\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konstanta
- $T$  – apsolutna temperatura crnog tijela
- $A$  – površina crnog tijela.

Još jedna prikladna značajka krivulje zračenja crnog tijela dana je Wienovim pravilom pomaka, koje nam govori valnu duljinu na kojoj spektar doseže svoju maksimalnu točku [22]:

$$\lambda_{\max}(\mu\text{m}) = \frac{2898}{T(K)} \quad (3-4)$$

Dok se procjenjuje da unutrašnjost Sunca ima temperaturu od oko 15 milijuna kelvina, zračenje koje dolazi sa površine Sunca ima spektralnu raspodjelu koja se blisko podudara s onom predviđenom Planckovim zakonom za crno tijelo od 5800 kelvina. Slika 3.6. prikazuje blisko podudaranje između stvarnog solarnog spektra i crnog tijela od 5800 kelvina. Ukupna površina ispod krivulje crnog tijela skalirana je na 1,37 kW/m<sup>2</sup> što predstavlja sunčevu insolaciju neposredno izvan Zemljine atmosfere. Također su prikazane površine ispod stvarnog sunčevog spektra koje odgovaraju valnim duljinama unutar ultraljubičastog (7%), vidljivog (47%) te infracrvenog (46%) spektra. Spektar vidljiv ljudskim okom koji se pojavljuje između ultraljubičastog i infracrvenog, nalazi se između 0,38μm (ljubičasto) i 0.78 μm (crveno) [22].

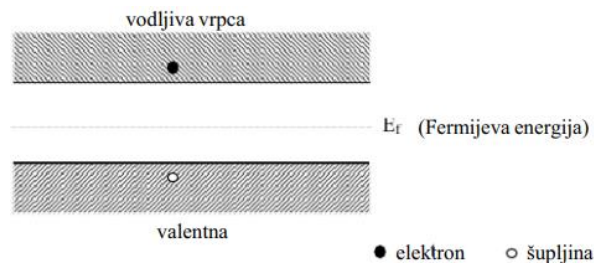


Sl. 3.6. Ekstraterestrički solarni spektar u usporedbi s crnim tijelom od 5800 K [22]

## 4. FIZIKALNE OSNOVE

### 4.1. Poluvodička dioda

Povezivanjem p tipa i n tipa poluvodiča dobivamo PN spoj odnosno poluvodičku diodu. Fotonaponska ćelija je poluvodička dioda. Ubacivanjem akceptorske primjese u jedan dio kristala čistog poluvodiča dobije se p tip poluvodiča dok ubacivanjem donorske primjese u drugi dio dobije se n tip poluvodiča. Broj elektrona u vodljivoj vrpici isti je kao i broj šupljina u valentnoj vrpici, a vodljiva i valentna vrpca odvojene su Fermijevom energetsom razinom  $E_f$  kao što se može vidjeti na slici 4.1.



Sl. 4.1. Energijski dijagram čistog poluvodiča [23]

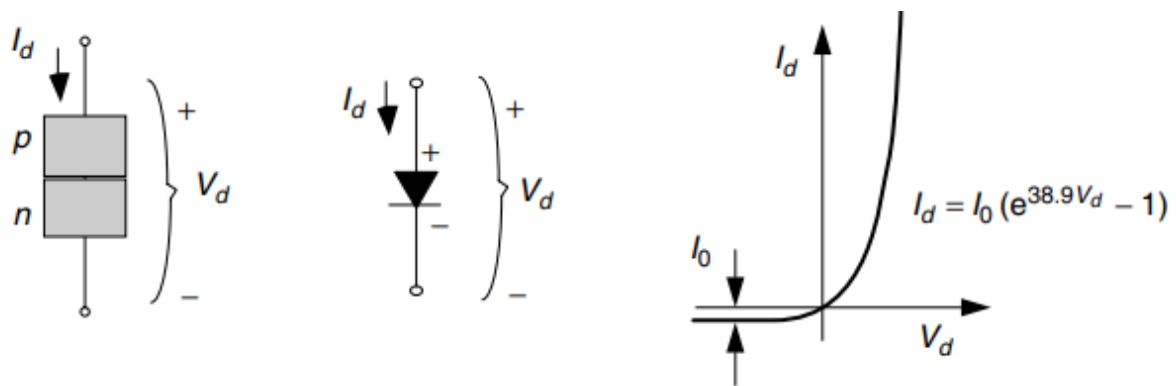
Strujno-naponsku karakteristiku diode možemo definirati sljedećom izrazom [23]:

$$I_d = I_z \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (4-1)$$

gdje su:

- $I_z$  – struja zasićenja
- $I_d$  – struja kroz diodu
- $U$  – napon
- $k$  – konstanta koja iznosi  $1,3806 \cdot 10^{-23}$  J/K
- $e$  – elementarni naboj koji iznosi  $1,692176462 \cdot 10^{-19}$  C
- $T$  – termodinamička temperatura.

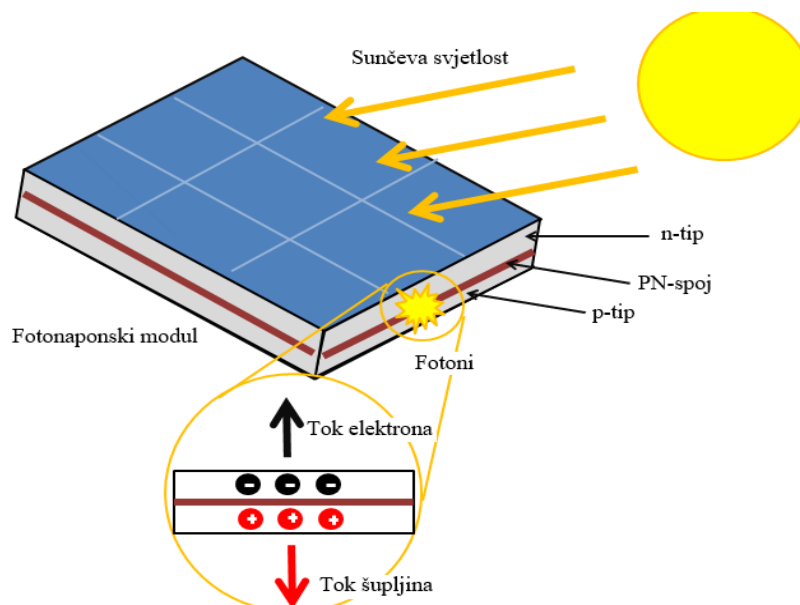
PN-spoj omogućava protok struje od p-područja do n-područja, ali ne obrnuto. Slika 4.2. redom prikazuje PN-spoj, simbol diode i  $I$ - $U$  karakteristiku diode.



Sl. 4.2. PN-spoj, simbol diode i  $I$ - $U$  karakteristika diode [22]

## 4.2. Fotonaponski proces

Fotonaponski proces fizikalna je pojava kod koje dobivamo napon ili struju na fotonaponskoj ćeliji kada se ona izloži svjetlosti. Fotonaponski proces i fotoelektrični proces su dva vezana, ali različita procesa. Kod fotoelektričnog procesa, elektroni se odvajaju s metalne površine kada su izloženi potrebnoj količini sunčevog zračenja dok kod fotonaponskog procesa elektroni se oslobađaju između molekula različitih spojeva materijala što uzrokuje povećanje napona na elektroda. Na slici 4.3. vidimo kako dolazi do fotonaponskog efekta.



Sl. 4.3. Fotonaponski efekt [24]

Direktnu pretvorbu sunčevog svjetla u struju nazivamo fotonaponskom pretvorbom. Energija fotona možemo odrediti pomoću izraza:

$$E_f = h \cdot \nu \quad (4-2)$$

gdje su:

- $\nu$  – frekvencija fotona obrnuto proporcionalna valnoj duljini
- $h$  – Planckova konstanta koja ima vrijednost  $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

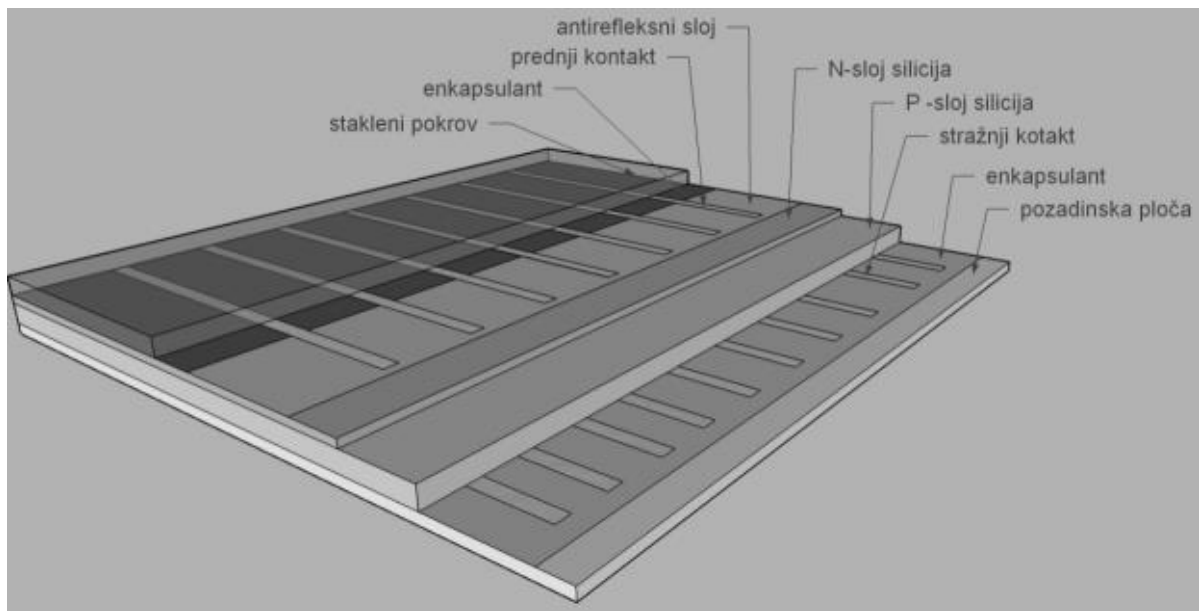
Fotoni u trenutku dodira s fotonaponskom ćelijom mogu se reflektirati od nju, proći izravno kroz nju ili apsorbirati se (upiti). Dovoljnu energiju za oslobađanje elektrona i generiranje struje daju samo apsorbirani fotoni. Poluvodič kada apsorbira dovoljnu količinu sunčeve energije dolazi do istiskivanja elektrona iz atoma materijala. Posebna površinska obrada materijala: prednji dio ćelije osjetljiv je na oslobođene elektrone pa se oni premještaju na površinu. Šupljine se formiraju tamo gdje su bili elektroni. Negativno nabijeni elektroni kreću se prema prednjem dijelu ćelije što rezultira neravnotežom naboja između prednjeg (negativnog) i stražnjeg (pozitivnog) dijela ćelije te nastaje potencijal napona. Spajanjem vanjski dijelova vodljivim materijalom, doći će do protjecanja struje [21].



## 5. FOTONAPONSKE ČELIJE I FOTONAPONSKI MODULI

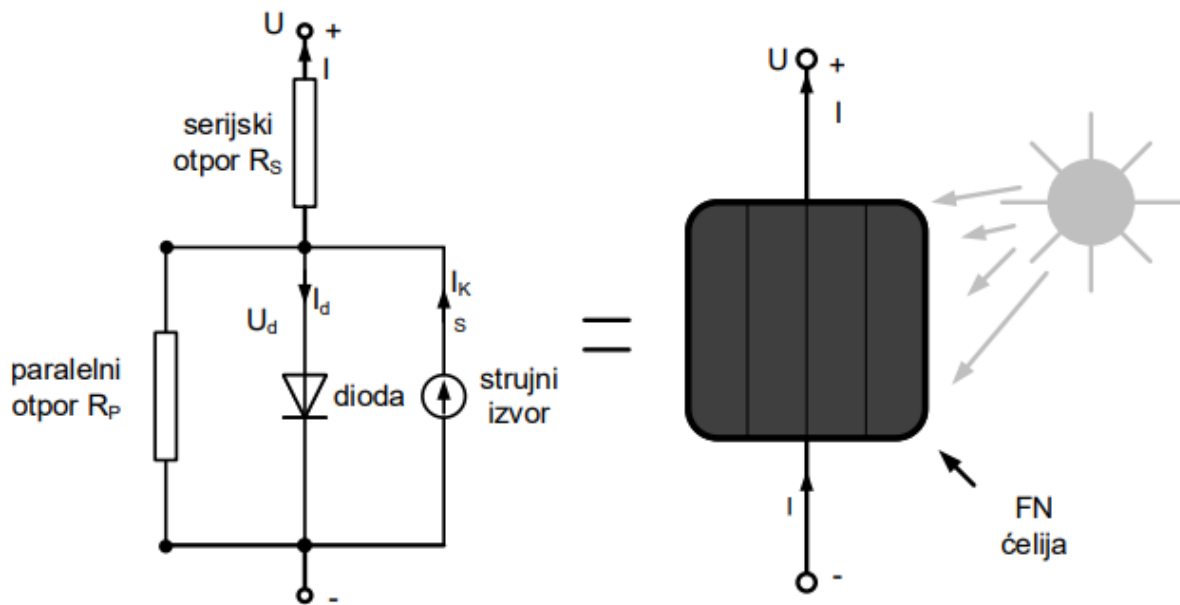
### 5.1. Fotonaponska ćelija

Fotonaponska ćelija kao poluvodički element koji na osnovi fotonaponskog efekta direktno pretvara sunčevu energiju koja upada na površinu ćelije u električnu energiju. Postavljeni metalni kontakti s obje strane ploče prikupljaju struju koju generiraju fotoni na fotonaponskim ćelijama. Kontakt se ostvaruje pomoću donjeg dijela površine i jednog ruba gornje površine. Tanki sitni vodljivi čvor na gornjoj površini prikuplja struju te dopušta ulaz svjetlosti. Prednji dio fotonaponske ćelije ima antirefleksirajuću zaštitu kako bi se smanjila refleksija i kao mehaničku zaštitu ima zaštitno staklo s prozirnim ljepilom. Na slici 5.1. vidimo fotonaponsku ćeliju.



Sl. 5.1. Fotonaponska ćelija [21]

Na slici 5.2. vidimo nadomjesnu shemu fotonaponske ćelije.



Sl. 5.2. Fotonaponska ćelija [21]

Struja ovakvog kruga predstavljena je navedenim izrazom:

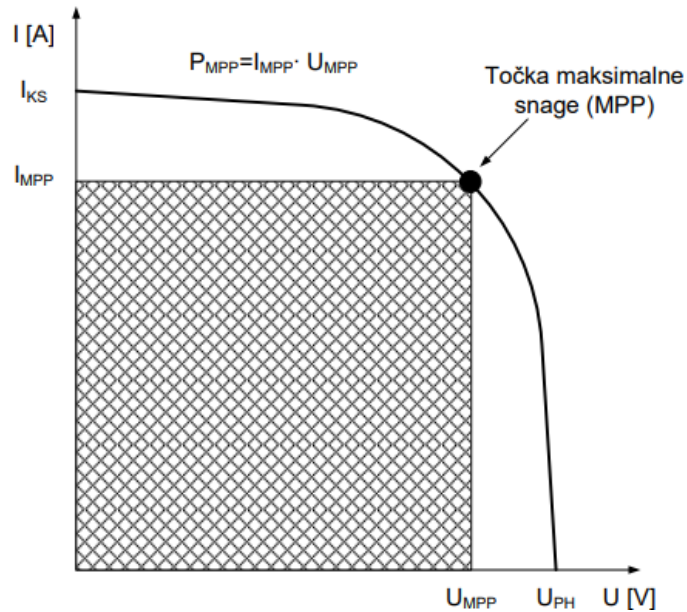
$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad (5-1)$$

Zanemarivanjem paralelnog i serijskog otpora vrijedi:

$$I = I_{fs} - I_0 \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] \quad (5-2)$$

gdje je:

- $I$  – struja sklopa prikazanog slici 5.2.
- $I_d$  – struja koja prolazi kroz diodu
- $I_{fs}$  – foto struja
- $I_p$  – struja koja prolazi kroz paralelni otpor
- $U$  – napon
- $R_p$  – otpor fotonaponske ćelije koji je spojen paralelno
- $I_0$  – struja zasićenja
- $e$  – elementarni naboj ( $1,692176462 \cdot 10^{-19}$  C)
- $R_s$  – otpor fotonaponske ćelije koji je spojen u seriju
- $k$  – Boltzmanova konstanta ( $1,3806 \cdot 10^{-23}$  J/K)
- $m$  – parametar fotonaponske ćelije koji iznosi  $m = 1$
- $T$  – termodinamička temperatura [21].



Sl. 5.3.  $I$ - $U$  karakteristika fotonaponske ćelije [21]

Na slici 5.3. vidljiva je  $I$ - $U$  karakteristika fotonaponske ćelije s tri karakteristične veličine.

Fotonaponska ćelija može se definirati s četiri bitna parametra [21]:

- Struja kratkog spoja fotonaponske ćelije  $I_{KS}$  kada su stezaljke kratko spojene. Napon tada iznosi nula, a struja kratkog spoja i fotostruja su jednake.
- Napon praznog hoda fotonaponske ćelije  $U_{PH}$  kada su stezaljke fotonaponske ćelije otvorene i jednak je:

$$U_{PH} = \frac{k \cdot T}{e} \ln \left( \frac{I_{KS}}{I_0} + 1 \right) \quad (5-3)$$

- Učinkovitost fotonaponske ćelije  $\eta_{FNC}$  – omjer ostvarene snage fotonaponske ćelije i snage sunčevog zračenja koja dopire na površinu ćelije i određuje se prema:

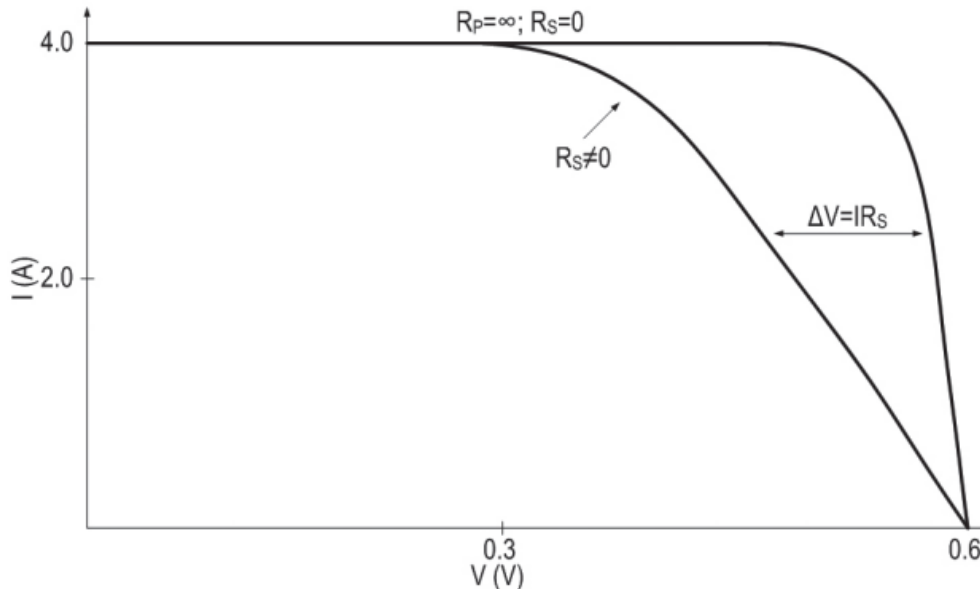
$$\eta_{FNC} = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A_{FNC}} = F \cdot \frac{U_{PH} \cdot J_{KS}}{G} \cdot 100 \quad (5-4)$$

gdje je:

- $A$  – površina fotonaponske ćelije u  $\text{W/m}^2$
- $J_{KS}$  – gustoća struje kratkog spoja u  $\text{m}^2$
- $G$  – snaga sunčevog zračenja u  $\text{A/m}^2$
- Faktor ispune  $F$  predstavlja omjer umnoška napona i struje u točki maksimalne snage i umnoška napona praznog hoda i struje kratkog spoja te se može odrediti pomoću:

$$F = \frac{P_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} \quad (5-5)$$

Faktor ispune  $F$  određuje kvalitetu fotonaponske ćelije i vrijednost faktora ispune kreće se u intervalu od 0,7 do 0,9.



Sl. 5.4.  $I$ - $U$  karakteristika fotonaponske ćelije s utjecajem serijskog i paralelnog otpora [25]

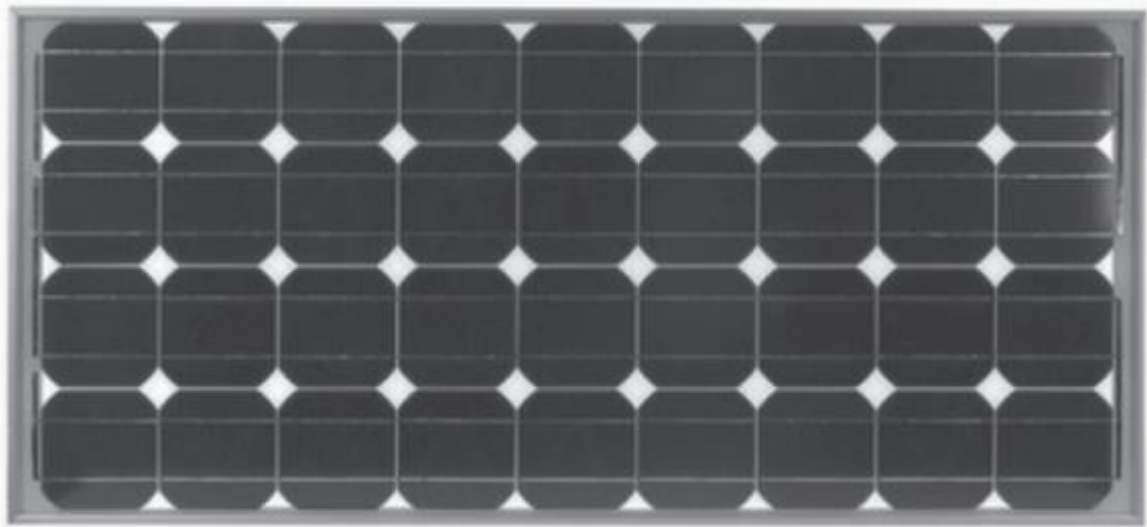
Gubitci zbog otpora metalne rešetke, metalnih kontakata i otpora materijala poluvodiča u p i n sloju predstavljaju glavna ograničenja fotonaponskog modula. Gubitci koji su gore navedeni mogu se opisati serijskim otporom fotonaponske ćelije  $R_S$ . Paralelni nepoželjni otpor  $R_P$  pojavljuje se na PN-spoju zbog neidealnosti i nečistoće spoja što uzrokuje slabljenje spoja blizu rubova fotonaponske ćelije. Na slici 4.4 prikazan je učinak paralelnog i serijskog otpora na strujno-naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije [26]. Prema [25], zbog termodinamičkih gubitaka (3%), odziva fotonaponskih ćelija na svjetlost sunca (31%), ograničenosti napona fotonaponskih ćelija od 0,8 V (12%) i gubitaka koji dolaze iz karakteristike poluvodiča fotonaponske ćelije (23%), teoretska učinkovitost fotonaponskog efekta doseže maksimalno 33%.

## 5.2. Tehnologije fotonaponskih ćelija

Najčešća vrste materijala za proizvodnju fotonaponskih ćelija su kristalni silicij poput monokristalnog i polikristalnog silicija te materijali izrađeni korištenjem tankoslojne tehnologije poput tankoslojnog silicija pomoću amorfnih tvari. Kako bi što više iskoristili energiju sunčevog zračenja, potrebna je velika debljina aktivnog sloja zbog poluvodičkog svojstva kristalnog silicija što predstavlja njegov najveći tehnološki nedostatak.

### 5.2.1. Fotonaponske ćelije od monokristalnog silicija

Monokristalne silicijske fotonaponske ćelije rade se od jednog vrlo čistog silicija. Monokristalni silicij tamne je boje, tvrd, sjajan i neproziran. Iako slabo provodi struju, dobar vodič može postati dodavanjem primjesa. Promjenom temperature mijenja se i širina zabranjene zone monokristalnog silicija. Neke od prednosti monokristalne fotonaponske ćelije su učinkovitost koja iznosi od 13 do 19% i očuvanje i dugotrajno zadržavanje svojih tehničkih svojstava za vrijeme dužeg perioda. Na slici 4.5 prikazan je monokristalni silicijski fotonaponski modul [25].



Sl. 5.5. Monokristalni silicijski fotonaponski modul [25]

### 5.2.2. Fotonaponske ćelije od polikristalnog silicija

Polikristalne silicijske fotonaponske ćelije, za razliku od monokristalnih silicijskih fotonaponskih ćelija, napravljene su od više manjih kristala što uzrokuje pojavu granica. Kod ovakvih ćelija dolazi do smanjenja izlazne snage zbog granica koje sprječavaju tok elektrona i potiču ih na rekombiniranje sa šupljinama. Polikristalne fotonaponske ćelije imaju nešto manju učinkovitost u odnosu na monokristalne silicijske ćelije, ali proces proizvodnje polikristalnih fotonaponskih ćelija drastično je jeftiniji u odnosu na proces proizvodnje monokristalnih fotonaponskih ćelija. Učinkovitost polikristalnih fotonaponskih modula nalazi se u intervalu od 11 do 15%. Na slici 4.6 vidimo polikristalni fotonaponski modul [25].



Sl. 5.6. Polikristalni fotonaponski modul [25]

### 5.2.3. Tankoslojne fotonaponske ćelije

Polaganjem jako tankim, uzastopnim slojevima molekula, atoma ili iona dobivamo tankoslojne fotonaponske ćelije pa termin „tankoslojni“, odnosno „tanki film“ ne podrazumijeva debljinu filma ili sloja već tehnologiju polaganja. U usporedbi s fotonaponskim ćelijama izrađenim klasičnim tehnologijama, fotonaponske ćelije napravljene tehnologijom tankog filma imaju znatne prednosti [25].

Tankoslojni fotonaponski moduli mogli bi biti dominantni na tržištu fotonaponskih sustava uzimajući u obzir da kompetitivnost fotonaponskog modula određuje cijena po jedinici izlazne snage i vrlo niske proizvodne troškove. Mogu se podijeliti na [25]:

- tankoslojni fotonaponski modul napravljen od amornog silicija
- tankoslojni modul napravljen od bakra, indija, galija i diselenida (engl. *Copper Indium Gallium DiSelenide – CIGS*)
- Tankoslojni modul napravljen od kadmija i telurija (*CdTe*)
- Tankoslojni modul napravljen od bakra, indija i selenida (engl. *Copper Indium Selenide – CIS*)

Modul od amornog silicija ima učinkovitost koja se nalazi se u intervalu od 6 do 8%, a učinkovitost za CIS i CdTe tankoslojne module kreće se u intervalu od 8 do 11%. Slojevi amornog silicija uglavnom se sastoje od amornog sloja silicija debljine 1 mm (slab protok elektrona, ali dobro svojstvo apsorpcije svjetlosti) nakupljenog na poveću površinu (od 5 do 6 m<sup>2</sup>), malog troška proizvodnje, ali i male učinkovitosti (od 4 do 8%). U laboratorijskim uvjetima ostvarena je najviša učinkovitosti u intervalu od 9,5 do 10%. Kemijski stabilni pružajući visoke učinkovitosti modula (do 11%) jesu slojevi od kadmijevog telurida (CdTe). Raznim tehnologijama proizvode se jednostavno i vrlo jeftino. Nakupljanjem na bez-alkalno staklo na temperaturi pri 600 °C postiže se najviša učinkovitost (do 16,5%). Na slici 5.7 vidimo tankoslojni fotonaponski modul.

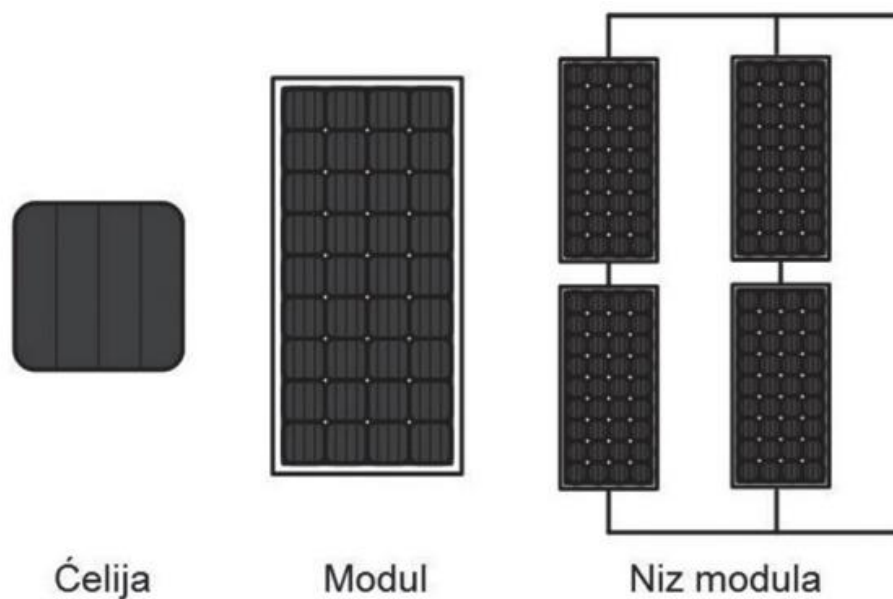


Sl. 5.7. Tankoslojni fotonaponski modul [25]

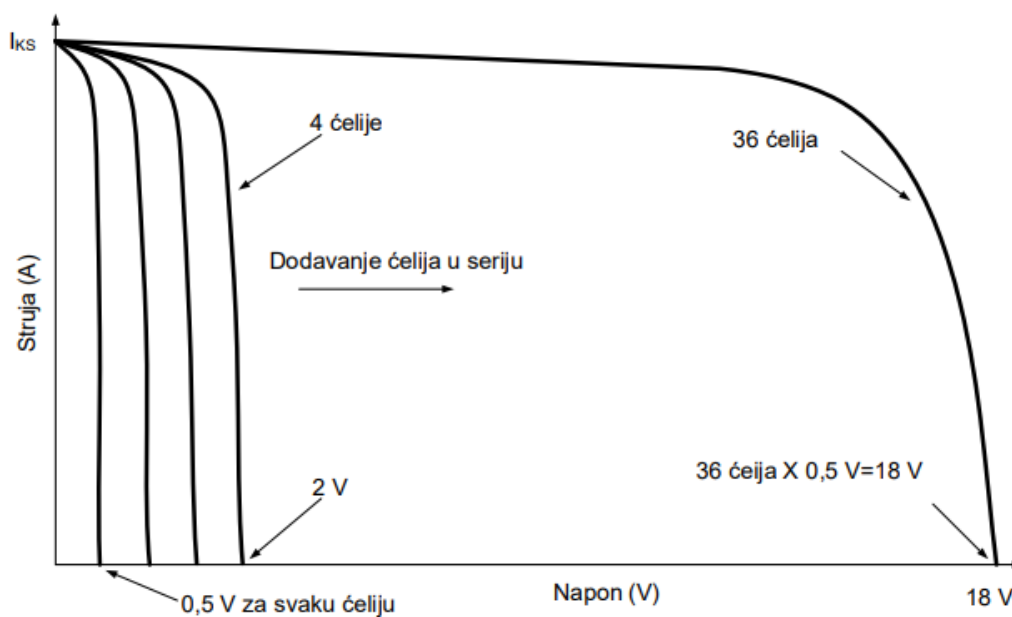
Teoretska učinkovitosti je oko 25%. Daleko veću učinkovitost imaju slojevi od bakar – indij - galij - diselenid - disulfat (CIGS) u usporedbi s ostalim tankoslojnim tehnologijama (u laboratorijskim uvjetima oko 20,1%, prototip modula od 13 do 14%, komercijalni moduli od 7 do 12%). U odnosu na ostale tankoslojne tehnologije, proces proizvodnje je dosta kompliciraniji i skuplji. Troškovi bi se mogli umanjiti smanjenjem korištenja indija ili zamjenom indija nekim drugim elementom koji je jeftiniji. Korištenjem osnovnih procesa smanjili bi se troškovi i povećala učinkovitost do 15% [25].

### 5.3. Fotonaponski moduli

Uzimajući u obzir kako svaka fotonaponska ćelija zasebno proizvodi samo 0,5 V, jedna fotonaponska ćelija rijetko se koristi. Zbog toga osnovni strukturni element fotonaponskog modula je niz serijski povezanih fotonaponskih ćelija. Spajanjem više modula u seriju povećava se napon, a spajanjem paralelno povećava se struja. Za proizvodnju potrebne količine električne energije važno je znati koliko modula spojiti paralelno, a koliko serijski. Spajanjem više modula u niz nazivamo niz modula (stringovi). Slika 5.8 prikazuje razliku između ćelije, modula i niza modula [25].



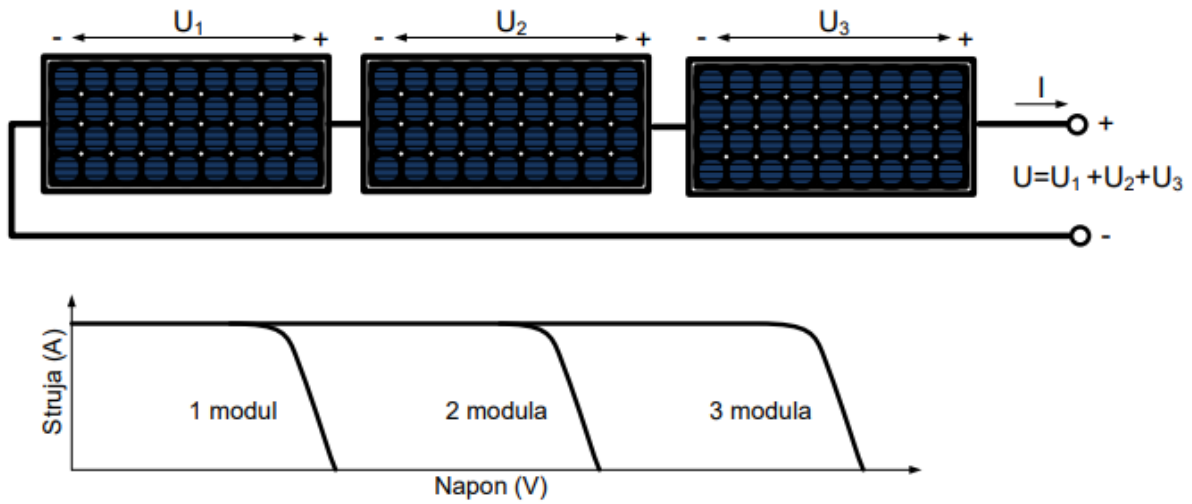
Sl. 5.8. Fotonaponska ćelija, modul i niz modula [25]



Sl. 5.9. I-U karakteristika fotonaponskog modula [21]

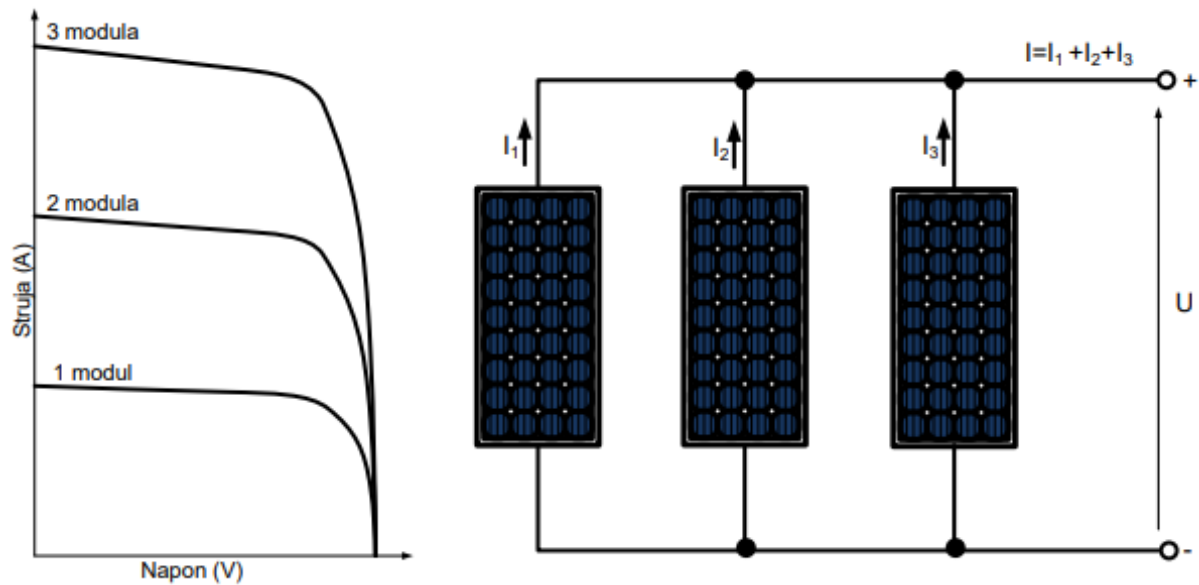


Na slici 5.9. vidimo  $I-U$  karakteristiku fotonaponskog modula. Kod serijski spojenih modula,  $I-U$  karakteristike se nadodavaju duž naponske osi kao što je prikazano na slici 5.10 te ukupnu  $I-U$  karakteristiku dobivamo zbrajanjem svih karakteristika.



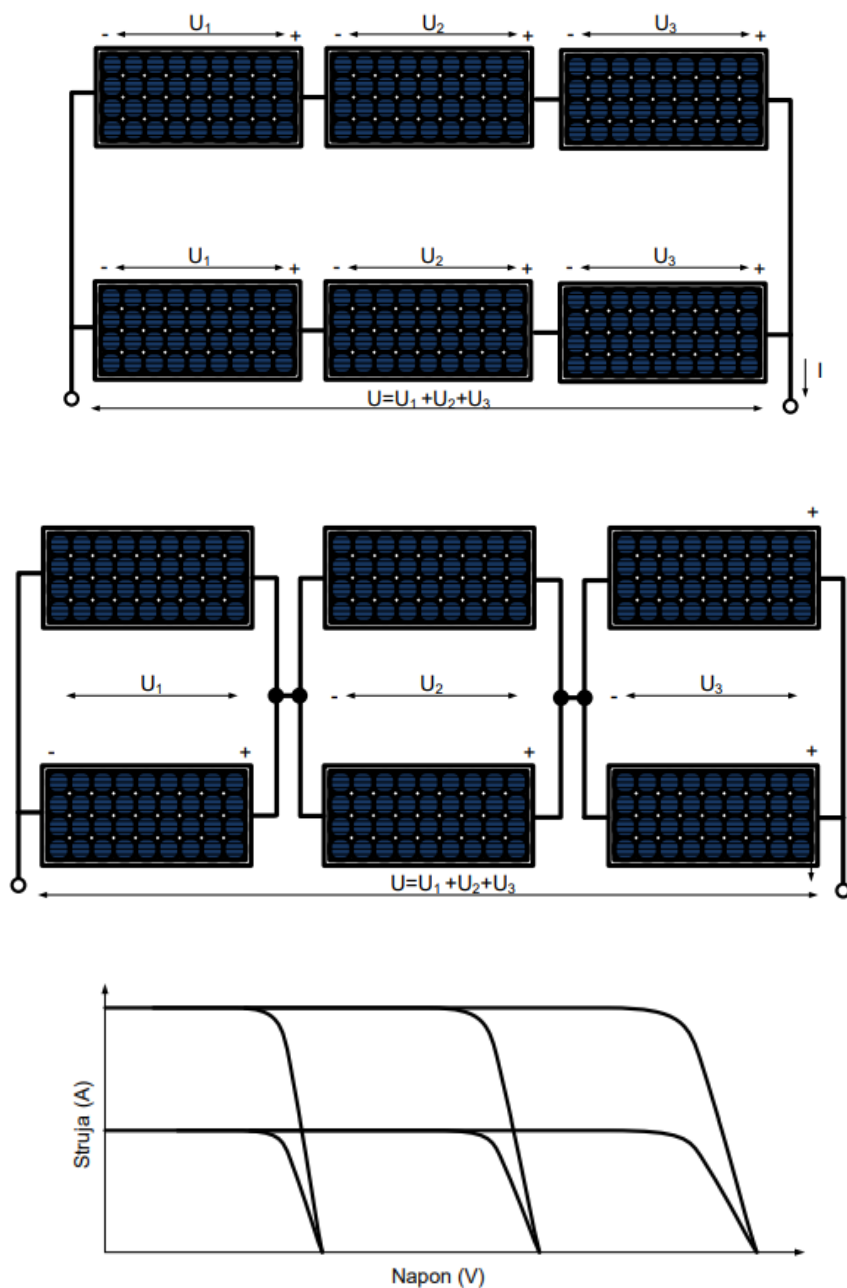
Sl. 5.10.  $I-U$  karakteristika serijski spojenih fotonaponskog modula [21]

Kod paralelno spojenih modula, napon  $I-U$  karakteristike isti je za sve module, a struje se zbrajaju kao što je prikazano na slici 5.11.



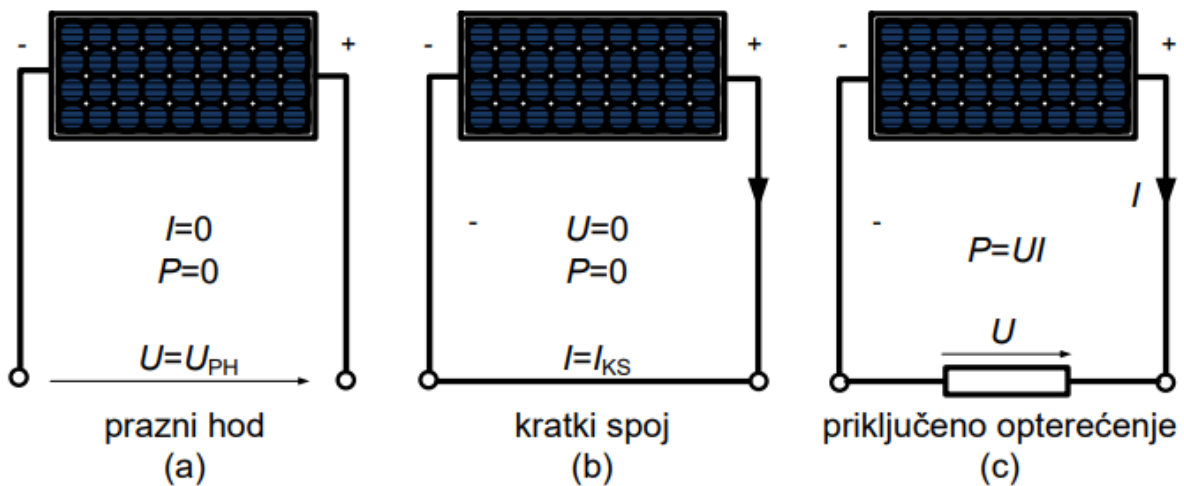
Sl. 5.11.  $I-U$  karakteristika fotonaponskih modula spojenih paralelno [21]

Na slici 5.12. vidimo  $I-U$  karakteristiku kombinirano spojenih fotonaponskog modula.



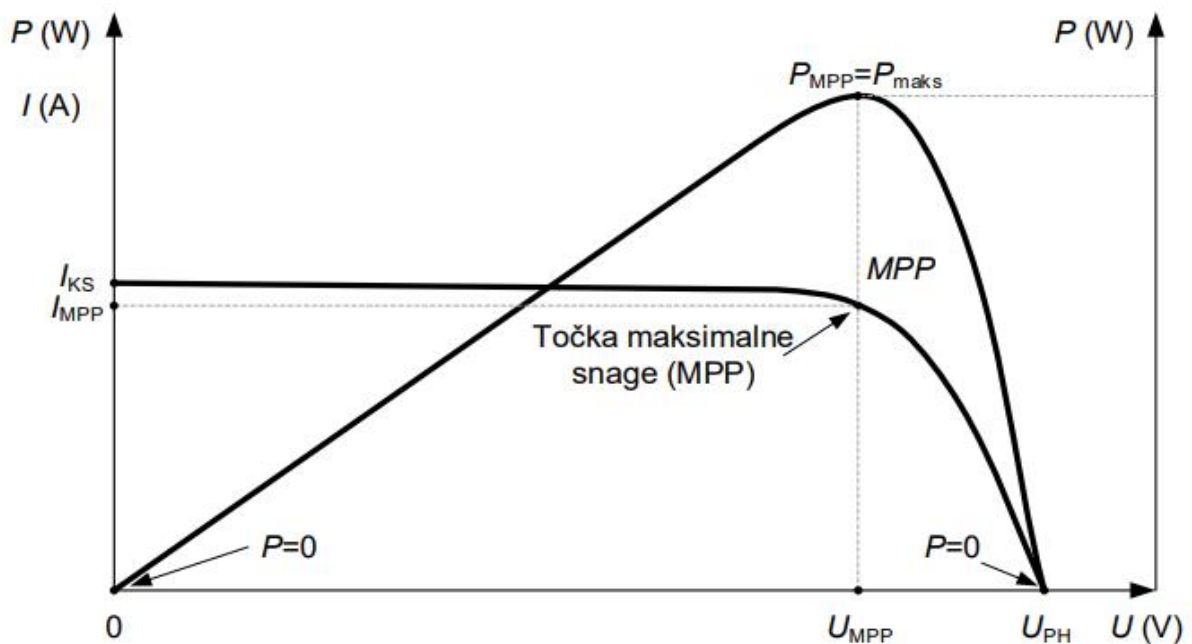
Sl. 5.12.  $I$ - $U$  karakteristika kombinirano spojenih fotonaponskog modula [21]

Fotonaponski modul izložen sunčevom zračenju ima napon praznog hoda  $U_{PH}$  kada su njegove stezaljke otvorene, a struja nula. Ukoliko su stezaljke fotonaponskog modula kratko spojene, kroz stezaljke poteći će struja kratkog spoja  $I_{KS}$ , a napon će biti jednak nuli. Kako je snaga jednaka umnošku napona i struje, ona će u oba slučaja biti nula. Priključivanjem opterećenja na stezaljke fotonaponskog modula, vrijednosti struje i napona biti će različite od nule pa će snaga biti jednaka umnošku struje i napona. Na slici 5.13 prikazana su prazni hod, kratki spoj i priključeno opterećenje.



Sl. 5.13. Prazni hod modula (a), kratki spoj modula (b) i priključeno opterećenje na modul [21]

Na slici 5.14 vidimo  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike s karakterističnim točkama fotonaponskog modula. Točka maksimalne snage nalazi se u točki u kojoj umnožak napona i struje ima najveću vrijednost.



Sl. 5.14.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristika FN modula s karakterističnim točkama [21]

#### 5.4. Tehničke karakteristike FN modula i standardni testni uvjeti (STC)

Tehničke karakteristike ćelije uglavnom su predstavljene tehničkim karakteristikama fotonaponskog modula. [21]. Tehničke karakteristike fotonaponskih modula definirane su pri standardnim testnim uvjetima. Tehnički parametri koji se dobivaju za fotonaponske module jesu [25]:

- ukupna snaga  $P$  ( $W_p$ ) to jest umnožak napona i struje u točki najveće snage (MPP)
- struja kratkog spoja  $I_{SC}$  fotonaponskog modula ostvarena pri standardnim testnim uvjetima kada su stezaljke fotonaponskog modula kratko spojene (A)
- napon otvorenih stezaljki  $U_{OC}$  fotonaponskog modula ostvaren pri standardnim testnim uvjetima kada su stezaljke fotonaponskog modula otvorene (V)
- struja pri najvećoj snazi  $I_{MPP}$  fotonaponskog modula u točki najveće snage (A)
- napon pri najvećoj snazi  $U_{MPP}$  fotonaponskog modula u točki najveće snage (V)
- temperatura ćelije NOCT ( $^{\circ}C$ ) – temperatura koju fotonaponski modul dostiže kada su njegove stezaljke otvorene za sljedeće uvjete: snaga sunčevog zračenja od  $800 \text{ W/m}^2$ , brzinu vjetrova od  $1 \text{ m/s}$  i temperaturu okoline od  $20 \text{ }^{\circ}C$  kada je stražnji dio fotonaponskog modula otvorena
- povećanje struje pri povećanju temperature izraženo u  $\alpha$  ( $\text{mA}/^{\circ}C$ ) ili u ( $\%/^{\circ}C$ )
- smanjenje napona pri povećanju temperature izraženo u  $\beta$  ( $\text{V}/^{\circ}C$ ) ili u ( $\%/^{\circ}C$ )
- smanjenje snage pri povećanju temperature izraženo u  $\gamma$  ( $\%/^{\circ}C$ )
- duljina okvira fotonaponskog modula (mm)
- širina okvira fotonaponskog modula (mm)
- masa cjelokupnog fotonaponskog modula(kg)
- učinkovitost (%)

Nazivne karakteristike FN modula koje se nalaze na natpisnim pločicama, ostvarene su pri testiranju u standardnim testnim uvjetima (engl. *Standard test conditions*, skraćeno STC) . STC podrazumijevaju sljedeće uvjete [25]:

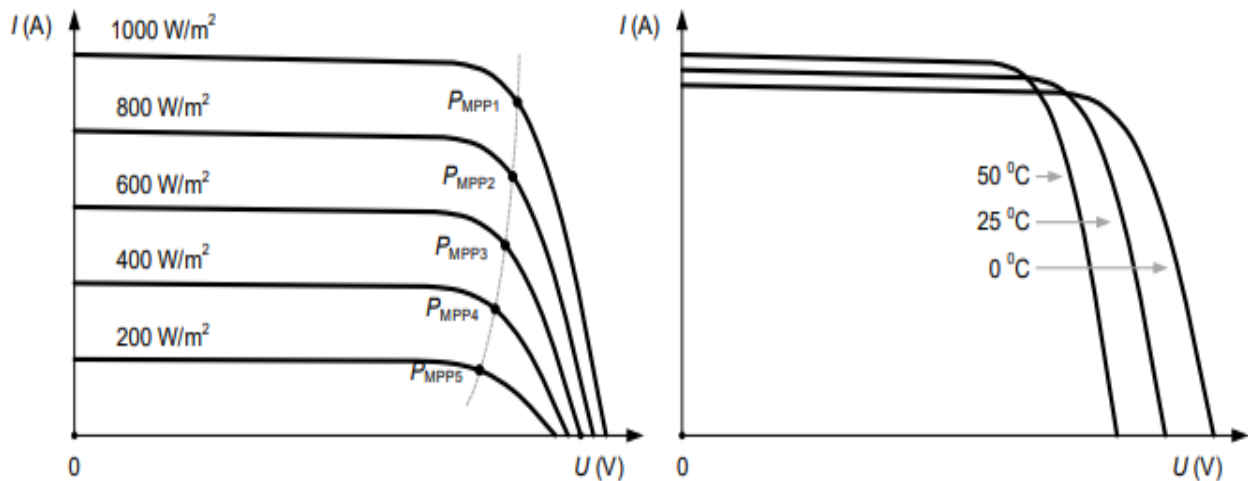
- $1 \text{ kW/m}^2$  snage sunčevog zračenja okomito na ploču
- temperatura ćelije od  $25 \text{ }^{\circ}C$
- Zračna masa (AM) od 1,5 (Zračna masa predstavlja indeks trenda gustoće snage sunčevog zračenja pa utječe na proizvodnju fotonaponskih sustava)

Prema sljedećem izrazu možemo odrediti temperaturu ćelije za različite vanjske uvjete [21]:

$$T_{\text{ćelije}} = T_{\text{okoline}} + \left( \frac{NOCT - 20^\circ}{0,8} \right) \cdot G \quad (5-6)$$

gdje je:

- $G$  – snaga sunčevog zračenja u  $\text{kW/m}^2$
- $T_{\text{ćel}}$  – temperatura fotonaponske ćelije u  $^\circ\text{C}$
- $T_{\text{ćel}}$  – temperatura fotonaponske ćelije u  $^\circ\text{C}$

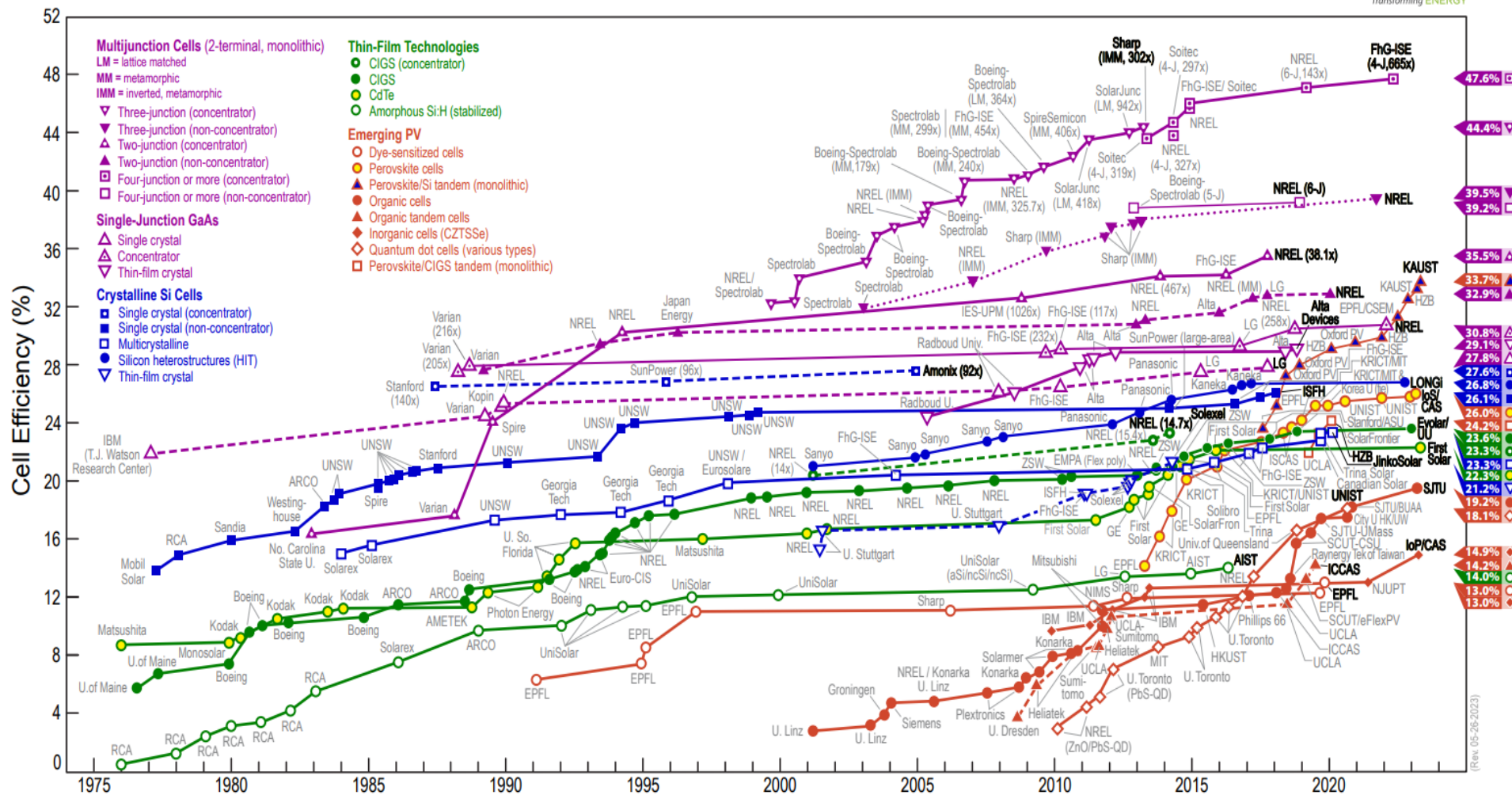


Sl. 5.15. Ovisnost strujno-naponske karakteristike fotonaponske ćelije o jačini zračenja i temperaturi [21]

Na slici 5.15 prikazana je ovisnost strujno-naponske karakteristika fotonaponske ćelije o jačini zračenja i temperaturi.

Nove tehnologije proizvodnje imaju u cilju povećanje slabe učinkovitost fotonaponskih ćelija, a pritom održati niske proizvodne troškove [25]. Slika 5.16 pokazuje znanstveno najbolju postignutu učinkovitost.

# Best Research-Cell Efficiencies



Sl. 5.16. Najbolje vrijednosti učinkovitosti fotonaponskih ćelija [27]

## 6. ISPITIVANJE PERFORMANSI FOTONAPONSKIH MODULA

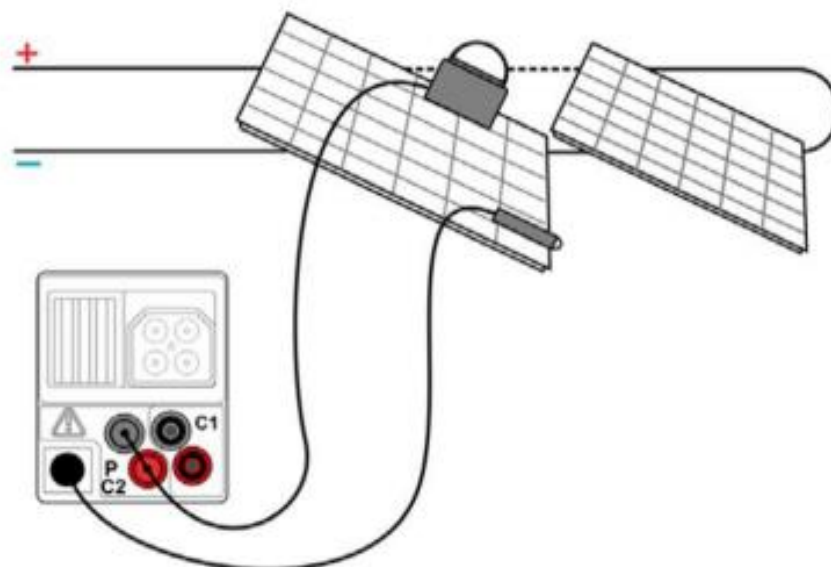
### 6.1. Opis mjernog instrumenta

U ovom radu za ispitivanje performansi fotonaponskih modula koristio se mjerni instrument METREL MI 3108 EUROTTEST PV. Navedeni mjerni instrument može također mjeriti [28]:

- Otpor izolacije fotonaponskih sustava
- Ispitivanje FN izmjenjivača
- Ispitivanje FN modula
- Parametre okoliša (Snagu sunčevog zračenje i temperaturu ćelije)
- Struju kratkog spoja i napon praznog hoda
- Strujno-naponsku karakteristiku.

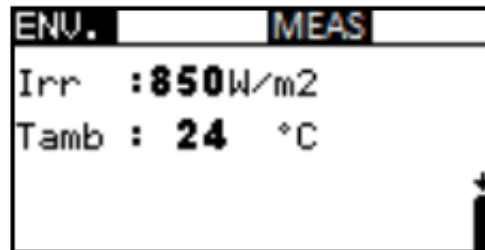
#### 6.1.1. Mjerenje parametara okoliša (Snaga sunčevog zračenje i temperatura ćelije)

Bitni parametri koji su potrebni za analizu performansi jesu snaga sunčevog zračenje i temperatura ćelije. Kako bi izmjerili ova dva parametra potrebno je senzor za mjerenje sunčevog zračenja prisloniti pored. Slika 6.1 prikazuje postupak spajanja mjernog instrumenta s fotonaponskim modulom [28].



Sl. 6.1. Povezivanje uređaja s fotonaponskim modulom [28]

Nakon spajanja mjernog instrumenta i odabira određenih naredbi na zaslonu mjernog instrumenta dobije se vrijednosti parametara temperature ćelije ( $T_{amb}$ ) i sunčevog zračenja ( $Irr$ ) kao što se može primijetiti na slici 6.2.



Sl. 6.2. Primer izmjerenih rezultata [28]

### 6.1.2. Mjerenje strujno-naponske karakteristike

Mjerenje strujno-naponske karakteristike služi za provjeru pravilnog rada fotonaponskog modula. Korištenjem ovog uređaja mogu se uočiti problemi na modulima kao npr. prljavština, zasjenjenje i mogućnost prepoznavanja modula koji je u kvaru ako je modul spojen u niz modula. Uređaj radi mjerenje strujno-naponske karakteristike za izmjerene parametre okoliša (Snaga sunčevog zračenja i temperatura ćelije) i radi estimaciju te karakteristike na STC uvjete (Snaga sunčevog zračenja od  $1000 \text{ W/m}^2$  i temperatura ćelije od  $25 \text{ °C}$ ). Nakon toga tu estimiranu karakteristiku uspoređuje s proizvođačkom. Uređaj estimira mjerene vrijednosti na STC vrijednosti pomoću sljedećih formula [28]:

$$I_{STC} = I_{meas} \cdot (1 + \alpha_{rel} \cdot (T_{STC} - T_{meas})) \cdot \left( \frac{Irr_{STC}}{Irr_{meas}} \right) \quad (6-1)$$

$$U_{STC} = U_{meas} + U_{OC\_meas} \cdot \left( \beta_{rel} \cdot (T_{STC} - T_{meas}) + \alpha \cdot \ln \left( \frac{Irr_{STC}}{Irr_{meas}} \right) \right) - R_S \cdot (I_{STC} - I_{meas}) \quad (6-2)$$

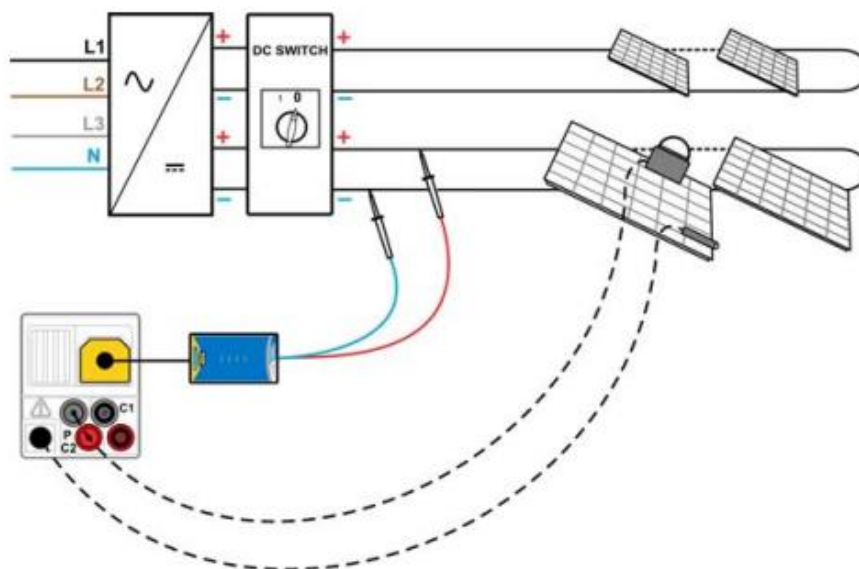
$$R_S = \frac{M}{N} \cdot R_{S_{nom}} \quad (6-3)$$

$$P_{STC} = I_{STC} \cdot U_{STC} \quad (6-4)$$



gdje je:

- $I_{STC}$ ,  $U_{STC}$  – izračunate vrijednosti struje i napona pri standardnim testnim uvjetima
- $I_{meas}$ ,  $U_{meas}$  – izmjerene vrijednosti struje i napona na FN modulu
- $I_{SC}$  – struja kratkog spoja FN modula
- $Irr_{STC}$  – snaga sunčevog zračenja pri STC uvjetima
- $Irr$  – izmjerena snaga sunčevog zračenja
- $\alpha$  – faktor korekcije snage sunčevog zračenja (obično se uzima 0,06)
- $\alpha_{rel}$ ,  $\beta_{rel}$  – temperaturni koeficijent struje i napona FN modula
- $T_{STC}$  – temperatura pri STC uvjetima
- $T_{meas}$  – izmjerena temperatura
- $R_{s_{nom}}$  – serijski otpor FN modula
- $R_s$  – serijski otpor niza modula
- $M$  – broj modula spojenih u seriju
- $N$  – broj modula spojenih paralelno.



Sl. 6.3. Način spajanja za mjerenje  $I$ - $U$  karakteristike [28]

Na slici 6.3 prikazan je način spajanja mjernog instrumenta na fotonaponski modul. Nakon spajanja mjernog instrumenta i odabira određenih naredbi na zaslonu mjernog instrumenta dobiju se karakteristike i parametri kao što je vidljivo na slici 6.4.



Sl. 6.4. Primjer mjerenja  $I$ - $U$  karakteristike [28]

## 6.2. Tehničke karakteristike ispitivanih fotonaponskih modula

Pri ispitivanju performansi fotonaponskih modula koristili smo sljedeće fotonaponske module:

- Polikristalni fotonaponski modul BISOL BMU 250 W
- Monokristalni fotonaponski modul BISOL BMO 250 W
- HIT fotonaponski modul PANASONIC VBHN240SE10

U tablici 6.1 prikazana su električna svojstva polikristalnog fotonaponskog modula BISOL BMU 250 W kod STC (AM 1,5, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C). U tablici 6.2 prikazana su temperaturna svojstva, a u tablici 6.3 prikazana mehanička svojstva navedenog fotonaponskog modula.

Tablica 6.1. Električna svojstva [29]

MODUL	BISOL BMU 250 W
Maksimalna snaga $P_{MPP}$ [W]	250
Struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	8,75
Napon praznog hoda $U_{OC}$ [V]	38,1
Struja maksimalne snage $I_{MPP}$ [A]	8,15
Napon maksimalne snage $U_{MPP}$ [V]	30,2
Učinkovitost ćelije $\eta_C$ [%]	16,8
Učinkovitost modula $\eta_M$ [%]	15,0
Odstupanje snage	0/+5 W
Maksimalni napon sustava	1000 V

Tablica 6.2. Temperaturna svojstva [29]

MODUL	BISOL BMU 250 W
Temperaturni koeficijent struje $\alpha$	+4,9 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona $\beta$	-121 mV/°C
Temperaturni koeficijent snage $\gamma$	-0,40 %/°C
NOCT	44 °C
Temperaturni raspon	od -40 °C do +85 °C

Tablica 6.3. Mehanička svojstva [29]

MODUL	BISOL BMU 250 W
Visina x širina x debljina	1,649 mm x 991 mm x 40 mm
Masa	18,5 kg
Fotonaponske ćelije	60 polikristalnih serijskih povezanih / 156 x 156 mm (6+")
Priključci	TE Connectivity s tri zaobilazne diode – IP67 PV4 (kompatibilan s MC4) – IP68
Okvir	Anodizirani aluminij, rupe za odvodnju/ čvrsti usidreni kutni nosač
Staklo	Kaljeno staklo debljine 3,2 mm / visoka transparentnost / mali udio željeza
Odobreno nominalno opterećenje	5,400 Pa
Mehanička otpornost	Tuča / $\phi$ 25 mm / 83 km/h

U tablici 6.4 prikazana su električna svojstva monokristalnog fotonaponskog modula BISOL BMO 250 W kod STC (AM 1,5, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C). U tablici 6.5 prikazana su temperaturna svojstva, a u tablici 6.6 mehanička svojstva navedenog fotonaponskog modula.

Tablica 6.2. Električna svojstva [30]

MODUL	BISOL BMO 250 W
Maksimalna snaga $P_{MPP}$ [W]	250
Struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	8,80
Napon praznog hoda $U_{OC}$ [V]	37,9
Struja maksimalne snage $I_{MPP}$ [A]	8,20
Napon maksimalne snage $U_{MPP}$ [V]	30,5
Učinkovitost ćelije $\eta_C$ [%]	17,4
Učinkovitost modula $\eta_M$ [%]	15,3
Odstupanje snage	0/+5 W
Najveći napon sustava	1000 V (razred A)

Tablica 6.3. Temperaturna svojstva [30]

MODUL	BISOL BMO 250 W
Temperaturni koeficijent struje $\alpha$	+4,5 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona $\beta$	-132 mV/°C
Temperaturni koeficijent snage $\gamma$	-0,35 %/°C
NOCT	44 °C
Temperaturni raspon	od -40 °C do +85 °C

Tablica 6.4. Mehanička svojstva [30]

MODUL	BISOL BMO 250 W
Visina x širina x debljina	1,649 mm x 991 mm x 40 mm
Masa	18,5 kg
Fotonaponske ćelije	60 polikristalnih serijskih povezanih / 156 x 156 mm (6+")
Električni priključci	TE Connectivity s tri zaobilazne diode – IP67 PV4 (kompatibilni s MC4) – IP68
Okvir	Anodizirani aluminij, rupe za odvodnju/ čvrsti usidreni kutni nosač
Staklo	Kaljeno staklo debljine 3,2 mm / visoka transparentnost / mali udio željeza
Odobreno nominalno opterećenje	5,400 Pa
Mehanička otpornost	Tuča / $\phi$ 25 mm / 83 km/h

U tablici 6.7 prikazana su električna svojstva HIT fotonaponskog modula PANASONIC VBHN240SE10 kod STC (AM 1,5, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C). U tablici 6.8 prikazana su temperaturna svojstva navedenog fotonaponskog modula, a u tablici 6.9 mehanička svojstva.

Tablica 6.7. Električna svojstva [31]

MODUL	PANASONIC VBHN240SE10
Maksimalna snaga $P_{MPP}$ [W]	240
Struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	5,85
Napon praznog hoda $U_{OC}$ [V]	52,4
Struja maksimalne snage $I_{MPP}$ [A]	5,51
Napon maksimalne snage $U_{MPP}$ [V]	43,7
Učinkovitost ćelije $\eta_C$ [%]	17,4
Učinkovitost modula $\eta_M$ [%]	15,3
Odstupanje snage	+10/-5 %
Najveći napon sustava	1000 V

Tablica 6.8. Temperaturna svojstva [31]

MODUL	PANASONIC VBHN240SE10
Temperaturni koeficijent struje $\alpha$	+1,76 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona $\beta$	-0,131 mV/°C
Temperaturni koeficijent snage $\gamma$	-0,29 %/°C
NOCT	44 °C
Temperaturni raspon	/

Tablica 6.9. Mehanička svojstva [31]

MODUL	PANASONIC VBHN240SE10
Visina x širina x debljina	1580 mm x 798 mm x 35 mm
Masa	15 kg
Fotonaponske ćelije	127 mm HIT solarne ćelije
Električni priključci	MC3 ili SMK
Okvir	Crni anodizirani aluminij
Staklo	Kaljeno staklo obloženo antirefleksnim slojem
Odobreno nominalno opterećenje	/
Mehanička otpornost	/

### 6.3. Mjerenje i analiza rezultata mjerenja

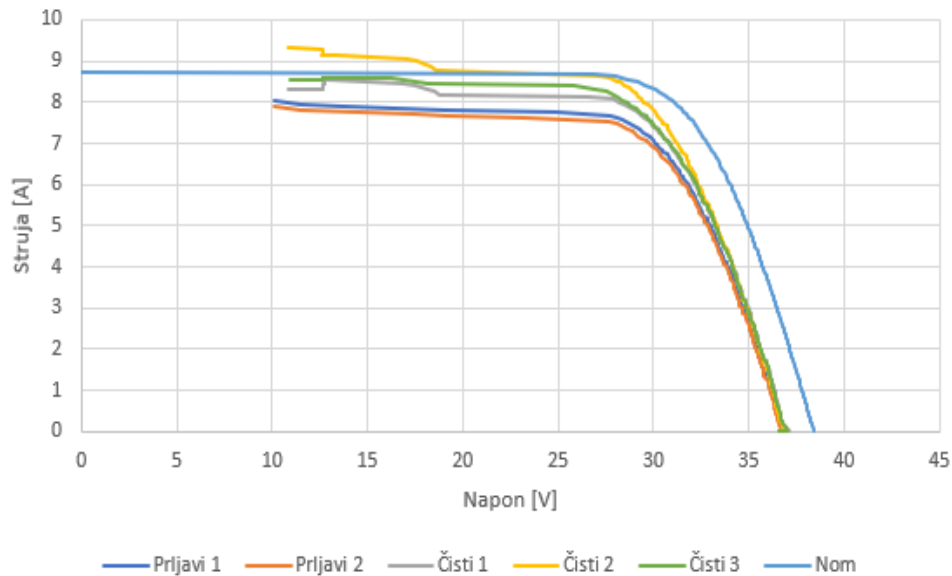
Mjerene su performanse polikristalnog fotonaponskog modula BISOL BMU 250 W, monokristalnog fotonaponskog modula BISOL BMO 250 W i HIT fotonaponskog modula PANASONIC VBHN240SE10. Prvo su se mjerile performanse unutarnjih modula (moduli koji se nalaze u laboratoriju) te su onda mjerene performanse vanjskih modula (moduli koji se nalaze na krovu), prije i poslije njihovog čišćenja. Mjerenja su vršena više puta radi provjere točnosti mjernog instrumenta i mjerne metode. Nakon dobivenih vrijednosti napravljene su  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike i tablice pomoću kojih će se analizirati i uspoređivati performanse modula. Uspoređivati će se performanse vanjskih modula prije i poslije njihovog čišćenja i performanse unutarnjih modula sa performansama vanjskih čistih modula. Na slici 5.5 možemo vidjeti fotonaponske module koji se nalaze na krovu fakulteta.



Sl. 6.5. Fotonaponski moduli koji se nalaze na krovu fakulteta

### 6.3.1. Polikristalni fotonaponski modul BISOL BMU 250 W

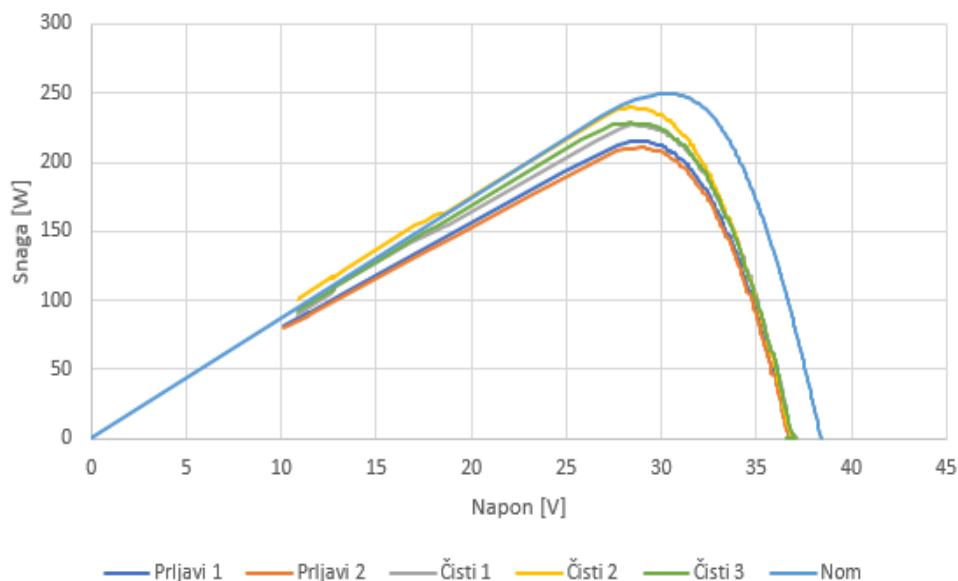
Na slici 6.6 prikazana je  $I-U$  karakteristika FN modula BISOL BMU 250 W pomoću koje će se usporediti performanse prljavog i čistog modula. Na grafu je vidljivo da ovaj FN modul ima malo bolje performanse nakon čišćenja no i dalje slabije performanse u usporedbi s nominalnom karakteristikom (na grafu označena s „Nom“) odnosno karakteristikom koju proizvođač daje i garantira da će modul imati takve performanse.



Sl. 6.6.  $I-U$  karakteristika (Usporedba prljavog i čistog modula)

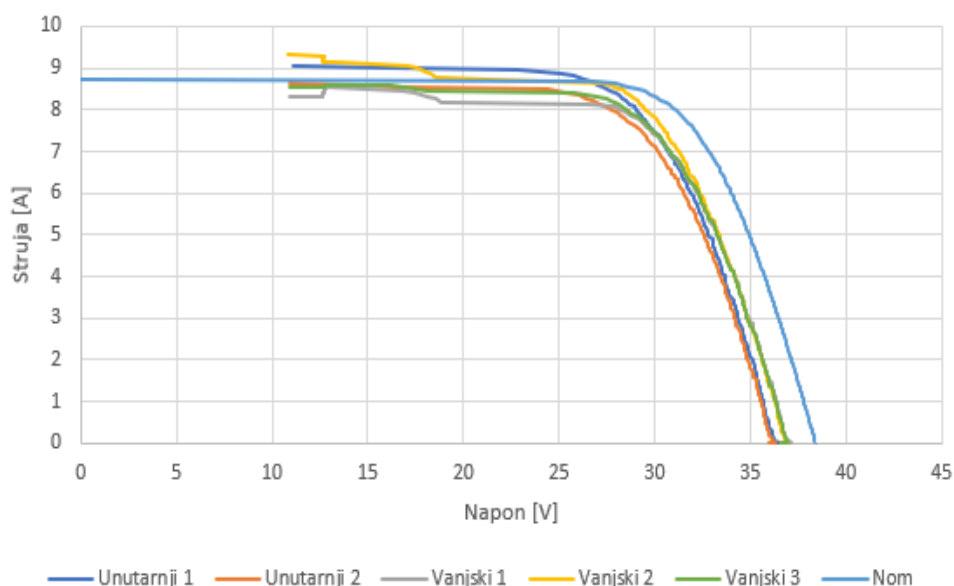
Na slici 6.7 prikazana je  $P-U$  karakteristika FN modula BISOL BMU 250 W pomoću koje će se usporediti performanse prljavog i čistog modula. Karakteristike prljavog i čistog modula podudaraju se od točke praznog hoda do točke maksimalne snage. Od točke maksimalne snage do točke kratkog spoja vidljivo je kako su karakteristike čistog modula bliže nominalnoj karakteristici za razliku od karakteristika prljavog modula.





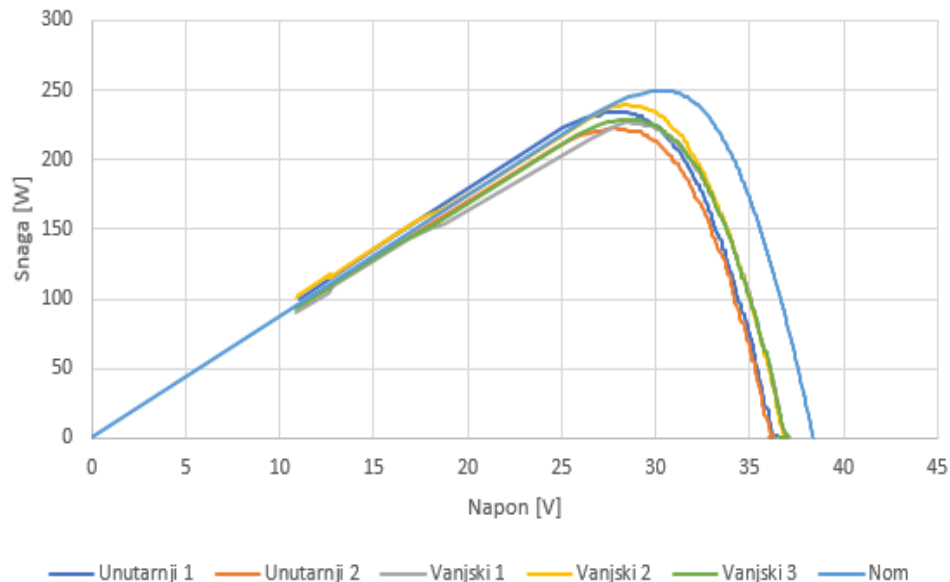
Sl. 6.7.  $P-U$  karakteristika (Usporedba priljavog i čistog modula)

Na slici 6.8 prikazana je  $I-U$  karakteristika FN modula BISOL BMU 250 W pomoću koje će se usporediti performanse unutarnjeg modula s performansama vanjskog modula. Vidljivo je kako su karakteristike unutarnjeg i vanjskog modula jako slične od točke praznog hoda do točke maksimalne snage ali i dalje različite od nominalne karakteristike. Od točke maksimalne snage do točke kratkog spoja vidimo da su karakteristike promjenjive zbog promjenjivih vremenskih uvjeta na dan mjerenja kao što su temperatura i promjena snage sunčevog zračenja zbog oblaka.



Sl. 6.8.  $I-U$  karakteristika (Usporedba unutarnjeg modula s vanjskim)

Na slici 6.9 prikazana je  $P-U$  karakteristika FN modula BISOL BMU 250 W pomoću koje će se usporediti performanse unutarnjeg modula s performansama vanjskog modula. Na grafu se može primijetiti da su karakteristike unutarnjeg i vanjskog modula od točke praznog hoda do točke maksimalne snage identične, ali različite od nominalne karakteristike. Od točke maksimalne snage do točke kratkog spoja može se primijetiti kako se sve karakteristike izjednačavaju.



Sl. 6.9.  $P-U$  karakteristika (Usporedba unutarnjeg modula s vanjskim)

U tablici 6.10 za parametre  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$  i  $P_{MPP}$  prikazana su odstupanja izmjerenih vrijednosti od nominalnih vrijednosti odnosno vrijednosti koje daje proizvođač. Za parametar  $FF$  prikazana je njegova vrijednost koja je izražena u postocima. Negativno odstupanje predstavlja lošije performanse u odnosu na nominalne vrijednosti, a pozitivno odstupanje predstavlja bolje performanse od nominalnih vrijednosti. Iako odstupanja variraju skoro za svaki parametar, ako pogledamo odstupanja maksimalne snage, može se primijetiti kako najveće negativno odstupanje maksimalne snage ima prljavi vanjski modul, a najmanje unutarnji modul. Može se zaključiti da taloženje prljavštine i degradacija utječu na performanse modula.

Tablica 6.10. Odstupanja izmjerenih vrijednosti od nominalnih vrijednosti pri STC

Veličina	Prljavi vanjski	Čisti vanjski	Unutarnji
$U_{OC}$ [V]	-3,9 %	-3,4 %	-5,0 %
$I_{SC}$ [A]	-9,8 %	-4,8 %	3,6 %
$U_{MPP}$ [V]	-5,2 %	-7,0 %	-7,1 %
$I_{MPP}$ [A]	-11,4 %	-3,8 %	1,1 %
$FF$ [%]	72,1	72,3	71,0
$P_{MPP}$ [W]	-16,0 %	-10,5 %	-6,1 %

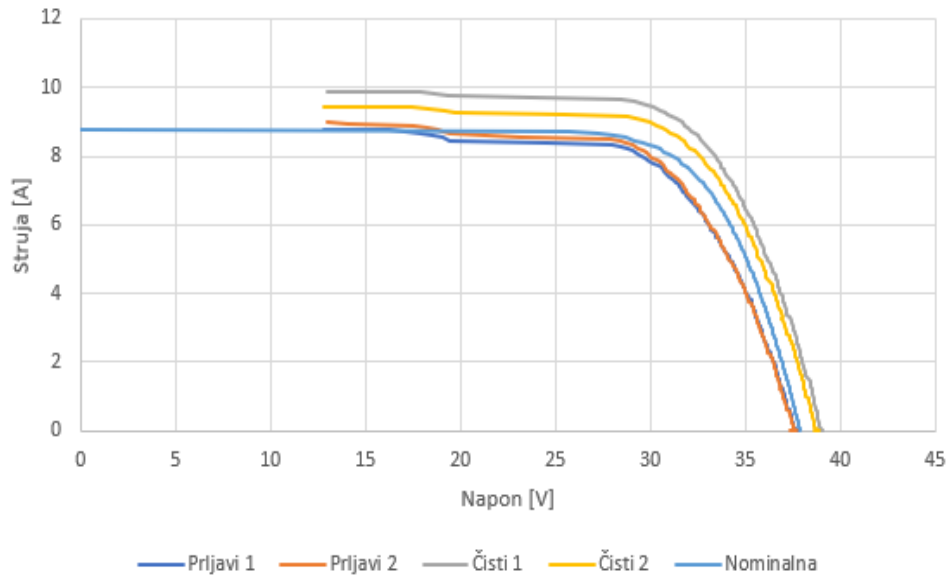
Na slici 6.10 prikazana je polikristalni modul BISOL BMU slikan za vrijeme provođenja mjerenja.



Sl. 6.10. Fotonaponski modul BISOL BMU

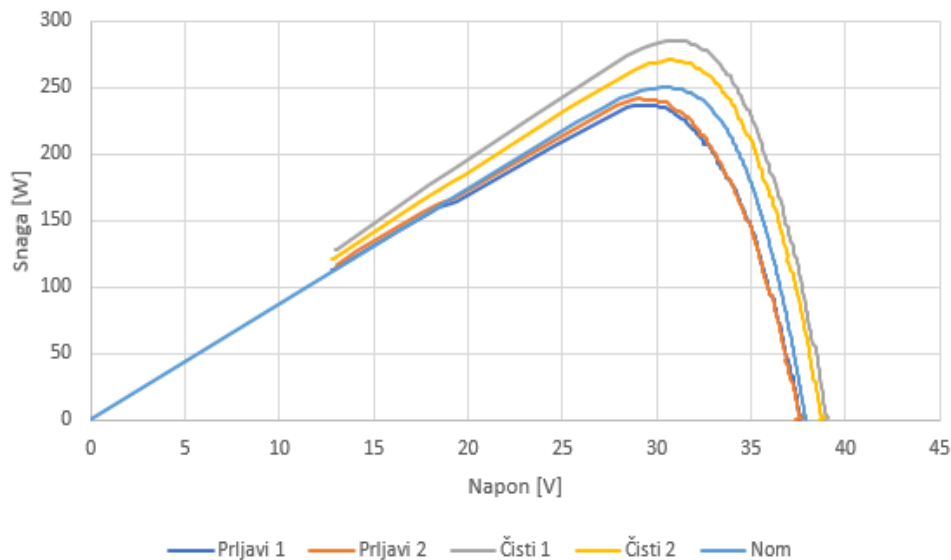
### 6.3.2. Monokristalni fotonaponski modul BISOL BMO 250 W

Na slici 5.11 prikazana je  $I-U$  karakteristika FN modula BISOL BMO 250 W pomoću koje će se usporediti performanse prljavog i čistog modula. Iz grafa se može vidjeti kako su karakteristike prljavog modula jako slične nominalnoj karakteristici dok karakteristike čistog modula imaju bolje vrijednosti od nominalnih što znači da čisti modul ima puno bolje performanse od očekivanih. Ova pojava je neočekivana te zbog promjenjivih vremenskih uvjeta moglo je doći do blagih odstupanja u mjerenjima. Kako bi se ove performanse potvrdile potrebno je provesti dodatna mjerenja u boljim vremenskim uvjetima kada snaga sunčevog zračenja nije toliko promjenjiva zbog oblaka.



Sl. 6.11.  $I$ - $U$  karakteristika (Usporedba prljavog i čistog modula)

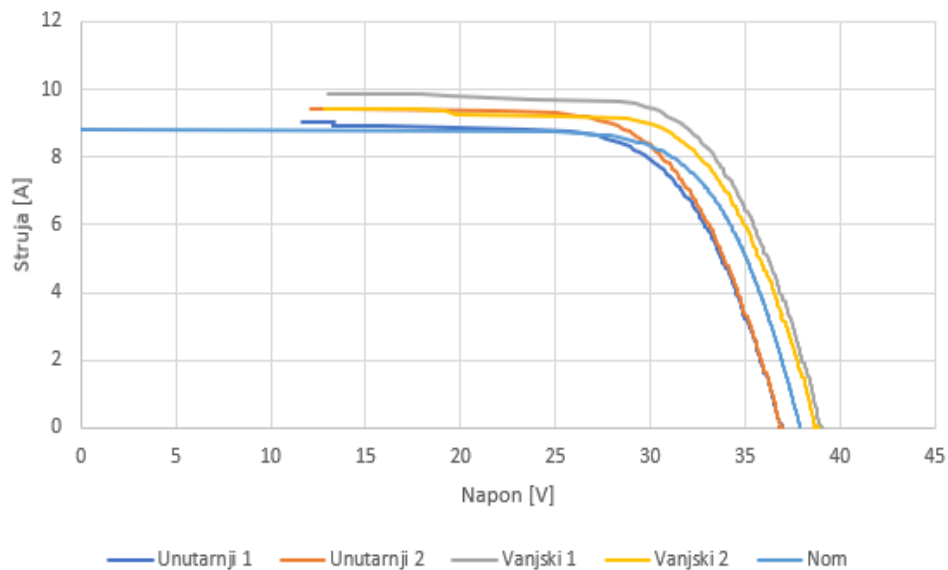
Na slici 6.12 prikazana je  $P$ - $U$  karakteristika FN modula BISOL BMO 250 W pomoću koje će se usporediti performanse prljavog i čistog modula. Vidljivo je kako karakteristika čistog modula ima veću maksimalnu snagu od nominalne karakteristike dok karakteristika prljavog modula ima slabiju maksimalnu snagu od nominalne karakteristike.



Sl. 6.12.  $P$ - $U$  karakteristika (Usporedba prljavog i čistog modula)

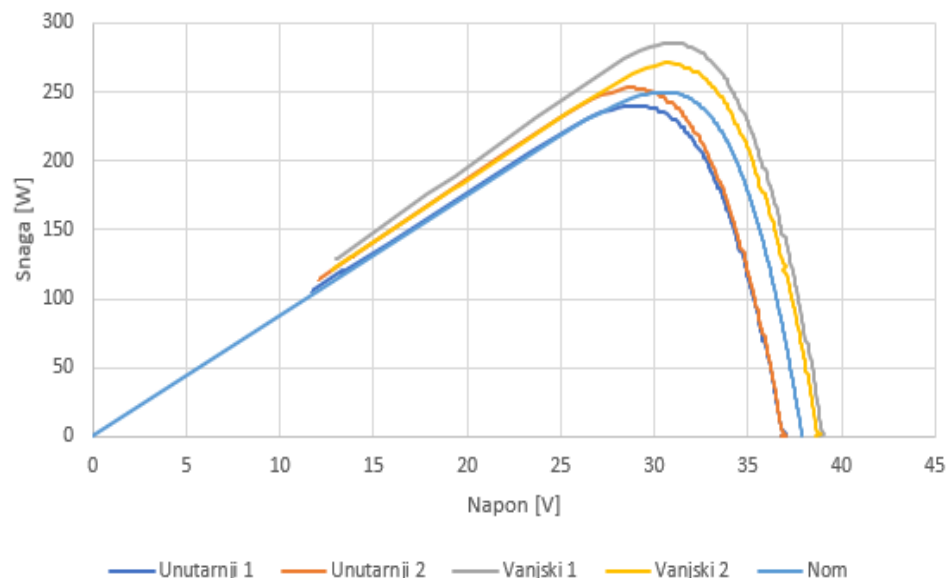
Na slici 6.13 prikazana je  $I$ - $U$  karakteristika FN modula BISOL BMO 250 W pomoću koje će se usporediti performanse unutarnjeg modula s performansama vanjskog modula. Od točke praznog hoda do točke maksimalne snage vidljivo je da unutarnji modul ima lošije performanse u odnosu na nominalnu karakteristiku, a vanjski modul bolje performanse u odnosu na nominalnu

karakteristiku što je neočekivano. Zbog promjenjive snage sunčevog zračenja zbog oblaka na dan mjerenja moglo je doći do pogreške ili odstupanja u mjerenjima.



Sl. 6.13.  $I$ - $U$  karakteristika (Usporedba unutarnjeg i vanjskog modula)

Na slici 6.14 prikazana je  $P$ - $U$  karakteristika FN modula BISOL BMO 250 W pomoću koje će se usporediti performanse unutarnjeg modula s performansama vanjskog modula. Karakteristike vanjskog modula postižu veću snagu u usporedbi s karakteristikama unutarnjeg modula i nominalnom karakteristikom.



Sl. 6.14.  $P$ - $U$  karakteristika (Usporedba unutarnjeg i vanjskog modula)

U tablici 5.11 prikazana su odstupanja izmjenjenih vrijednosti od nominalnih vrijednosti pri STC za FN modul BISOL BMO 250 W. Iz tablice može se vidjeti kako čisti vanjski modul ima najveće

pozitivno odstupanje maksimalne snage što znači da ima bolje performanse od nominalnih vrijednosti odnosno vrijednosti koje proizvođač daje. Prljavi vanjski modul ima nešto manje odstupanje od čistog vanjskog, ali negativno što znači da on ima lošije performanse od nominalnih vrijednosti.

Tablica 6.11. Odstupanja izmjerenih vrijednosti od nominalnih vrijednosti pri STC

Veličina	Prljavi vanjski	Čisti vanjski	Unutarnji
$U_{OC}$ [V]	-0,3 %	3,1 %	-2,4 %
$I_{SC}$ [A]	-0,2 %	12,5 %	2,7 %
$U_{MPP}$ [V]	-5,8 %	0,3 %	-7,3 %
$I_{MPP}$ [A]	-2,3 %	10,2 %	0,3 %
$FF$ [%]	69.4	71,5	69.5
$P_{MPP}$ [W]	-7,9 %	10,6 %	-7,0 %

Na slici 6.15 prikazan je monokristalni modul BISOL BMO slikan za vrijeme provođenja mjerenja.

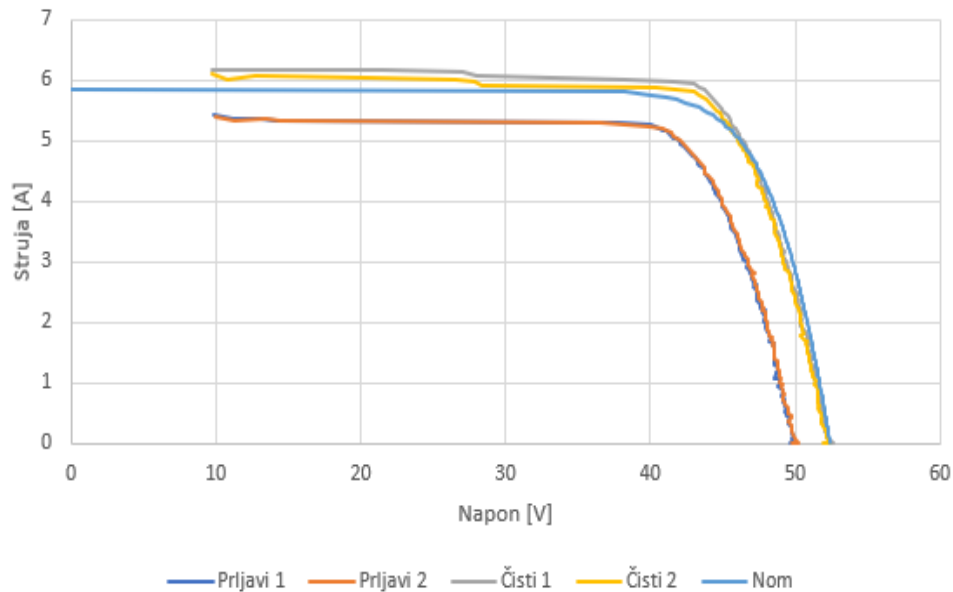


Sl. 6.15. Fotonaponski modul BISOL BMO

### 6.3.3. HIT fotonaponski modul PANASONIC VBHN240SE10

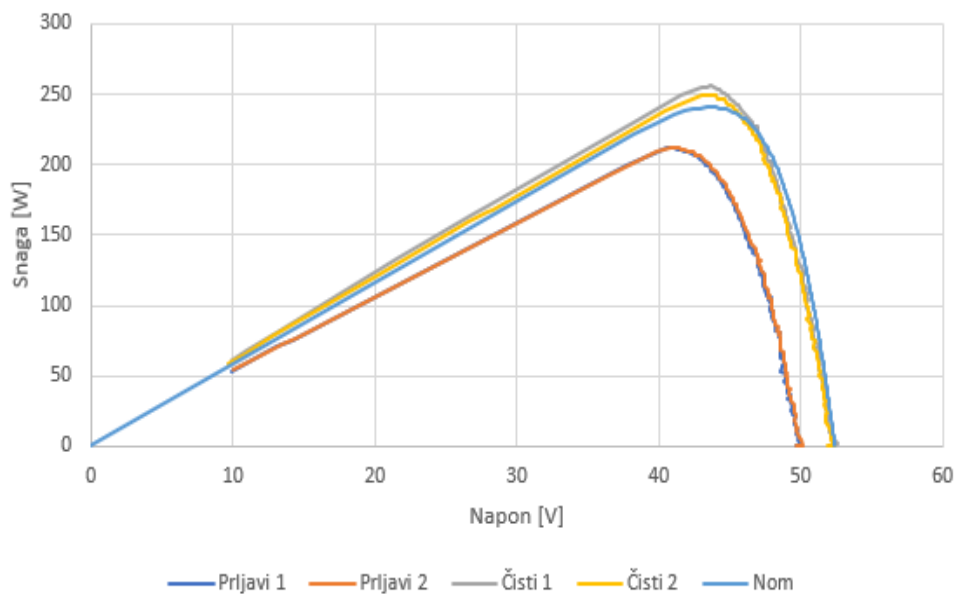
Na slici 6.16 prikazana je  $I-U$  karakteristika fotonaponskog modula PANASONIC VBHN240SE10 pomoću koje će se usporediti performanse prljavog i čistog modula. Iz grafa se može vidjeti kako karakteristike čistog modula i nominalna karakteristika imaju jako slične

vrijednosti dok karakteristika prljavog modula ima manje vrijednosti od nominalnih i lošije performanse u odnosu na čisti modul.



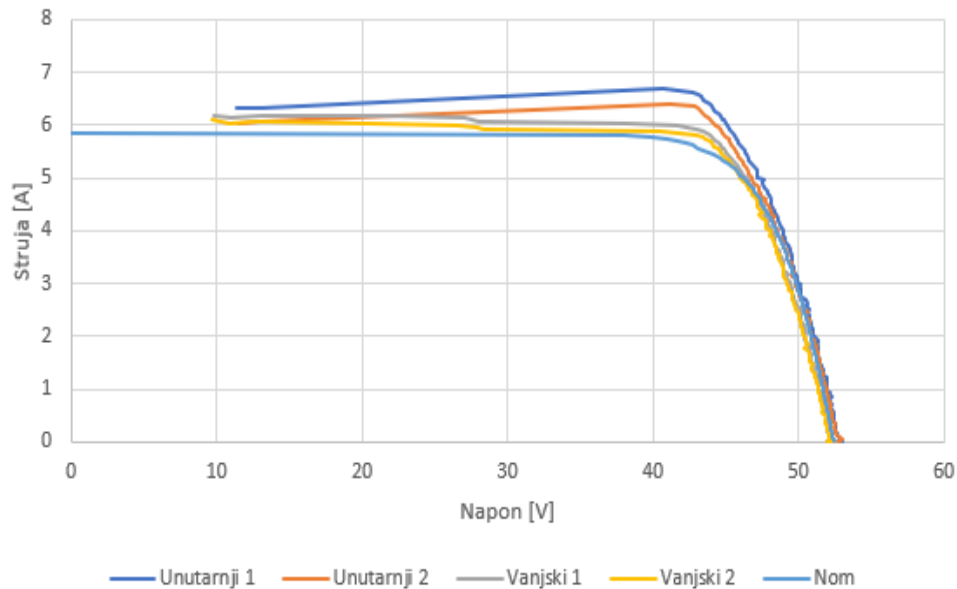
Sl. 6.16.  $I-U$  karakteristika (Usporedba prljavog i čistog modula)

Na slici 6.17 prikazana je  $P-U$  karakteristika FN modula PANASONIC VBHN240SE10 pomoću koje će se usporediti performanse prljavog i čistog modula. Vidljivo je kako su karakteristike čistog modula i nominalna karakteristika identične dok se karakteristike prljavog modula razlikuju i tek blizu točke kratko spoja približavaju karakteristikama čistog modula i nominalnoj karakteristici. Možemo vidjeti da modul ima veću maksimalnu snagu nakon čišćenja.



Sl. 6.17.  $P-U$  karakteristika (Usporedba prljavog i čistog modula)

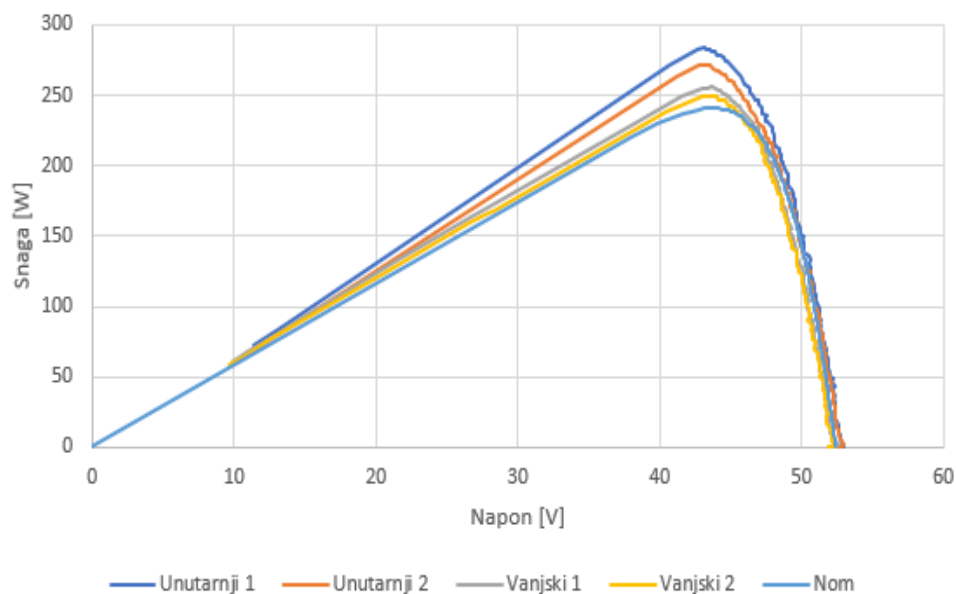
Na slici 6.18 prikazana je  $I-U$  karakteristika FN modula PANASONIC VBHN240SE10 pomoću koje će se usporediti performanse unutarnjeg modula s performansama vanjskog modula. Vidimo kako su sve karakteristike identične od točke praznog hoda do točke maksimalne snage. Oko točke maksimalne snage one se počinju razlikovati i onda se polako počinju izjednačavati prema točki kratkog spoja.



Sl. 6.18.  $I-U$  karakteristika (Usporedba unutarnjeg i vanjskog modula)

Na slici 6.19 prikazana je  $P-U$  karakteristika FN modula PANASONIC VBHN240SE10 pomoću koje ćemo usporediti performanse unutarnjeg modula s performansama vanjskog modula. U ovom slučaju vidimo kako unutarnji modul i vanjski modul imaju bolje performanse u odnosu na performanse koje proizvođač daje s nominalnom karakteristikom. Također se može primijetiti da najveću maksimalnu snagu ima karakteristika unutarnjeg modula, a nominalna karakteristika najmanju maksimalnu snagu.





Sl. 6.19.  $P$ - $U$  karakteristika (Usporedba unutarnjeg i vanjskog modula)

U tablici 6.12 prikazana su odstupanja izmjerenih vrijednosti od nominalnih vrijednosti pri STC za FN modul PANASONIC VBHN240SE10. Vidimo da unutarnji modul ima jako veliko pozitivno odstupanje maksimalne struje i maksimalne snage, a prljavi vanjski ima veliko negativno odstupanje maksimalne snage od nominalnih vrijednosti. Može se primijetiti kako unutarnji modul ima daleko bolje performanse u odnosu na prljavi i čisti modul te nominalne vrijednosti.

Tablica 6.12. Odstupanja izmjerenih vrijednosti od nominalnih vrijednosti pri STC

Veličina	Prljavi vanjski	Čisti vanjski	Unutarnji
$U_{OC}$ [V]	-4,8 %	0,1 %	0,8 %
$I_{SC}$ [A]	-7,2 %	5,7 %	8,3 %
$U_{MPP}$ [V]	-11,0 %	-1,9 %	-1,2 %
$I_{MPP}$ [A]	-5,1 %	6,0 %	19,6 %
$FF$ [%]	75,1	77,3	85,0
$P_{MPP}$ [W]	-15,2 %	4,4 %	18,5 %

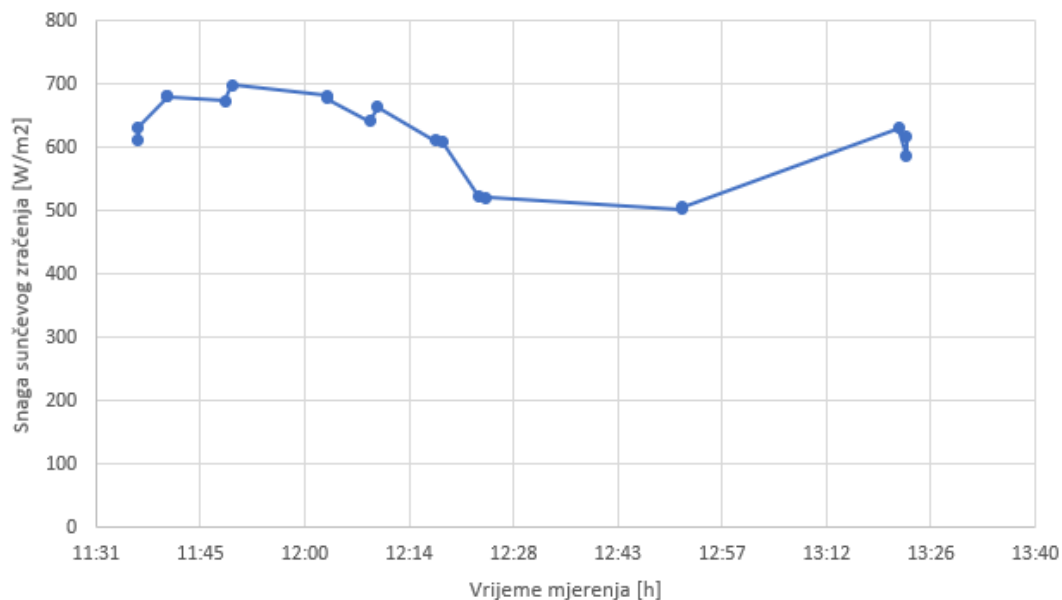
Na slici 6.20 prikazan HIT fotonaponski modul PANASONIC VBHN240SE10 slikan za vrijeme provođenja mjerenja.



Sl. 6.20. Fotonaponski modul PANASONIC VBHN240SE10

#### 6.3.4. Vremenski uvjeti tijekom ispitivanja

Na slici 6.21 vidimo graf koji pokazuje promjenu snage sunčevog zračenja  $G$  ovisno o vremenu mjerenja. Vidimo kako je snaga sunčevog zračenja bila jako promjenjiva tijekom provođenja mjerenja zbog oblačnoga vremena što je utjecalo na rezultate mjerenja jer se snaga sunčevog zračenja koristi za estimaciju strujno-naponske karakteristike. Mjerenja bi bila preciznija da su vremenski uvjeti bili stabilniji i snaga sunčevog zračenja iznosila bliže  $1000 \text{ W/m}^2$ .



Sl. 6.21. Promjena snage sunčevog zračenja  $G$  ovisno u vremenu mjerenja

## 7. ZAKLJUČAK

Nakon teorijske podloge o fotonaponskim ćelijama, modulima i samoj pretvorbi sunčeve energije u električnu energiju te izvršenim mjerenjima na različitim modulima, prema izmjerenim i analiziranim podacima zaključujemo kako većina modula imaju očekivane rezultate i performanse u odnosu na tvorničke vrijednosti. Dok neki moduli imaju bolje performanse od tvorničkih vrijednosti što je neočekivano i gotovo nemoguće zbog slojeva prljavštine na modulima i degradacije modula zbog starosti i eksploatacije. Razlog takvim neočekivanim rezultatima mjerenja je promjenjivo vrijeme, odnosno vrlo promjenjiva i mala snaga sunčevog zračenja zbog oblačnog vremena na dan ispitivanja performansi modula. Kako se snaga sunčevog zračenja koristi za estimaciju strujno-naponske karakteristike, ispitivanja performansi trebala bi se provoditi tijekom stabilnijih vremenskih uvjeta uz što veću snagu sunčevog zračenja odnosno bližu  $1000 \text{ W/m}^2$  da bi dobili preciznije rezultate mjerenja i kako ne bi došlo do povećih odstupanja.

## LITERATURA

- [1] Koester L., Lindig S., Louwen A., Astigarraga A., Manzolini G., Moser D. (2022) Renewable and Sustainable Energy Reviews, 165, art. no. 112616.
- [2] Appiah Albert Yaw, Zhang Xinghua, Ayawli Ben Beklisi Kwame, Kyeremeh Frimpong. Review and performance evaluation of photovoltaic array fault detection and diagnosis techniques. Int J Photoenergy 2019;2019:1-19.
- [3] Wohlgemuth John H. Photovoltaic module reliability. Wiley; 2020, p.264, ISBN: 978-1-119-45899-9
- [4] Peng Peng, Hu Anming, Zheng Wenda, Su Peter, He David, Oakes Ken D, et al. Microscopy study of snail trail phenomenon on photovoltaic modules. RSC Adv 2012;2(30):11359.
- [5] Kontges Marc, Oreski Gernot, Herz Magnus, Jahn Ulrike, Hacke Peter, Weiss Karl-Anders. IEA PVPS task 13, subtask 3: assessment of photovoltaic module failures in the field. Report, International Energy Agency; 2017.
- [6] Luo Wei, Khoo Yong Sheng, Hacke Peter, Naumann Volker, Lausch Dominik, Harvey Steven P, et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review. Energy Environ Sci 2017;10(1):43-68.
- [7] Hallam Brett, Herguth Axel, Hammer Philip, Nampalli Nitin, Wilking Svenja, Abbott Malcolm, et al. Eliminating light-induced degradation in commercial p-type Czochralski Silicon solar cells. Appl Sci 2017;8(1):10.
- [8] Chen Daniel, Vaqueiro Contreras Michelle, Ciesla Alison, Hamer Philip, Hallam Brett, Abbott Malcolm, et al. Progress in the understanding of light and elevated temperature induced degradation in silicon solar cells: A review. Prog Photovolt, Res Appl 2020;pip.3362.
- [9] Herz Magnus, Friesen Gabi, Jahn Ulrike, Kontges Marc, Lindig Sascha, Moser David. IEA PVPS task 13: performance, operation and reliability of photovoltaic systems – quantification of technical risks in PV power systems. Technical report, International Energy Agency; 2021, p.111.
- [10] Kontges Marc, Kurtz Sarah, Packard Corinne, Jahn Ulrike, Berger Karl A, Kato Kazuhiko. IEA PVPS task 13: performance and reliability of photovoltaic systems: subtask 3.2: review of failures of photovoltaic modules. Technical report, Sankt Ursen: International Energy Agency; 2014.

- [11] Haque Ahteshamul, Bharath Kurukuru Varaha Satya, Khan Mohammed Ali, Khan Irshad, Jaffery Zainul Abdin. Fault diagnosis of photovoltaic modules. *Energy Sci Eng* 2019;7(3):622-44.
- [12] IEC 61215-2:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – design qualification and type approval – part 2: Test procedures. Standard, 2.0 ed.. Geneva, CH: International Electrotechnical Commission (IEC); 2021.
- [13] IEC 61215-1:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – design qualification and type approval – part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules. Standard, 2.0 ed.. Geneva, CH: International Electrotechnical Commission (IEC); 2021.
- [14] IEC62446-3. Photovoltaic (PV) systems – requirements for testing, documentation and maintenance – part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography. IEC TS 62446-3:2017, Geneva, CH: International Electrotechnical Commission; 2017.
- [15] Kontges Marc, Morlier Arnaud, Eder Gabriele, Fleis Eckhard, Kubicek Bernhard, Lin Jay. Review: Ultraviolet fluorescence as assessment tool for photovoltaic modules. *IEEE J Photovolt* 2020;10(2):616-33.
- [16] Reinders Angele, Verlinden Pierre, Sark Wilfried van, Freundlich Alexandre, editors. *Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd; 2017.
- [17] IEC TS 60904-13. Photovoltaic devices – part 13: electroluminescence of photovoltaic modules. Standard, Geneva, CH: International Electrotechnical Commission (IEC); 2018.
- [18] Bhoopathy Raghavi, Kunz Oliver, Juhl Mattias, Trupke Thorsten, Hameiri Ziv. Outdoor photoluminescence imaging of photovoltaic modules with sunlight excitation. *Prog Photovolt, Res Appl* 2018;26(1):69-73.
- [19] Z. Matić, *Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske*, Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar, 2007.
- [20] Sunčeva energija, dostupno na:  
<https://www.slideshare.net/valent/suneva-energija-zdeslav-mati>

- [21] D. Šljivac i D. Topić, *Obnovljivi izvori električne energije*, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2018.
- [22] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [23] L. Majdandžić, *Fotonaponski sustavi*, Zagreb: Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, Srednja škola Oroslavje.
- [24] Energy Education, dostupno na:  
[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_effect](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect)
- [25] D. Pelin, D. Šljivac, D. Topić i V. Varju, *Utjecaj fotonaponskih sustava na regiju*, Osijek: IDResearch Kft., 2014.
- [26] Kokot, M. (2011). *Emulator rada fotonaponskog panela i neizraziti regulator za praćenje točke maksimalne snage na njegovim strujno-naponskim karakteristikama (Diplomski rad)*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva.
- [27] National Renewable Energy Laboratory, dostupno na:  
<https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>
- [28] METREL d.d, Eurotest PV, MI 3108, *Instruction manual*, Slovenija.
- [29] *Specifikacije polikristalnog fotonaponskog modula BMU 245-265 W, BISOL Premium serija.*
- [30] *Specifikacije monokristalnog fotonaponskog modula BMO 250-270 W, BISOL Premium Serija.*
- [31] *Specifikacije monokristalnog fotonaponskog modula PANASONIC VBHN240SE10.*

## SAŽETAK

U današnje vrijeme, kako svijet sve više teži obnovljivim izvorima energije, energija sunčevog zračenja postala je jedna od značajnijih i učinkovitijih oblika obnovljivih izvora energije. U teorijskom dijelu završnog rada ukratko je opisano osnovno vezano za Sunce, sunčevu energiju i karakteristike sunčevog zračenja. Nakon toga dolazimo do opširnije opisanih fizikalnih osnova kao što su poluvodička dioda i fotonaponski proces koji nam pomažu shvatiti kako dolazi do pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju. Na kraju teorijskog dijela opisan je način rada fotonaponskih ćelija i fotonaponskih modula te tehničke karakteristike i standardni testni uvjeti (STC) fotonaponskih modula. U praktičnom dijelu završnog rada pomoću mjernog instrumenta METREL MI 3108 EUROTTEST PV ispitane su performanse polikristalnog, monokristalnog i HIT fotonaponskog modula. Iz dobivenih rezultata i analize mjerenja može se vidjeti utjecaj sloja prljavštine i degradacije na fotonaponskim modulima.

**Ključne riječi:** fotonaponski modul, fotonaponska ćelija, Sunce, sunčeva energija, strujno-naponska karakteristika, degradacija

## **ABSTRACT**

Nowadays, as the world increasingly strives for renewable energy sources, the energy of solar radiation has become more significant and efficient form of renewable energy source. Theoretical part of this undergraduate thesis briefly describes basics related to the Sun, solar energy and characteristics of solar radiation. After that, we come to more detailed physical basics such as the semiconductor diode and the photovoltaic process which help us understand how solar energy is converted into electricity. At the end of the theoretical part is described how photovoltaic cells and photovoltaic modules work, as well as technical characteristics and standard test conditions (STC) of photovoltaic modules. In the practical part of this undergraduate thesis, the performances of polycrystalline, monocrystalline and HIT photovoltaic modules were tested using the measuring instrument METREL MI 3108 EUROTTEST PV. From obtained results and measurement analysis, the impact of the layer of dirt and degradation can be seen on the photovoltaic modules.

**Keywords:** photovoltaic module, photovoltaic cell, Sun, solar energy, current-voltage curve, degradation



## ŽIVOTOPIS

Vinko Rajič rođen je u 26. kolovoza 2001. godine. Živi u Vinkovcima gdje je pohađao osnovnu školu. Nakon završetka osnovnoškolskog obrazovanja upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića Vinkovci gdje nakon četiri godine srednjoškolskog obrazovanja stječe zanimanje elektrotehničara. Nakon srednjoškolskog obrazovanja upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera te se na drugoj godini preddiplomskog smjera elektrotehnike opredjeljuje za smjer elektroenergetika.

---

Potpis autora