ISPITVANJE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U PRAKSI

Živković, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:212090

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**

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

ISPITVANJE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U PRAKSI

Završni rad

Antonio Živković

Osijek, 2022.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 17.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Antonio Živković
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4755, 23.07.2019.
OIB Pristupnika:	43922910685
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Ispitivanje fotonaponskih elektrana u praksi
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak završnog rad:	Zadatak rada je objasniti fizikalnu osnovu rada fotonaponskih panela i opisati matematičko modeliranje. Na osnovu znastvenih radova iz WOS baze napraviti pregled područja testiranj koja se provode u praksi na fotonaponskim elektranama. Postupak ispitivanja opisati kroz aspekte mjerenja I-U, P-U karakteristika, primjene infracrvene termografije i elektroluminiscencije.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	17.09.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	21.09.2022.

Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	*Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.*
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 21.09.2022.

Ime i prezime studenta:	Antonio Živković
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4755, 23.07.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Ispitivanje fotonaponskih elektrana u praksi**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Zadatak završnog rada 3

2. SOLARNA KONSTANTA 4

3. OSNOVE RADA FOTONAPONSKIH PANELA 5

3.1. Fizikalne karakteristike fotonaponskih panela 5

3.1.1. Kristali 5

3.1.2. PN-spoj (Poluvodička dioda) 5

3.1.3. Fotonaponski efekt 6

3.2. Tehnička svojstva fotonaponskih panela 6

3.2.1. Materijali 7

3.2.2. Proizvodnje fotonaponskih ćelija 8

3.2.3. Princip rada fotonaponske ćelije 9

3.2.4. Strujno-naponska karakterstika 11

3.3. Fotonaponski sustavi 13

4. METODE ISPITIVANJA FOTONAPOSKIH MODULA 17

4.1. Vizualni pregled 17

4.2. I-U karakteristika 24

4.3. Infracrvena termografija 28

4.4. Elektroluminiscencija 33

5. ZAKLJUČAK 36

LITERATURA 37

SAŽETAK 39

ABSTRACT 39

1. UVOD

S povećanjem populacije za 10 % u posljednjih 10 godina, proizvodnja električne energije porasla je za 20 %. Pri tome rastu proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora čini čak 40 %. Obnoljivi izvori energije su vrsta energije koju dobivamo iz prirodnih izvora te su neisrpivi (obnavljaju se). Sunčeva energija je direktno ili indirektno uzrok stvaranja sličnih drugih vrsta obnovljvih izvora (morske struje i vjetar). Energija Sunca neprekidno dopire do Zemlje koja se vrti oko Sunca i oko svoje osi. Uzimajuću u obzir eliptičnu putanju Zemlje oko Sunca, jakost sunčevog zračenja nejednako je raspoređena po Zemlji te se mijenja tijekom godine (dana) [1]. Zbog ekscentričnosti putanje Zemlje oko Sunca solarna konstanta može oscilirati te je se može izračunati za točno određeni dan u godini [2].

Kako bi prihvatili sunčevu energiju potrebni su nam fotonaponski paneli. Fotonaponski paneli sastavljeni su od niza spojenih fotonaponskih ćelija. Da bi razumjeli postupak pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju potrebno je objasniti fizikalna i tehnička svojstva fotonaponskih ćelija. Svaka fotonaponska ćelija je u biti PN-spoj koji se sastoji od dvaju primjesa, akceptorske (trovaletne) primjese daju p-tip poluvodiča i donorske (peterovalentne) koje daju n-tip poluvodiča [3]. Svaka fotonaponska ćelija radi po principu fotonaposkog efekta [4]. Glavno svojstvo PN-spoja je njegovo ispravljačko svojstvo. Različiti materijali koriste se za proizvodnju fotonaponskih ćelija kao što su kadmij telurid ili bakar-indij-selen, no najčešće se koristi kristalni silicij. Prema izvoru [4] definirani su osnovni parametri svake fotonaponske ćelije. Naime, kada se fotonaponska ćelija osvjetli, apsorbirani fotoni tada tvore parove elektron-šupljina. Elektroni će se gibati prema N-strani poluvodiča, dok će se šupljine gibati prema P-strani poluvodiča. Zbog razlike potencijala između tih dvaju strana dolazi do induciranja napona na krajevima solarne ćelije [5]. Svaku fotonaponsku ćeliju možemo opisati strujno-naponskom karakteristikom koju karakteriziraju njezini glavni paramteri. Jedna fotonaponska ćelija proizvodi oko 0,5V, stoga se fotonaponske ćelije spajaju serijski ili paralelno tako tvoreći fotonaponski modul. Povezivanjem više modula možemo povećati osnovne parametre I-U karakteristike [6].

Kako bi odredili karakteristike i kvarove fotonaponskih modula potrebno ih je pravovremeno testirati. Prva vrsta tesiranja je zapravo vizualni pregled samog fotonaponskog modula. Vizualni pregled fotonaponskog modula vrši se kada je modul osvjeteljen sa više od 1000 luxa. Neki od kvarovi koji se mogu uočiti vizualni pregledom su: oznake pregaranje [7], razdvajanje slojeva modula (delaminacija) [8], kvarovi u razvodnoj kutiji, diskoloracija fotonaponskog modula, pucanje ćelije [9] i drugi. Druga vrsta testiranja je mjerenje I-U karakteristike fotonaponskog

modula tj. osnovnih parametara I-U karakteristike: napon otvorenog kruga, struja kratkog spoja, maksimalna snaga, faktor punjenja [10]. Različiti parametri utječu na točnost mjerenja I-U karakteristike stoga kako bi točnost bila što veća svi elementi koji utječu na točnost moraju biti umjereni (kalibrirani) u ovlaštenim laboratorijima. No ipak uvijek su prisutna određena odstupanja između izmjerene i očekivane I-U karakteristike. Moguća odstupanja su: neusklađenost fotonaponskih modula, onečišćenje fotonaponskog modula, neispravna premosna dioda, povećanje serijskog otpora, smanjenje otpora šanta i druga [11]. Sljedeća metoda testiranja je testiranje infracrvenom termografijom. Infracrvenom termografijom beskontaktno određujemo raspodjelu temperatura na fotonaponskom modulu, daje nam mogućnost relativno jedostanvne metode ispitivanja te brzu detekciju samih kvarova na fotonaponskim modulima [12], [13], [14]. Termovizijskom kamerom možemo otkriti različite probleme u samom fotonaponskom modulu kao što su: pukotine, nečistoće (zasjenjenost), neispravna premosna dioda i druge. Elektroluminiscencija je također jedna od osnovnih metoda ispitivanja fotonaponskih modula. Elektroluminiscencijsko ispitivanje izvodi se tako da se fotonaponski modul napaja odgovarajućim izvorom napona i struje te se mjeri fotoemisija infracrvenom kamerom opremljena fotodiodama ili silicijskim uređajima. Elektroluminiscencijskim ispitivanjem možemo otkriti različite vrste nedostataka i kvarova koji se mogu pojaviti tijekom cijelog životnog vijeka fotonaponskog modula, tj. procesa proizvodnje, transporta, instalacije i održavanja [15].

Rad je podijeljen u četiri dijela. Prvi uvodni dio daje nam osnovne informacije o ispitivanju fotonaponskih elektrana u praksi prema dostupnoj literaturi WOS baze podataka. U drugom dijelu rada opisuje se jakost sunčeve energije, treći dio podijeljen je u u tri pododjeljka u kojima su opisani PN-spoj, fotoelektrični efekt, materijali koji se najviše koriste u izradi fotonaponskih modula (ćelija), sam postupak proizvodnje fotonaponske ćelije, princip rada fotonaponske ćelije, strujno-naponska karakteristike fotonaponske ćelije, podjela fotonaponskih sustava te osnovni dijelovi svake fotonaponske elektrane. U četvrtom dijelu opisane su najvažnije metode testiranja fotonaponskih modula: vizualni pregled fotonaponkog modula, tesitranje pomoću I-U karakteristike, testiranje infracrvenom termografijom, elektroluminiscencijsko testiranje te kvarovi koji se mogu otkriti svakom od metoda testiranja kao i oprema koja je potrebna za svako pojedino testiranje.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak rada je objasniti fizikalnu osnovu rada fotonaponskih panela i opisati matematičko modeliranje. Na osnovu znastvenih radova iz WOS baze napraviti pregled područja testiranja koja se provode u praksi na fotonaponskim elektranama. Postupak ispitivanja opisati kroz aspekte mjerenja I-U, P-U karakteristika, primjene infracrvene termografije i elektroluminiscencije.

2. SOLARNA KONSTANTA

Energetska bilanca obuhvaća sve tokove svih oblika energije sa svrhom da se na prikladan i pregledan način prikažu: korištenje primarnih oblika energije, energetske transformacije, korištenje transformiranih vrsta energije, uvoz i izvoz primarnih i transformiranih vrsta energije, energije za postrojenja, gubitci u energetskim mrežama te posljednje korištenje različitih oblika energije za opskrbu potrošačkih zajednica (industrija, transport, mali potrošači) [1]. Sunčeva energija konstantno dopire do Zemlje. Zbog oblika Zemlje, eliptične putanje oko Sunca i nagiba Zemljine osi prema ravnini te putanje, sunčeva enerija nejednoliko je raspoređena po Zemlji i mijenja se tijekom godine, ali i tijekom dana. Solarna konstanta (energetska bilanca) E_0 jakost je ekstraterestričkog zračenja koje dospijeva na neku površnu okomitu prema zračenju na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca ($149{,}6 \cdot 10^6$ km) i izvan Zemljine atmosfere [3].

U svjetskoj meterološkoj organizaciji jakost sunčeva zračenja koje dolazi do površine Zemlje iznosi: E_{0sr}=1367,7 W/m^2. Jakost sunčeva zračenja možemo izračunati prema formuli (2-1) [2]:

$$E_0 = E_{0sr} \cdot (\frac{r}{R})^2 \tag{2-1}$$

gdje su:

- r – prosječna udaljensot Zemlje od Sunca
- R – realna udaljenost Zemlje od Sunca (uzimajući u obzir konstantu za određeni datum)

3. OSNOVE RADA FOTONAPONSKIH PANELA

3.1. Fizikalne karakteristike fotonaponskih panela

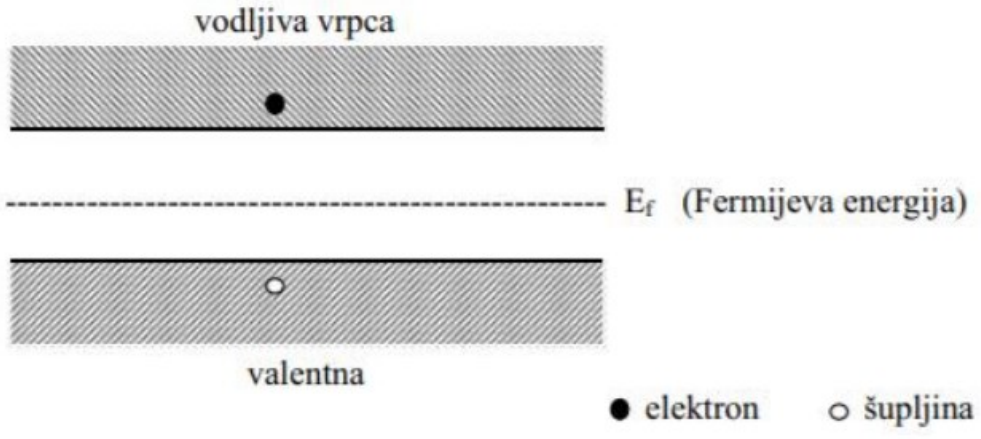
U ovome poglavlju fizikalno će se pojasniti pojam fotonaponski efekt tj. postupak osvijetljenja fotonaponske ćelije, PN-spoj i najčešća upotreba materijala za izradu solarnih ćelija.

3.1.1. Kristali

Kristali su čvrsta tijela koja se sastoje od atoma, iona ili molekuka kojima se ponavlja njihov trodimenzionalni raspored te s pravilnom međusobno udaljenošću tvore kristalnu rešetku. Materijali koji se koriste za izradu fotonaponskih ćelija mogu biti u obliku monokristala, polikristala ili kao amorfne tvari. Ako se aktivni obujam ćelija sastoji od samo jednog kristala onda je takva ćelija monokristalna, ako se ćelija formira od više kristala tada govorimo o polikristalnoj (multikristalnoj) ćeliji. Amorfne tvari dobivamo brzim hlađenjem rastaljenog elementa ili ako se kristalna rešetka materijala ošteti vanjskim utjecajem [3].

3.1.2. PN-spoj (Poluvodička dioda)

Fotonaponska ćelija je zapravo PN-spoj. PN-spoj ćemo dobiti kada se jednom dijelu kristala čistog poluvodiča dodaju akceptorske (trovalentne) primjese te tako nastaje p-tip poluvodiča, a drugom dijelu dodaju donorske (peterovalentne) primjese te tako nastaje n-tip poluvodiča. Između tih dvaju područja (P i N područja) nalazi se pojas Fermijeve energije koja nastaje zbog gradijenta koncentracije (Slika 3.1.).



Slika 3.1. Energetski dijagram za čisti poluvodič [4]

Jedno od najbitnijih svojstava PN-spoja je njegovo ispravljačko svojstvo, tj. najbolje vodi struju kada je p-područje pozitivno, a n-područje negativno jer je tada napon u propusnom smjeru. PN-spoj radi na principu diode i propušta struju samo u jednom smjeru.

3.1.3. Fotonaponski efekt

Sunčeva svjetlost sastoji se od snopa čestica tj. fotona (čestice koje su sačinjene od različitih količina energije koje ovise o valnim duljinama sunčeva spektra). Energiju fotona možemo prikazati Einsteinovom formulom (3-1):

$$E = h \cdot v = h \cdot \frac{c_0}{\lambda} \tag{3-1}$$

gdje je:

- h – Planckova konstanta ($h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}\text{Js}$)
- v – frekvencija elektromagnetskog zračenja, (1/s)
- c_0 – brzina svjetlosti ($c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)
- λ – valna duljina, (μm)

Kada fotoni dođu u doticaj s fotonaponskom ćelijom na početku dio fotona reflektira se od prevladavajućeg p-n poluvodiča temeljenog na kristalnom siliciju, dok ostatak fotona prolazi direktno kroz ćeliju ili se apsorbira u njoj. Jedino oni fotoni koji su se apsorbirali u ćeliji će dati potrebnu energiju za oslobađanje elektrona, a samim time i proizvodnje električne enerije. Takva pojava naziva se fotonaposki efekt [5].

3.2. Tehnička svojstva fotonaponskih panela

Pod pojmom tehničkih svojstava definirati će se materijali koji se koriste pri proizvodnji fotonaponskih ćelija, postupak proizvodnje i princip rada istih te strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije.

Slika 3.2. Struktura fotonaponske ćelije [16]

3.2.1. Materijali

Poluvodiči s energetskih rascjepom oko 1,5 eV imaju najveću mogućnost za upotrebu pri sastavljanju fotonaponske ćelije. Pri izradi fotonaponskih ćelija materijal koji se većinom koristi je kristalni silicij, materijali koji se još koriste pri izradi fotonaponskih ćelija su bakar-indij-selen i kadmij telurid. Silicij je drugi najzastupljeniji element na Zemlji, ne dolazi u elementarnom stanju već u obliku silicijeva dioksida ili drugih silikata. Silicij se koristi na različitim mjestima u industriji: u izvorrnom stanju u poluvodičima u strujnim krugovima, elektroničkim uređajima i čipovima. S povećanjem temperature i s različitim primjesama u njegovoj jezgri vodljivost silicija se povećava.

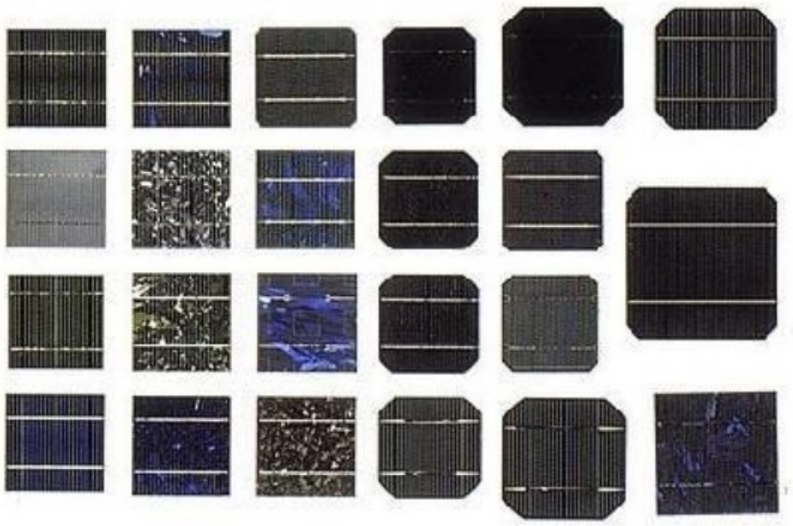
U Tablica 3.1.uspoređene su osnovne karakterstike različitih fotonaponskih ćelija koje su izrađene od različitih vrsta materijala te su dani osnovni parametri ćelija.

Tablica 3.1. Temeljni parametri fotonaponskih ćelija [4]

Vrste ćelija	**U_{ok}, V**	**J_{ks}, mA/cm^2**	**η**
Monokristalna - Si ćelija	0,65	30	0,17
Polikristalna - Si ćelija	0,60	26	0,15
Amorfna - Si ćelija	0,85	15	0,09
CdS / Cu_2S	0,5	20	0,10
CdS / CdTe	0,7	15	0,12
GaAlAs / GaAs	1	30	0,24
GaAs	1	20	0,27

3.2.2. Proizvodnje fotonaponskih ćelija

Fotonaponske ćelije trenutno imaju ubrzan tehnološki napredak u području istaživanja materijala za izradu i pronalaženja novih tehnologija u procesu proizvodnje. Silicij je osnovni element za izradu fotonaponskih ćelija s udjelom oko 98 % u obliku kristalnog silicija, većinom tehnologijom monokristalnog silicija (manjim udjelom polikristalni sliciji i tanki film). Proizvodnja monokristalnog silicija je skuplja, ali učinkovitst ćelija je veća. Prednosti polikristalnog silicija su: manja ulaganja, veća iskoristivost silicija, veća površina što pojednostavljuje ugradnju. Najveći nedostatak kristalnog silicija je potreba za velikom debljinom aktivnog sloja zbog zabranjenog pojasa. Većina fotonaponskih ćelija koje se nalaze na tržištu izrađuju se od polikristalnog silicija te mogu biti različitih oblika i dimenzija (Slika 3.3.).



Slika 3.3. Različite vrste fotonaponskih ćelije [4]

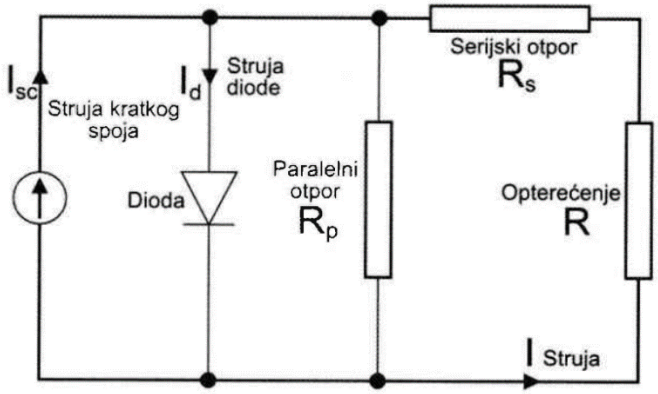
Tankoslojna tehnologija koja se istražuje je izrada fotonaponskih ćelija od amorfnog silicija. Proizvodnja fotonaponskih modula takvom tehnologijom prilično je jednostavna, cijena izrade takve ćelije je manja, no iskoristivnost amorfne ćelije jako je mala (6-8%) u usporedbi s ostalim tehnologijama izrade fotonaponske ćelije.

Na Slika 3.4. prikazan je postupak proizvodnje fotonaponskih ćelija, postupak ugradnje fotonaponskih ćelija u fotonaponski modul te na kraju primjena fotonaponskih modula (postavljanje na krov građevine).

Slika 3.4. Postupak proizvodnje fotonaponskih ćelija i fotonaponskog modula [4]

3.2.3. Princip rada fotonaponske ćelije

Kada se fotonaponska ćelija osvjetli apsorbirani fotoni tada tvore parove elektron-šupljina. Ako apsorbcija nastane unutar ili nedaleko od PN-spoja, električno polje koje postoji u osiromašenom području, odvaja sjedinjeni elektron i šupljinu. Elektroni se kreće gibati prema N-strani poluvodiča, a šupljina prema P-strani. Zbog postojanja velikog broja elektrona i šupljina na suprotnim stranama PN-spoja dolazi do induciranja elektromotorne sile tj. napona na krajevima solarne ćelije (Slika 3.6.). Kada je fotonaponska ćelija spojena s trošilom električna struja dobiti će vrijednost koja se može izračunati iz jednadžbe (3-2) koja je napisana prema Slika 3.5. PN-spoj ponašati će se kao ispravljač tj. propuštati će struju samo u jednom smjeru.



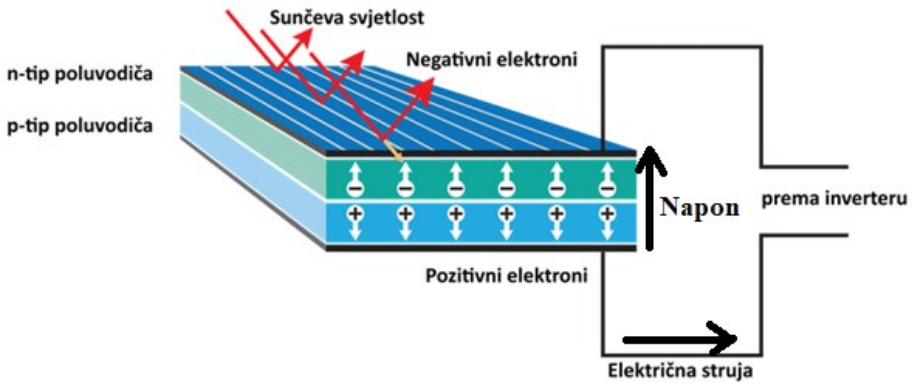
Slika 3.5. Shema ekvivalentnog strujnog kruga fotonaponske ćelije s serijskim i paralelnim otpornikom [5]

Prema Slika 3.5. možemo napisati jednadžbu za struju kao:

$$I = I_{sc} - I_d - I_p = I_{sc} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{e \cdot (U + R_S)}{k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \tag{3-2}$$

gdje su:

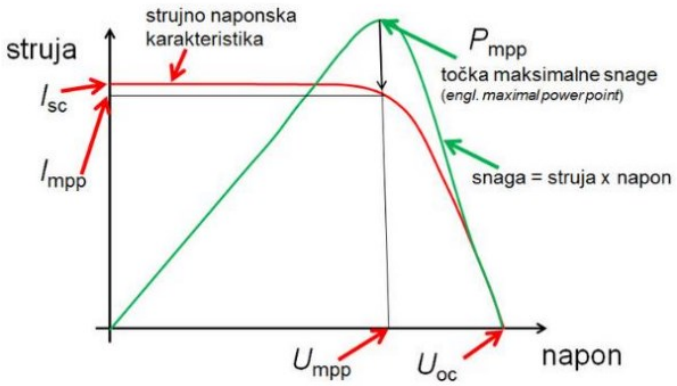
- I - ekvivalentna struja strujong kruga (A)
- I_{sc} - struja kratkog spoja (A)
- I_d - struja diode (A)
- I_p - struja paralelnog otpor (A)
- I_0 - reverzna struja zasićenja (A)
- U - napon (V)
- R_p - paralelni otpor fotonaponske ćelije (Ω)
- R_s - serijski otpor fotonaponske ćelije (Ω)
- T - apslotna temperatura (K)
- k - Boltzmanova konstanta ($k = 1{,}3806 \cdot 10^{-23}$ J/K)
- e - naboj elektrona ($e = 1{,}6022 \cdot 10^{-19}$As)



Slika 3.6. Princip rada fotonaponske ćelije

3.2.4. Strujno-naponska karakterstika

Svaku fotonaponsku ćeliju možemo definirati pomoću strujno-naponske karakterristike (Slika 3.7. .) koju definiraju četiri osnovna elementa: jakost struje kratkog spoja (I_{sc}), napon otvorenog kruga (U_{oc}), faktor punjenja (FF) i stupanj djelovanja (η) te dodatni: struja u točki maksimalne snage (I_{mpp}), napon u točki maksimalne snage (U_{mpp}) i snaga u točki maskimalne snage (P_{mpp}).



Slika 3.7. I-U karakteristika fotonaponske ćelije [17]

Promatrajuću I-U karakteristiku fotonaponske ćelije prema proizvođačevim podaci možemo izračunati stupanj djelovanja (η) ćelije, prema izrazu (3-3):

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{Sun}} = F \cdot \frac{U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} \tag{3-3}$$

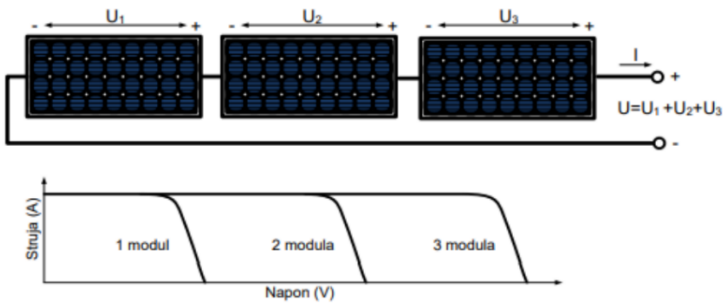
gdje su:

- F - faktor punjenja ($F = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}$)
- A - površina fotonaponske ćelije (m^2)
- E - sunčeveo zračenje (W)

S obzirom da jedna fotonaponska ćelija može dati oko 0,5V, ne koristi se sama skoro nikada. Stoga su spojeni u niz od serijski (paralelno) spojenih fotonaponskih ćelija te tako tvore fotonaponski modul.

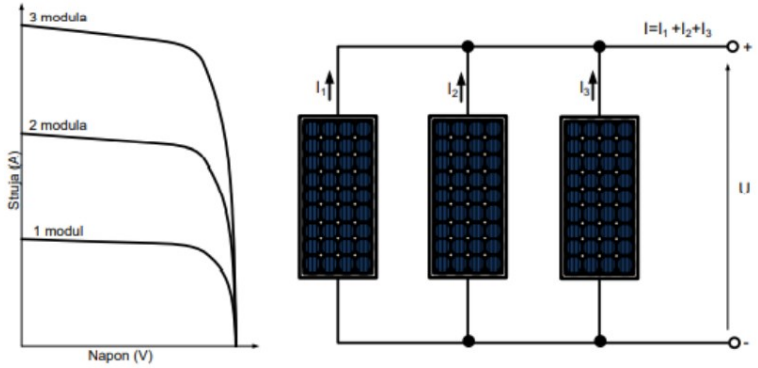
Više takvih modula može biti spojeno:

- Serijski - napon se povećava s povećanjem površine fotonaponskih modula (
- Slika **3.8**.)



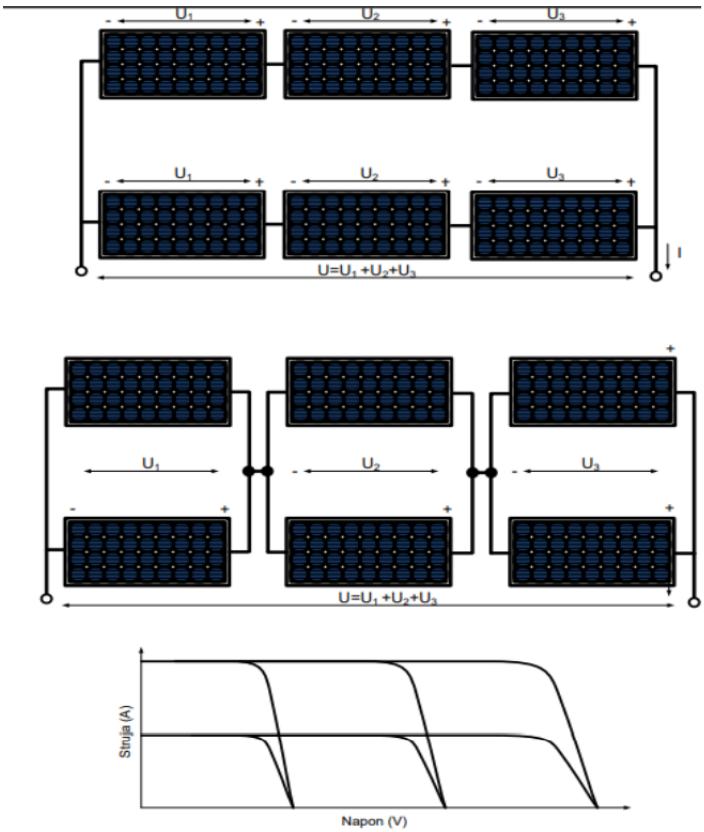
Slika 3.8. Strujno-naponska karakteristika serijski spojenih fotonaponskih modula [6]

- Paralelno - jakost struje se povećava s povećanjem površine fotonaponskih modula (Slika 3.9.)



Slika 3.9. Strujno-naponska karakteristika paralelno spojenih fotonaponskih modula [6]

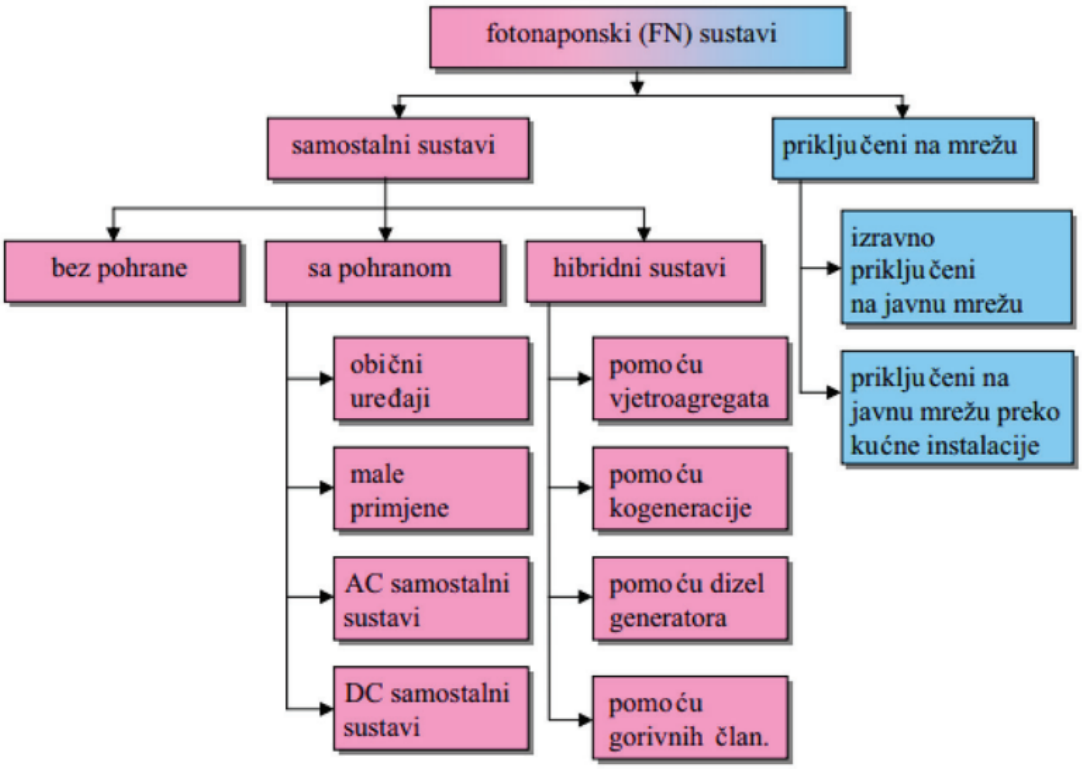
- Kombinirano - dolazi do povećanja napona i jakosti stuje s povećanjem površine fotonaponskih modula (Slika 3.10.)



Slika 3.10. Strujno-naponska karakteristika kombinirano spojenih fotonaponskih modula [6]

3.3. Fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustav čine svi sklopovi fotonaponskog modula i ostalih komponenata, kao što su konstrukcija za instalaciju (na krovu ili na zemlji), uređaji za promatranje snagi i regulacijskih uređaja, komponente za skladištenje energije (punjači, akumulatori, baterije), izmjenjivača, konektora, kabela te tako stvarajuću najpovoljniju opskrbu energijom iz fotonaponskih modula u elektroenergetsku mrežu. Fotonaponske sustave možemo podijeliti na samostalne (off grid) fotonaponske sustave i fotonaponske sustave direktno priključene na elektroenergetsku mrežu (on grid). Svaki od tih dvaju sustava može se podijeliti prema Slika 3.11.



Slika 3.11. Osnovna podjela fotonaponskih sustava [4]

Mrežni fotonaponski sustavi proizvode istosmjenu struju (napon) te ju predaju izmjenjivaču koji pretvara istosmjernu struju (napon) u izmjeničnu struju (napon) te ju daje direktno u mrežu. U slučaju da je napajanje iz fotonaposkih sustava niže od potrošnje tada potrošač uzima energiju iz mreže. Ukoliko je trenutna proizvodnja fotonaponskog sustava veća od potrebne količine tada taj višak električne energije odlazi u elekoenergetsku mrežu. Samostalni fotonaponski sustavi rade isto kao i mrežni fotonaponski sustavi jednim dijelom, odnosno fotonaponske ćelije daju istosmjernu struju (napon) koja se direktno može koristiti ako potročaš ima takve vrste tereta, a ako nema istosmjerna struja (napon) se preko izmjenjivača pretvara u izmjeničnu struju (napon) koja se dalje koristi. Višak električne energije ne odlazi u mrežu već se skladišti u akumulatorima, baterijama ili nekim drugim elementima (ako postoje u sustavu). Tako uskladištena energija se koristi kada sunčeva energija nije dostatna za potročaša ili po noći.

Osnovi dijelovi mrežnih fotonaponskih elektrana su: fotonaponski moduli, inverter, spojni vodiči, nosači fotonaponskog modula i brojilo električne energije, dok kod samostalnih fotonaponskih elektrana nemamo brojilo električne energije već regulator punjenja i pražnjenja baterije (akumulatora) prilikom skladištenja energije.

Fotonaponski modul oblikovan je nizom serijski-paralelno međusobno električno spojenih fotonaponskih ćelija. Povezivanje više fotonaponskih modula dobiti ćemo fotonaponski generator. Fotonaponski moduli izrađuju se od različitih vrsta poluvodičkog materijala s ciljem dobivanja što učinkovitije pretvorbe sunčeve energije u električnu.

Tehnički parametri fotonaposkog modula prema [5] su:

- Nominalna snaga P_{MPP} (W)
- Struja kratkog spoja I_{SC} (A)
- Struja pri maksimalnoj snazi I_{MPP} (A)
- Napon praznog hoda U_{OC} (V)
- Napon pri maksimalnoj snazi U_{MPP} (V)
- Nominalna temepratura rada ćelije NOCT (°C)
- Duljina (m)
- Širina (m)
- Masa (kg)

Prema [17] proizvođači fotonaponskih modula jamče da u razdoblju od 15 godina fotonaponski moduli neće imati nikakvih nedostataka koji se odnose na materijal i izradu, a što se tiče snage (performansi) fotonaponski modul će se ponašati prema Tablica 3.2. Snaga fotonaposkog modula se smanjuje s godinama što bi značilo da je očekivani životni vijek fotonaponskog modula 25-30 godina, nakon čega se očekuje zamjena istih.

Tablica 3.2. Kretanje učinkovitosti fotonaponskog modula s godinama [17]

Godine	Učinkovitost	Godine	Učinkovitost
1	97,00 %	14	90,50 %
2	96,50 %	15	90,00 %
3	96,00 %	16	89,50 %
4	95,50 %	17	89,00 %
5	95,00 %	18	88,50 %
6	94,50 %	19	88,00 %
7	94,00 %	20	87,50 %
8	93,50 %	21	87,00 %
9	93,00 %	22	86,50 %
10	92,50 %	23	86,00 %
11	92,00 %	24	85,50 %
12	91,50 %	25	85,00 %
13	91,00 %		

Fotonaponski izmjenjivač (inverter) služi za pretvorbu istosmjerne energije u izmjeničnu energiju regulirane frekvencije i iznosa, sinkroniziran s naponom i frekvencijom elektroenergetske mreže. Prilikom pretvorbe izmjenjivač je podešen da na izlazu daje konstantan napon iznosa 230V i stalnu, nepromjenjivu frekvenciju od 50Hz.

Prema [18] postoje tri vrste fotonaponskih izmjenjivača:

- autonomni izmjenjivač
- bidirekcijski izmjenjivač
- mrežni izmjenjivač

Tehnički parametri fotonaponskog izmjenjivača:

- Nazivna ulazna istosmjerna struja
- Maksimalna istosmjerna struja kratkog spoja u fotonaponskom modulu
- Nazivni ulazni istosmjerni napon
- Nazivna izlazna izmjenična snaga
- Nazivna izlazna izmjenična struja
- Nazivni izlazni izmjenični napon
- Frekvencija - Raspon frekvencija
- Faktor snage

Proizvođači invertera jamče da u razdoblju od 7 godina inverter neće imati nedostataka koji se odnose na izradu i materijal. Nakon 7-10 godina korištenja preporučena je zamjena istog.

4. METODE ISPITIVANJA FOTONAPOSKIH MODULA

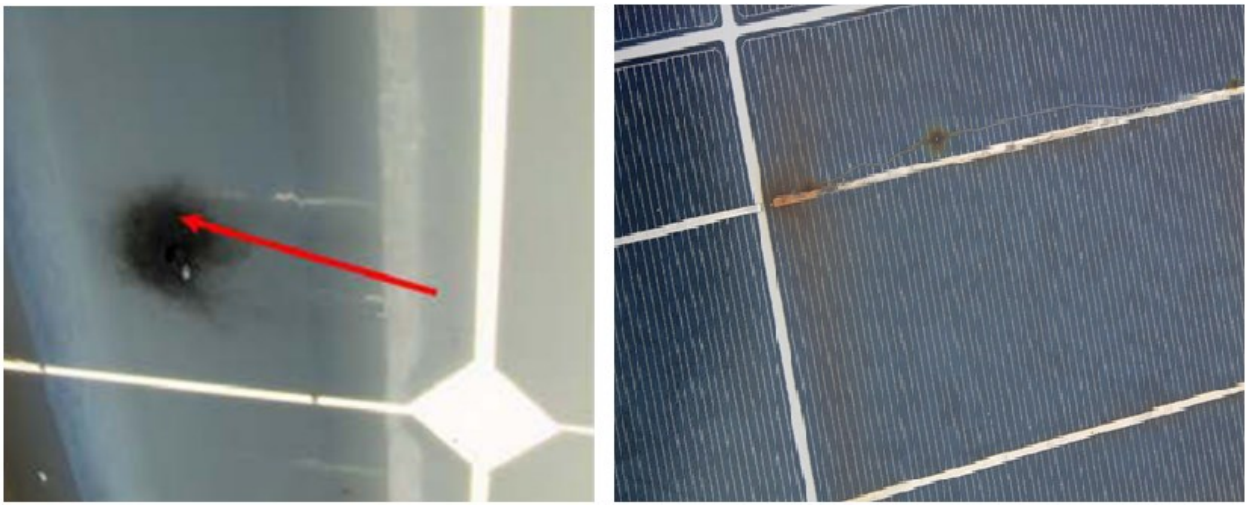
U ovom poglavlju opisati će se najvažnije metode isptivanja fotonaponskih modula, a to su: vizualni pregled fotonaponskog modula, ispitivanje pomoću I-U karakteristike, ispitivanje infracrvenom termografijom i elektroluminiscencijsko ispitivanje, kvarovi koji se mogu identificirati određenom metodom ispitivanja te oprema koja nam je potrebna za pojedino ispitvanje.

4.1. Vizualni pregled

Najučinkovitija i najbrža metoda za pronalaženje kvarova i nedostataka u fotonaponskom modulu je vizualni pregled. Pomoću vizualnog pregleda možemo vidjeti općenito stanje modula i instalacija te obratiti pozornost na dijelove koji imaju veću mogućnost za kvar. Kako bi se pristupilo vizualnom pregledu fotonaponskog modula, on se može podijeliti na dijelove, a svaki dio fotonaponskog modula pregledava se i dokumentira posebno s relativnim nedostacima. Norme IEC61215, IEC61646 zahtijevaju osvjetljenje veće od 1000 luxa tijekom vizualnog pregleda i uzimaju se u obzir samo nedostatci koji se mogu otkriti golim okom. Najčešći kvarovi uočeni vizualni pregledom su: delaminacija (razdvajanje slojeva panela), mjehurići, žutilo, posmeđivanje (EVA diskoloracija), slomljena ćelija, napuknuta ćelija, bezbojna antirefleksija, pregorene i oksidirane ćelije.

Oznake pregaranja

Jedan od najčešćih kvarova koji se opaža u fotonaponskim modulima povezan je s dijelovima modula koji se jako zagrijavaju zbog loma vrpce, kvara lemljene veze, lokalnog zagrijavanja zbog primjene obrnutog toka struje [9]. Kvarovi lemljene veze i loma vrpce mogu biti uzrokovani toplinskim zamorom. Kvarovi se mogu ubrzati povećanjem otpora (temperature) i povezanog zagrijavanja jer spoj počinje otkazivati, a struja i dalje teče kroz njega. Druga vrsta tragova pregaranja nastaje kada je modul ili dio modula prisiljen na obrnuti prednapon jer je zasjenjen. Tragovi pregaranja obično se kao takvi mogu prepoznati vizualno (Slika 4.1.). Zahtijeva li postojanje pregara zamjenu modula, infracrvena slika pod osvijetljenim i/ili djelomično zasjenjenim uvjetima brzo će identificirati je li područje i dalje vruće i/ili je li struja prestala teći kroz taj dio strujnog kruga.



Slika 4.1. Tragovi pregaranja fotonaponskog modula [7]

Delaminacija (razdvajanje slojeva modula)

Tankoslojna i druge vrste fotonaponske tehnologije mogu sadržavati prozirni vodljivi oksid (TCO) ili sličan sloj koji se može odvojiti od susjednog staklenog sloja. Prianjanje između stakla, sredstva za kapsuliranje, aktivnih slojeva i stražnjih slojeva može biti ugroženo iz mnogo razloga. Kada je prianjanje ugroženo zbog onečišćenja (npr. neprikladnog čišćenja stakla) ili čimbenika okoliša, doći će do raslojavanja, praćenog prodorom vlage i korozijom. Delaminacija unutar optičkog puta rezultirat će optičkom refleksijom i kasnijim gubitkom struje (snage) iz modula. Pulsna i zaključana termografija mogu se koristiti za otkrivanje delaminacija koje se ne mogu identificirati vizualno. X-ray termografija i ultrazvuk skener se također može koristiti za ispitivanje manje očitih delaminacija u višoj rezoluciji, ali oba zahtjevaju duže vrijeme pregleda.

Slika 4.2. Delaminacija c-Si modula [19]

Stražnja strana modula služi za zaštitu elektroničkih komponenti od izravnog izlaganja okolišu i za osiguranje sigurnog rada u prisutnosti velikih istosmjernih napona. Stražnja strana fotonaponskog modula često se sastoji od laminatne strukture, otpornog polimera, često fluoropolimerom izvana, unutarnjim slojem PET-a te vanjskim slojem za kapsuliranje [9].

Koristimo li staklo umjesto stražnje podloge može doći do pucanja stakla. To se može dogoditi zbog nepravilne ugradnje, udara tuče, udaraca od različitih predmeta za vrijeme jakih vjetrova ili mehaničkog naprezanja. Svaka vrsta naprezanja utječe na delaminaciju te je mogu povećati ako je modul pod stalnim naprezanjem što će dovesti do pucanja stakla, a na kraju i do drugih većih problema u samom radu fotonaponskog modula

Ako imamo podlogu s višestrukim slojevima, postoji niz sučelja koja se mogu delaminirati kao odgovor na toplinu, toplinske cikluse, mehaničke promjene, vlagu, UV svjetlo ili druge fizičke ili kemijske promjene. Ako dođe do raslojavanja stvarajući mjehuriće to neće predstavljati sigurnosni problem. Takvo područje raditi će s malo većom temperaturom jer se toplina ne provodi i sa stražnje strane, ali sve dok se mjehurić dodatno ne poremeti i slomi ili proširi, brige o svojstvima i sigurnosti su minimalne. Ako dođe do raslojavanja zadnje ploče u blizini razvodne kutije ili blizu ruba modula, postojat će ozbiljniji sigurnosni problemi. Raslojavanje na rubu ili u blizini razvodone kutije može osigurati izravan put za ulazak vode u modul tijekom kišne oluje ili rose, te takva pojava može dovesti do vrlo ozbiljnih sigurnosnih problema [9].

Slika 4.3. Delaminacija stražnje strane modula [8]

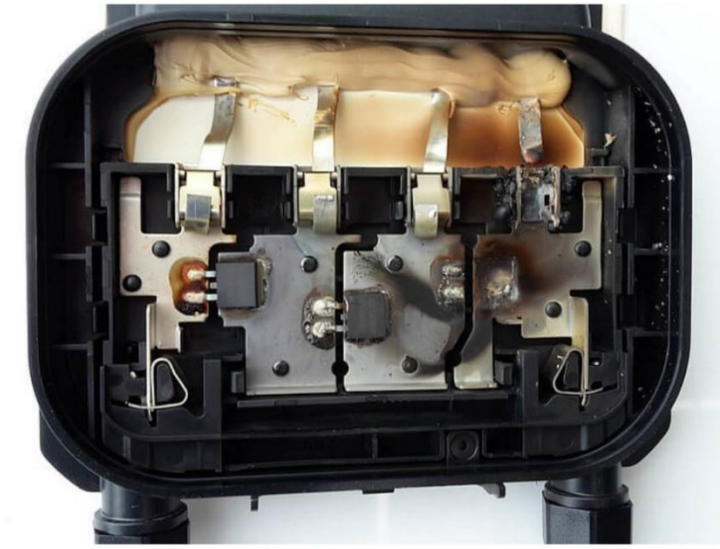
Razvodna kutija

Razvodna kutija fiksirana je na stražnjoj strani fotonaponskog modula i služi za zaštitu spojeva koji dolaze od modula i spojeva koji idu na vanjske terminale. Općenito, razvodna kutija sadrži premosne diode (engl. bypass) za zaštitu ćelija u nizu u slučaju žarišta (područje s vrlo visokom količinom infracrvenog zračenja) ili zasjenjenja (područje s vrlo niskom količinom infracrvenog zračenja).

Problemi koji se pojavljuju su:

1. Razvodna kutija nije dovoljno dobro pričvršćena na fotonaponski modul.
2. Prilikom proizvodnje nije dobro zatvorena razvodna kutija ili je ostala potpuno otvorena
3. Ulazak vlage koji uzrokuje koroziju spojeva u razvodnoj kutiji
4. Loše ožičenje uzrokuje unutarnje iskrenje što može izazvati požar.

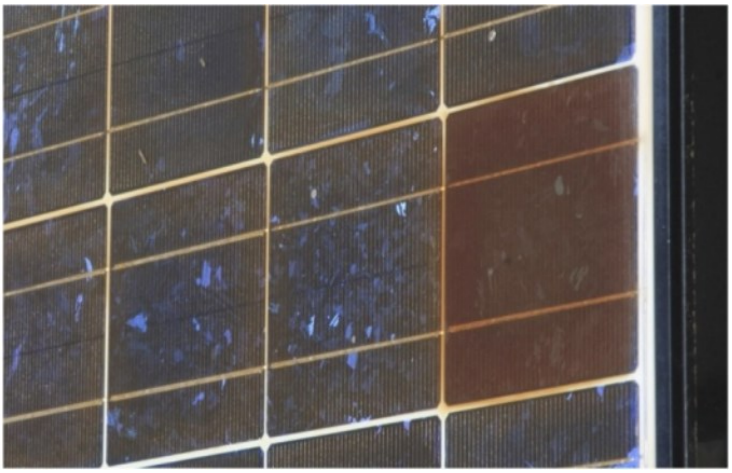
Slika 4.4. Kvarovi razvodne kutije; slika a) otvorena razvodna kutija, slika b) loše spojena razvodna kutija na stražnjoj ploči, slika c) razvodna kutija s lošim ožičenjem. [9]



Slika 4.5. Razvodna kutija fotonaponskog modula s pregorenim premosnim diodama [20]

EVA diskoloracija

Jedan od najočitijih mehanizama degradacije fotonaponskog modula je fotokemijsko posmeđivanje EVA-e (etilen vinil acetata) ili drugih materijala za kapsuliranje. Razna istraživanja i ekspermenti pokazali su da na količinu promjene boje EVA-e mogu imati utjecaja različiti parametri. Parametri se mogu podijeliti na fizičke i kemijske. U fizičku kategoriju ubrajamo: intenzitet svjetlosti, laminiranje, debljinu filma, propusnost plina polimernih substrata. Dok u kemijske faktore ubrajamo: EVA formulu, količinu kromofora nastalu stvrdnjavanjem, iscrpljivanje UV apsorbera [21]. Slika 4.6. prikazuje primjer gdje je jedna ćelija daleko tamnija od bilo koje susjedne ćelije, što obično znači da je ćelija koja je najviše promijenila boju bila na višoj temperaturi od okolnih ćelija (zbog niže fotostruje ćelije u usporedbi s drugim ćelijama u modulu ili ćelije koja se nalazi iznad razvodne kutije).



Slika 4.6. EVA posmeđivanje modula [9]

Pucanje ćelija

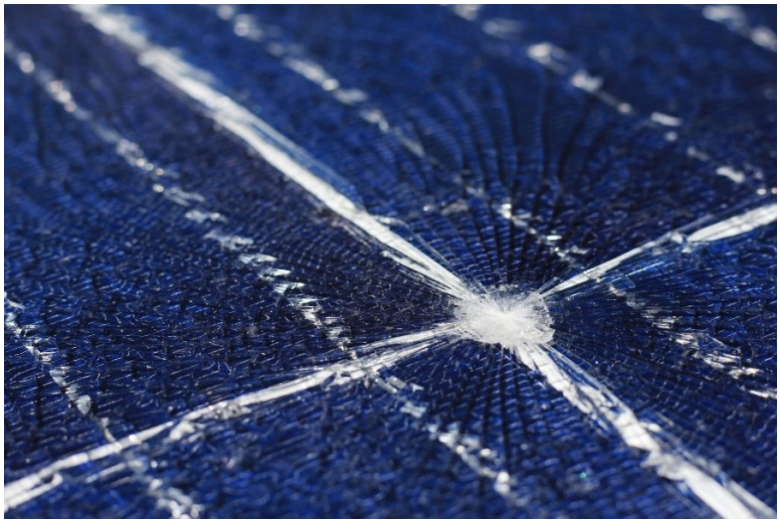
Glavni element fotonaponske ćelije jest silicij te je zbog toga sama fotonaponska ćelija vrlo krhka. Stanične pukotine jesu pukotine koje se nalaze na silicijskoj podlozi fotonaponskog modula i često se ne mogu vidjeti golim okom. Trenutni fotonaponski moduli većinom su sastavljeni od oko 60 fotonaponskih ćelija po jednom modulu. Pukotine u fotonaponskim ćelijama može uzrokovati: vodeno rezanje, loše ožičenje, nepravilno rukovanje prilikom proizvodnji same ćelije, postupak sastavljanja tokom proizvodnje solarnih modula. Također do pucanja fotonaponskih modula može doći prilikom transporta ukoliko fotonaponske ploče nisu pakirane na pravilan način ili ako se njima nije pažljivo rukovalo tijekom transporta i montiranja.

Izvori puknuća stanica mogu se podijeliti na tri izvora:

1. Pukotine koje nastaju zbog zaostalih naprezanja izazvanih postupkom lemljenja. Pukotine se često nalaze na kraju ili početnoj točki priključka, jer postoji najveći zaostali napon. Ovakva vrsta pukotina se najčešće pojavljuje.

Slika 4.7. Pucanje stanice u ćeliji [22]

2. Poprečne pukotine nastale pritiskom igala tijekom proizvodnje
3. Pucanje stakla ćelije, najčešće uzrokovane udarom u drugi predmet



Slika 4.8. Pucanje stakla fotonaponske ćelije [23]

Kada dođe do nastanka pukotina u solarnom modulu javlja se veći rizik da se tijekom rada fotonaponskog modula pukotine povećaju, zbog termomehaničkog neprazanja na fotonaponskim modulima zbog razlika temperatura, promjene vremenskih prilika, prolaska oblaka i mehaničkog naprezanja izazvanim snijegom ili vjetrom. Ovisno o veličini pukotine, vlagi i naprezanju mogu pridonijeti nastajanju neaktivnih dijelova ćelije što priječi prolasku fotonaponske struje kroz ćelije,

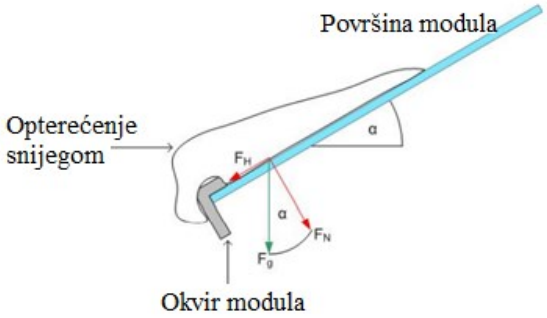
Lom okvira - opterećenje fotonaponskih modula teretom

Fotonaponski moduli dizajnirani su i primijenjeni na područja s velikim opterećenjem snijegom. Za testiranje fotonaponskih modula na područjima s jakim snježnim opterećenjem korišten je test snježnog opterećenja prema IEC61215. Snijeg se spušta po površini modula te može ući u prostor između ruba okvira i gornje površine. Led koji nastane kompresijom donjeg sloja snijega istisne rubni okvir modula (

Slika **4.9.**).

Slika 4.9. Oštećenje okvira fotonaponskog modula opterećenog snijegom; lijeva slika prikazuje sloj leda koji klizi prema rubu modula, srednja slika prikazuje odvajanje okvira od modula te desna slika prikazuje oštećenje kutnih spojeva [9]

Nagnuta površina ili vrh modula dopušta snijegu da prebaci opterećenje na donje dijelove modula, što izaziva okretni moment na stegnutim mjestima. Takva pojava pojačana je silom gravitacije u usporedbi sa središtem ili vrhom modula (Slika 4.10.).



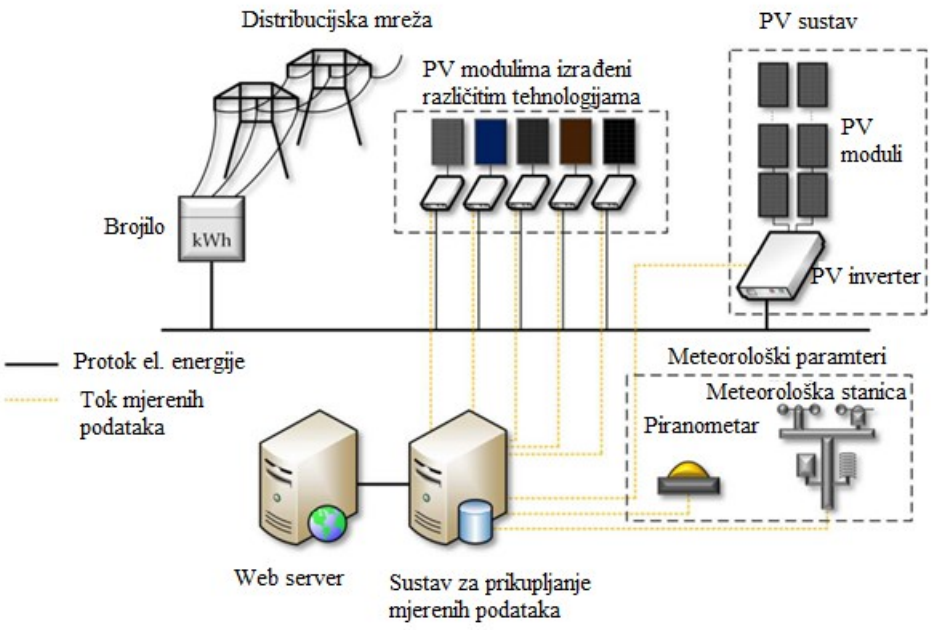
Slika 4.10. Opterećenje snijegom, razlika vektora opterećenja [9]

Opterećenja snijegom na fotonaponske module mogu se podijeliti u četiri karakteristike prema [9]:

1. Vertikalna opterećenja na površinu pod kutem dijele se na dvije komponente povezane sile: normalnu silu F_N i silu nizbrdice F_H, sila F_R je trenje između stakla i snijega te se suprotstavlja F_H.
2. Snijeg koji klizi niz površinu nehomogeno je raspoređen po površini modula.
3. Nehomogena opterećenja uzrokuju momente i zakretne momente u donjem dijelu modula duž aksijalnog smjera ispitnog uzorka. Stezaljke donjeg modula podložne su velikim momentima.
4. Niske temperature (<0°C) mogu uzrokovati krhkost ljepila i dodatno smanjiti stabilnost. Pri višim temperaturama može doći do klizanja tereta nanešenog na modul.

4.2. I-U karakteristika

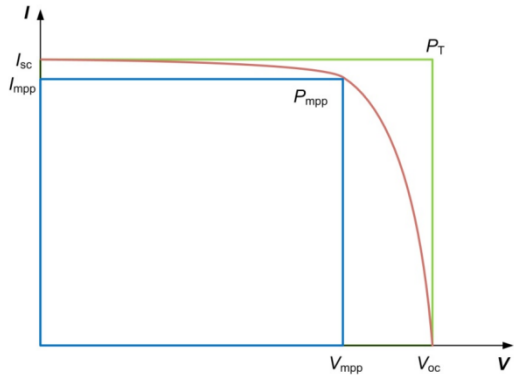
Mjerenja I-U karakteristike modula određuju struju kratkog spoja, napon otvorenog kruga i druge parametre. Prilikom ispitivanja fotonaponskih modula I-U metodom potrebna nam je sljedeća oprema: prirodni ili umjetni izvor svjetlosti, ispitni modul, PV inverter, uređaji za nadzor vremenskih prilika, uređaji za nadzor sustava za prikupljanje podataka te nesmetani tok informacija između svih elemanata koji su povezani u sustavu.



Slika 4.11. Oprema potrebna za ispitivanje I-U metodom [10]

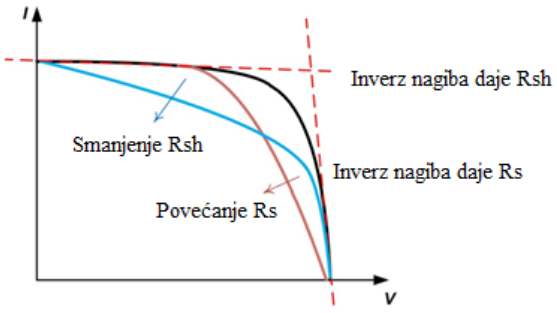
Iz I-U karakteristike mogu se izdvojiti neki ključni parametri za kvalitetno određivanje karakteristika fotonaponskog modula:

1. Napon otvorenog kruga (V_{oc}) - maksimalni napon dostupan iz fotonaponskog modula i pojavljuje se pri nultoj struji.
2. Struja kratkog spoja (I_{sc}) - struja kroz modul kada je napon na ćeliji nula.
3. Maksimalna snaga (P_{max}) - definirana je kao točka na I-U krivulji fotonaponskog modula pod osvjetljenjem, gdje je umnožak struje (I_{mpp}) i napona (V_{mpp}) maksimalan.
4. Faktor punjenja (FF) - je mjera kvalitete solarne ćelije ili fotonaponskog modula tj. omjer koji uspoređuje maksimalnu snagu fotonaponskog modula s virtualnom snagom (P_T) koja bi nastala kada bi V_{mpp} bio napon otvorenog kruga i I_{mpp} struja kratkog spoja. Faktor popunjenosti može se grafički protumačiti kao omjer pravokutnih površina prikazanih na Slika 4.12.



Slika 4.12. Shematski prikaz I-U karakteristike osvijetljenog fotonaponskog modula te najvažniji parametri [9]

Kako bi bolje razumjeli I-U karakteristiku fotonaposkog modula, potrebno je razumjeti nagibe na samoj karakteristici koji su određeni serijskim otporom (R_s) i otporom shanta (R_{sh}). Serijski otpor jesu svi serijski otpori fotonaponskih ćelija te njihova međusobna povezanost koja također utječe na serijski otpor. Razlike u I-U karakteristikama različitih fotonaponskih ćelija također utječe na ukupni parametar R_s u fotonaponskom modulu. Veliki serijski otpor može biti uzrokovan dodavanjem serijskih otpora u modulu ili neusklađenošću pojedinačnih (različitih) karakteristika ćelije. Otpor shunta definira put kojim struja zaobilazi aktivnu fotonaponsku ćeliju. Ako je otpor shunta ćelije malen tada shunt pokazuje veće struje propuštanja. Otpor shunta utječe na faktor punjenja modula, struju kratkog spoja i napon otvorenog kruga, posebno kada se pojavi fenomen izdržljivosti žarišta (područje s vrlo visokom količinom infracrvenog zračenja). Treba primijetiti da se tumačenje serijskog otpora R_s i otpora shunta R_{sh} primjenjuje samo ako su sve solarne ćelije u modulu sasvim usporedive.



Slika 4.13. I-U karakteristika osvijetljenog fotonaponskog modula i utjecaj serijskog otpora R_s i otpora shunta R_{sh} na I-U karakteristiku. [9]

Postoji mnogo točaka koji utječu na točnost mjerenja I-U karakteristike. Kako bi poboljšali točnost mjerenja, izvedba svakog kanala sustava za akviziciju I-U karakteristika mora biti kalibrirana u ovlaštenom laboratoriju. Za točno mjerenje važno je znati karakteristike modula koji se ispituje. Modul koji se ispituje treba staviti u područje s najhomogenijom distribucijom svjetla i mjeriti u vremenskom razdoblju s konstantnom razinom intenziteta i spektra svjetla. Za unutarnja i za vanjska mjerenja, parametre okoline treba pratiti kako bi se temperatura održala homogenom i konstantnom što je više moguće. Kako različiti fotonaponski moduli imaju specifične temperaturne koeficijente, temperaturu treba kontrolirati blizu željene razine temperature kako bi se smanjila korekcija napona i struje [24].

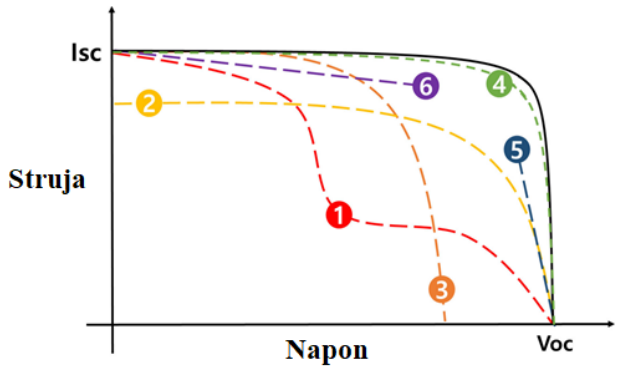
Moguća odstupanja između izmjerene i očekivane I-U karakteristike prema [11]:

1. Neusklađenost: Fotonaponski moduli u fotonaponskom polju mogu biti spojeni serijski ili paralelno. Kada imamo niz, koji se odnosi na nekoliko fotonaponskih modula spojenih u seriju, poveže s drugim nizovima serijski i paralelno, može doći do višestrukih disfunkcija. Jedna od mogućih disfunkcija je da bi struja proizvedena iz jednog niza serijski spojenih fotonaponskih panela mogla biti niža (viša) od struje dobivene iz drugih nizova serijski spojenih fotonaponskih panela. Uzroci u krivulji mogu biti kvar u premosnoj diodi, oštećene ćelije ili velika neusklađenost fotonaponskih ćelija u modulu. Kada dođe do takvog neslaganja, I-U karakteristika sustava ima oblik krivulje 1 na Slika 4.14. .
2. Uniformno onečišćenje: Neusklađenost modula u nizovima obično se događa zbog razlika u proizvedenoj električnoj energiji. Niža struja kratkog spoja I_{sc} od očekivane je uzrokovana: gubitkom prozirnosti zbog posmeđivanja ili žućenja, korozijom stakla koja smanjuje dopiranje svjetlosti modula ili delaminacijom koja uzrokuje optičko odvajanje

slojeva što rezultira smanjenom proizvodnjom što je vidljivo na I-U karakteristici na krivulji 2 na Slika 4.14. .

3. Premosna dioda: Kada je površina fotonaponskog modula zaprljana ili zasjenjena, fotonaponske ćelije u tom određenom području ne mogu generirati istu količinu električne energije kao normalne ćelije. U takvom stanju kvara (neispravne međusobne veze ćelija, kratki spojevi između ćelija) napon proizveden iz drugih normalnih ćelija bio bi prebačen na neispravne ćelije, što bi rezultiralo žarištima (područje s vrlo visokom količinom infracrvenog zračenja) ili drugim kvarovima. Premosna dioda ugrađena je u fotonaponski modul kako bi se smanjila šteta nastala u takvoj situaciji. Ako premosna dioda radi, struje generirane iz normalnih ćelija tada teku kroz premosnu diodu umjesto kroz neispravne ćelije. Kada premosna dioda radi, napon otvorenog kruga se smanjuje, što rezultira I–U karakteristikom u obliku krivulja 1 i 3 na Slika 4.14.
4. Nepoznato koljeno: Krivulja 4 na Slika 4.14. prikazuje I–U karakteristiku nepoznatog koljena, što je slučaj kada do degradacije dolazi bez jasnog razloga. Takav slučaj zahtijeva značajno vrijeme i opće provjere kroz cijeli fotonaponski sustav.
5. Serijski otpor: Postoje različiti izvori serijskog otpora u fotonaponskim ćelijama i modulima. Veliki utjecaj na serijski otpor imaju: kontaktni otpor između metalnog kontakta i silicija fotonaponske ćelije, nepodudarnost između fotonaponskih modula, smanjenje faktora punjenja (maksimalne izlazne snage modula). Ako je serijski otpor dovoljno velik (serijski otpor u modulu može se povećati korozijom u razvodnoj kutiji, lošim spojevima ili povećanjem otpora međupovezanosti), to može rezultirati smanjenjem struje kratkog spoja. Serijski otpor ne utječe na fotonaponsku ćeliju pri naponu otvorenog kruga jer ukupna struja teče kroz fotonaponsku ćeliju, što rezultira serijskim otporom od 0Ω. Dok na napona otvorenog kruga serijski otpor uvelike utječe kao što je vidljivo iz krivulje 5 na Slika 4.14.
6. Otpor shanta: Pad proizvodnje električne energije uzrokovan smanjenjem otpora shanta općenito se događa tijekom proizvodnje. Ako je otpor shunta prenizak, svjetlosno inducirana struja mogla bi teći kroz neodređene puteve, što bi rezultiralo smanjenjem snage. Kada se formira takva neželjena premosnica, smanjuje se struja kroz fotonaponski modul i napon otvorenog kruga. Greška uzrokovana otporom shunta još je drastičnija u uvjetima niskog zračenja jer je svjetlosno inducirana struja u ovoj situaciji manja. I–U krivulja fotonaponskog modula kako se otpor shanta smanjuje može se vidjeti u obliku kao krivulja 6 na Slika 4.14.

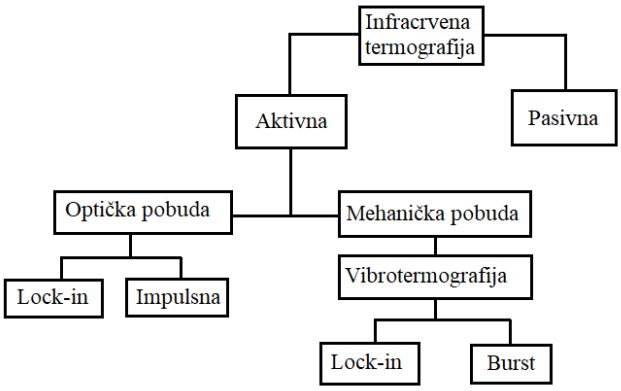
7. Faktor dizajna: metoda analize koja koristi vrijeme rada od trenutka početnog zračenja na površini fotonaponskog sustava do vremena generiranja izmjenične struje u inverteru.



Slika 4.14. Odsutpanja izmjerene i očekivane vrijednost I-U karakteristike [11]

4.3. Infracrvena termografija

Infracrvena (IR) termografija je beskontaktna metoda kojom određujemo raspodjelu temperature na površini određenog objekta mjerenjem intenziteta zračenja u infracrvenom području elektromagnetskog spektra. Infracrvenu termografiju, s obzirom na informacije koje nam pruža možemo podijeliti na kvalitativnu i kvantitativnu termografiju, a s obzirom na razinu stimulacije potrebne za dobivanje termograma na pasivnu i aktivnu [12]. Kvalitativna termografija ima za cilj pružiti osnovne informacije o raspodjeli temperature na površini promatranog objekta, dok za kvantitativnu analizu pri infracrvenom snimanju je potrebno definirati točne vrijednosi emitivnosti, reflektirane i prividne temeprature te voditi brigu o vremenskim uvjetima. Osnovna podjela infracrvene termografije vidljiva je na Slika 4.15. .



Slika 4.15. Osnovna podjela infracrvene termografije

Osnovne prednosti korištenja infracrvene termografije pri određivanju raspodjele temperature su: relativno jednostavna metoda ispitivanja, brza detekcija te beskontaktna metodologija. Glavna

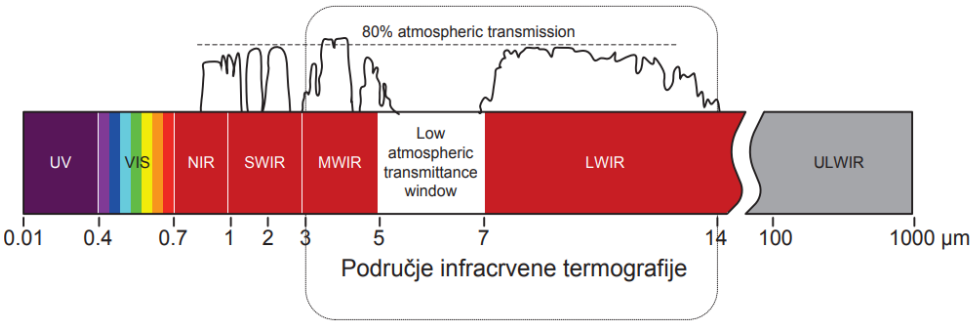
mjesta primjene IR termografije jesu održavanje fotonaponskog modula i detektiranje istjecanja plina. Prilikom ispitvanja fotonaponskih modula metodom infracrvene termografije potrebna nam je odgovarajuća oprema: prirodni ili umjetni izvor svjetlosti, ispitni modul te termografska kamera. Termografsku kameru odabiremo prema rezoluciji, vidnom polju, temperaturnom opsegu mjerenja, razlučivosti temperaturne razlike, brzini osvježavanja, točnosti te neke kamere imaju mogućnost videozapisa. Ovino o navedenim parametrima možemo usporediti dostupne infracrvene kamere na tržištu (

Tablica **4.1.**). Kako bi termografske slike bile kvalitetne potrebno je uspješno korištenje termografske kamere za što je potrebna osoba s iskustvom i znanjem prvog stupnja obuke.

Tablica 4.1. Usporedba dvije infracrvene kamera na tržištu te njihov cijenovni rang [25] [26]

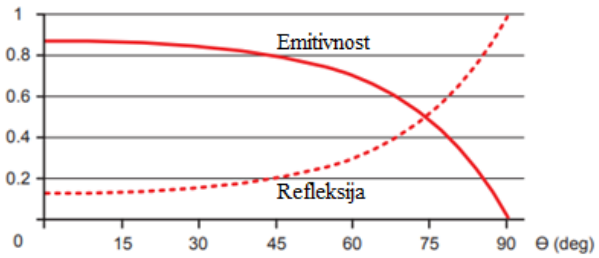
FLIR			**FLUKE**		
T1020 **T865**			**TiX10000** **TiX480**		
Model	**Maksimalna temperatura**	**Cijena**	**Model**	**Maksimalna temperatura**	**Cijena**
T1020 (1024 × 768)	2000°C	45149 $	TiX1000 (2048 x 1536)	2000°C	57399 $
T1010 (1024 × 768)	650°C	38849 $	TiX660 (1280 x 960)	2000°C	43299 $
T865 (640 × 480)	2000°C	29349 $	TiX640 (640 x 480)	2000°C	32799 $
T840 (464 × 348)	2000°C	21999 $	TiX620 (640 x 480)	600°C	21995 $
T540 (464 × 348)	1500°C	15959 $	TiX580 (640 x 480)	1000°C	21999 $
T530 (320 × 240)	1200°C	14909 $	Ti480 (1280 x 960)	1000°C	12399 $
E96 (640 × 480)	1500°C	13149 $	Ti450 (640 x 480)	1200°C	9199 $
E86 (464 × 348)	1500°C	12079 $	Ti400 (320 x 240)	1200°C	7899 $
E76 (320 × 240)	1000°C	7789 $	TiS75 (384 x 288)	550°C	5899 $
E54 (320 × 240)	650°C	5619 $	TiS60+ (320 x 240)	400°C	4049 $

Infracrvna termografija daje nam drugačiji pogled na sve objekte oko nas. Svaki objekt koji ima temperaturu iznad apsolutne nule emitira infracrveno zračenje. Infracrveni pojasevi se u elektromagnetskom spektru mogu podijeliti na: ultradugi val infracrveni (ULWIR): 14-30 µm, dugovalni infracrveni (LWIR): 8-14 µm, srednjovalni infracrveni (MWIR): 3-5 µm, kratkovalni infracrveni (SWIR): 1-2,7 µm, bliži infracrveni (NIR): 0,75-1 µm. Infracrvene kamere uglavnom koriste dugovalni infracrveni pojas zračenja jer je u tome području najmanji utjecaj Sunca na samu kameru te zbog manjeg sadržaja vodene pare i dodatnog prigušenja.

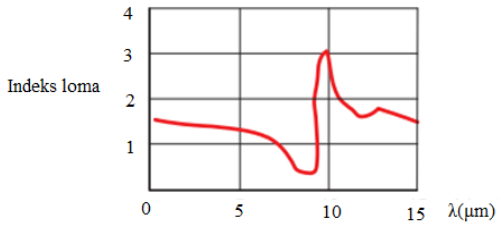


Slika 4.16. Pojasevi infracrvenog zračenja u elektromagnetskom spektru [13]

Termografsko mjerenje staklenih površina zahtjevan je zadatak zato što su staklene površine iznimno reflektivne te se različito ponašaju pri različitim valnim duljinama. Kako bi se napravio što bolji i kvalitetniji termograf trebamo eliminirati refleksiju što postižemo promjenom kuta snimanja termografa. Povećanjem kuta snimanja termografa smanjuje se refleksija kao što je vidljivo na Slika 4.17. Refleksija stakla može uzrokovati pogrešku čak do 15°C u termografskim očitanjima, ovisno o pokrivenosti naoblakom u trenutku mjerenja. Drugi problem je da se refleksija u staklu mijenja s različitim valnim duljinama (Slika 4.18.).

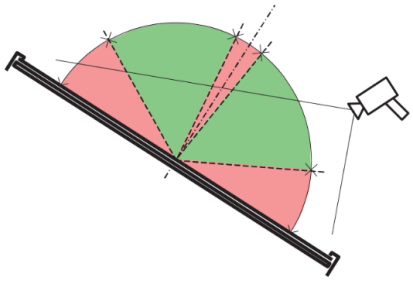


Slika 4.17. Ovisnost emitivnosti i refleksije o kutu snimanja termografa [13]



Slika 4.18. Ovisnost refleksije i indeksa loma o valnoj duljini [13]

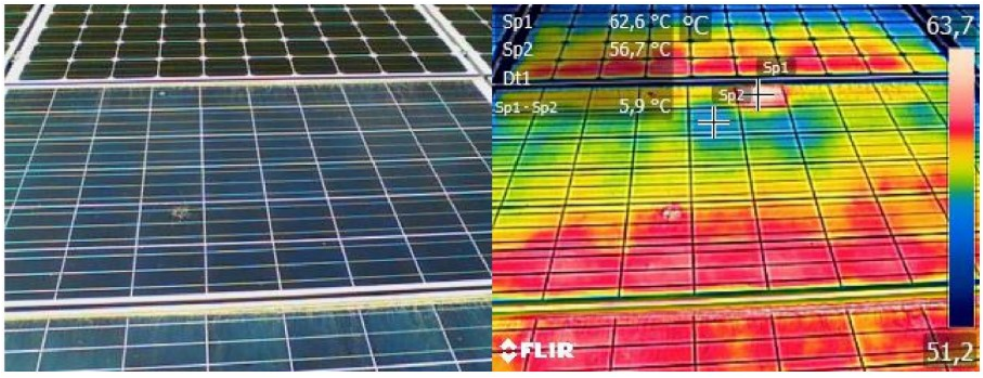
Kut gledanja fotonaponskog modula trebao bi biti 5°-60°, uzimajući u obzir da je 0° okomito na ravninu fotonaponskog modula, kao što je vidljivo na Slika 4.19. . Definirano zeleno područje je najpoželjnije za snimanje infracrvenom termalnom kamerom. Za ispravno mjerenje temperature infracrvena kamera treba biti postavljena na ispravnu temperaturu okoline i vrijednosti emisivnosti za pregledanu površinu. Mjerenja sa stražnje strane, kada je to moguće, točnija su nego sa strane stakla.



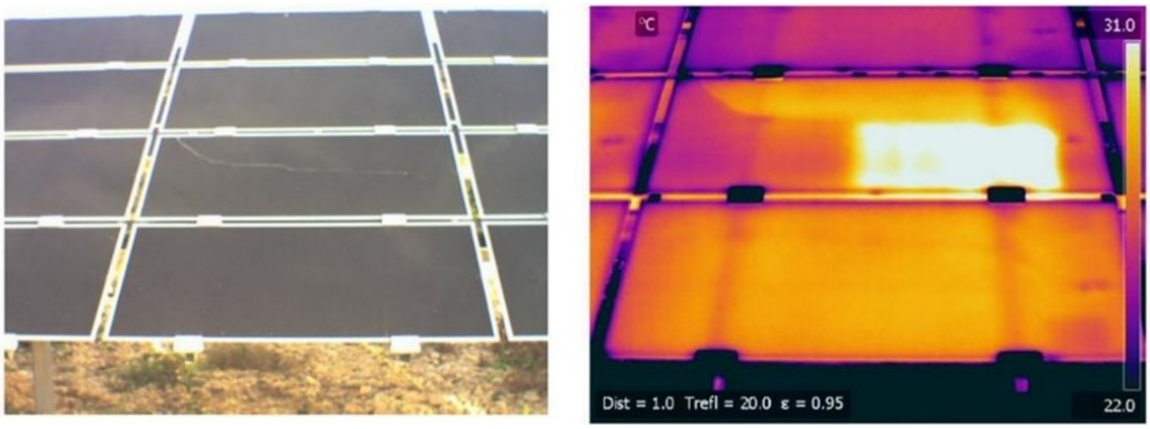
Slika 4.19. Poželjan kut za mjerenje temperature infracrvenom kamerom [13]

Termovizijske kamere mogu prikazati niz problema kao što su:

- nedostaci u ćelijama (nečistoće/plinski džepovi ili pukotine)



Slika 4.20. Temperature razlike do kojih je došlo zbog nečistoća (pijesak) na modulu [27]

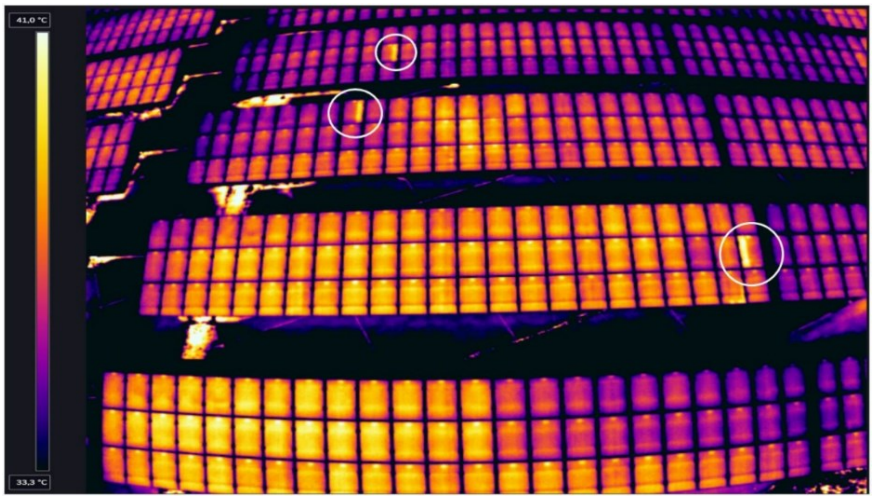


Slika 4.21. Temperature razlike do kojih je došlo zbog pukotine na modulu [15]

- privremeno zasjenjivanje (prljavština, onečišćenje, vlaga, ptičji izmet)

Slika 4.22. Temperature razlike do kojih je došlo zbog zasjenjivanje modula [15]

- neispravna premosna dioda ili neispravne međusobne veze.



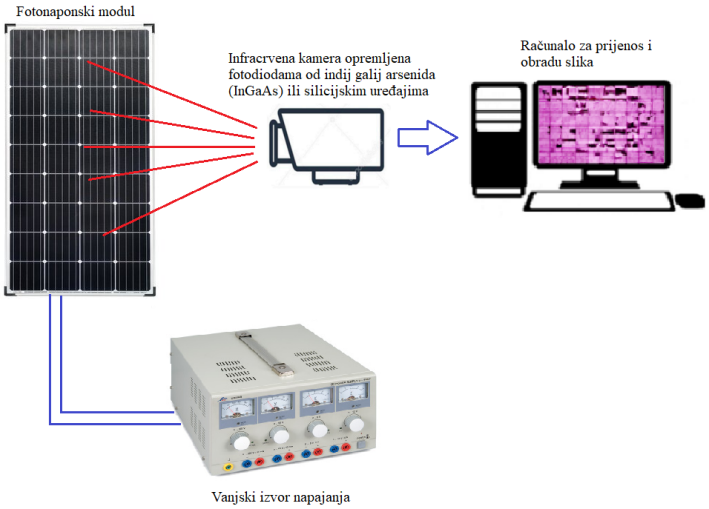
Slika 4.23. Temperature razlike do kojih je došlo zbog neispravne premosne diode [28]

Tablica 4.2. Mogući kvarovi na fotonaponskom modulu dobiveni pomoću termografske kamere

Vrste oštećenja na fotonaponskim modulima:	***Pojaviti će se na IR slici kao:***
Nečistoće na modulu	Područje s vrlo visokom ili vrlo niskom količinom infracrvenog zračenja
Pukotine u ćeliji	Zagrijavanje ćelije
Zasjenjivanje, Ptičji izmet, Vlažnost zraka	Područje s visokom količinom infracrevnog zračenja
Neispravno spojena ili neispravna premosna (engl. bypass) dioda	„Patchwork“ uzorak - gdje su pojedine stanice nasumično raspoređene i znatno toplije
Neispravne međusobne veze modula	Modul je konstantno sve topliji

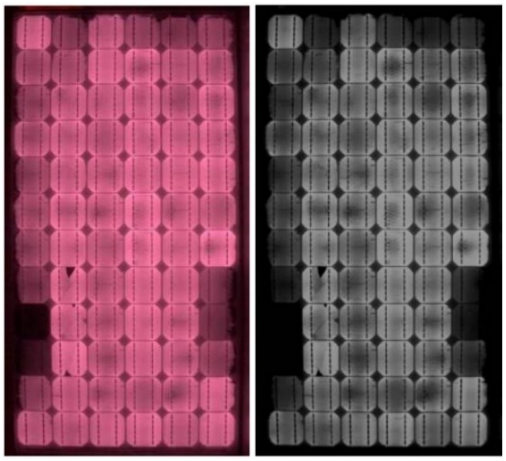
4.4. Elektroluminiscencija

Standardi rad fotonaponske ćelije je da prihvaća i apsorbira sunčevu svjetlost te je pretvara u električnu energiju. Zbog principa recipročnosti moguć je i suprotni rad te nudi mogućnost elektroluminiscencijskog (EL) snimanja. Elektroluminiscencija je fenomen koji se nedavno počeo koristiti za istraživanja na fotonaponskih modulima. EL snimanje izvodi se tako da se fotonaponski ispitivani modul napaja odgovarajućim naponom i strujom te se mjeri fotoemisija pomoću infracrvene osjetljive kamere [15]. Oštećena područja fotonaponskog modula izgledaju tamno ili slabije zrače od područja bez nedostataka. Visoka rezolucija elektroluminiscencijskih snimaka omogućuje preciznije rješavanje nekih nedostataka nego kod infracrvenih snimaka. Za elektroluminiscencijsko ispitvanje neophodni su: kamera koja može očitati infracrveno zračenje, varijabilno napajanje koje dopušta primjenu odgovarajućeg napona i struje na fotonaponskom generatoru za emisiju luminiscencije u mračnim uvjetima te računalo opremljeno softverom za prijenos i obradu elektroluminiscencijskih slika.



Slika 4.24. Potrebna oprema za elektroluminiscencijsko ispitivanje

Elektroluminiscencijska mjerenja iskorištavaju prednost radijacijske rekombinacije pobuđenih nositelja naboja u fotonaponskim ćelijama. Elektroluminiscencijsko ispitivanje započinje primjenom prednapona na fotonaponski generator u potpuno zamračenom laboratoriju. Fotonaponske ćelije raditi će poput LED dioda u kojima njihovi poluvodički materijali imaju spektre emisije u infracrvenom području elektromagnetskog spektra. Emitirane fotone može detektirati kamera opremljena fotodiodama od indij galij arsenida (InGaAs) ili silicijskim uređajima, tj. silicijskim nabojno spregnutim uređajem (CCD/CMOS) [29]. InGaAs senzori garantiraju visoku rezoluciju slike, ali s visokom cijenom senzora (1000-10000€). S druge strane, CCD/CMOS senzor ima relativno slab odziv u infracrvenom području, ali je njegova cijena realtivno zanemariva (<< 1000 €). Zbog tih razloga uporaba kamere s CCD/CMOS senzorom još je zanimljivija te se radi na tome da se što bolje iskoristi takav slab odziv CCD/CMOS senzora. Kvaliteta slike elektroluminiscencijskog testa provedenog pomoću CCD senzora možemo usporediti s onom dobivenom InGaAS senzorom. Rezultati su vrlo dobri, ne mogu se uočiti nikakve posebne razlike kao što je i vidljivo na Slika 4.25.

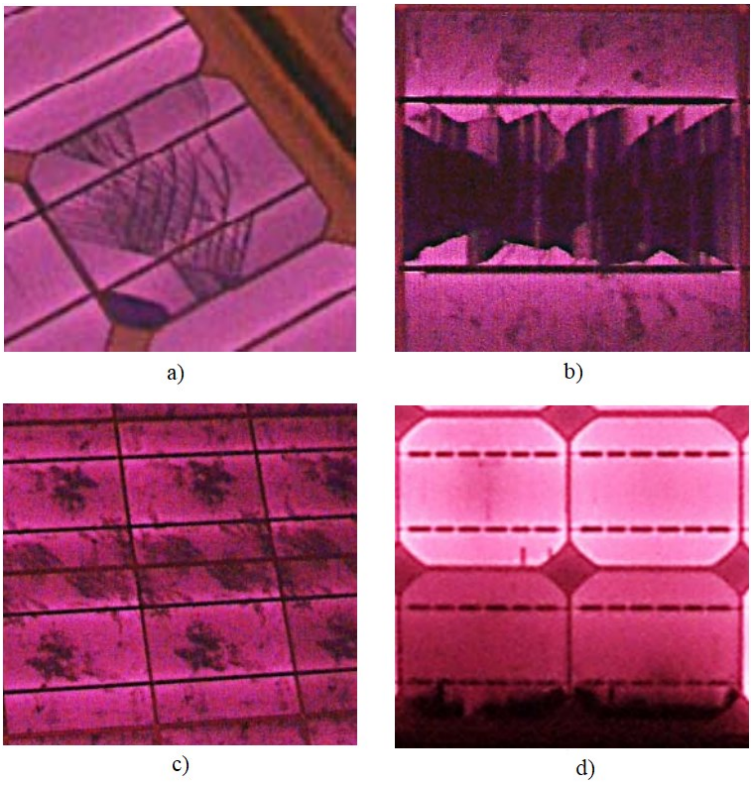


Slika 4.25. Elektroluminiscencijska slika modula ćelija nastala: pomoću kamere s CCD senzorom (lijevo); pomoću kamere s InGaAs senzorom (desno). [9]

Elektroluminiscencijskim testiranjem možemo otkriti različite vrste nedostataka i kvarova koji se mogu pojaviti tijekom cijelog životnog vijeka fotonaponskog modula, tj. procesa proizvodnje, transporta, instalacije i održavanja. Najvažniji nedostatci koji se mogu detektirati elektroluminiscencijom su:

- Mikropukotine - mogu nastati tijekom proizvodnje, tijekom transporta i na terenu. Najčešća vrsta mikropukotina pojavljuje se na terenu tijekom instalacije i rada, uzrokovana ljudskim i okolišnim uzrocima (npr. toplinski stres, tuča, oluja i munje).

- Slomljene stanice - mehanička ili toplinska opterećenja mogu transformirati mikropukotine u slomljene stanice (Slika 4.26. a). Pukotine uključuju električnu izolaciju dijelova ćelija s ograničenjem struje u cijelom nizu serijski povezanih ćelija. Pukotine su jedan od glavnih izvora gubitka snage u fotonaponskim modulima (Slika 4.26. b).
- Nečistoće – uzrokovane proizvodnim procesima niske kvalitete ili neravnomjerna raspodjela temperature električnih spojeva (tamnije na Slika 4.26. c).
- Potencijalno inducirana degradacija (PID) - degradacija I-U karakteristike fotonaponskog generatora uzrokovana propuštanjem struja prema okviru. Visoki napon u odnosu na uzemljenje te visoka temperatura i vlažnost su pokretački čimbenici. Rezultat je električna izolacija nekih fotonaponskih ćelija i veliki gubitak snage na razini modula. U donjem dijelu Slika 4.26. d, dvije tamnije ćelije su pogođene PID-om, s potpuno neaktivnim i crnim rubovima (zatvaranje okvira).



Slika 4.26. Nedostatci u fotonaponskim ćelijama koji se mogu detektirati elektroluminiscencijskim testiranjem [29]

5. ZAKLJUČAK

Životni vijek fotonaponskih panela je oko 25 godina, nakon 25 godina učinkovitost im se smanjuje ispod 85 % nakon čega se očekuje zamjena istih. Tijekom životnog vijeka fotonaponskih panela potrebna je stalna provjera i ispitivanja kako bi fotonaponski paneli mogli obavljati svoju glavnu zadaću proizvodnje električnu energiju. Ispitivanje fotonaponskih elektrana moguće je na nekoliko načina. Jedan od načina je vizualni pregled fotonaponskih modula koji je najbrža metoda za pronalaženje kvarova i nedostataka na fotonaponskom modulu. Kako bi započeli vizualni pregled modula potrebno nam je osvjetljenje veće od 1000 luxa, traže se samo nedostatci koji se mogu detektirati golim okom. Drugi način ispitivanja je ispitivanje pomoću I-U karakteristike. Iz strujno-naponske karakteristike mogu se izdvojiti osnovni parametri za kvalitetno određivanje karakteristika fotonaponskog modula. Odstupanja kao: neuskalđenost između fotonaponskih modula, posmeđivaje ćelija, onečišćenje površine fotonaponskog modula, degradacija, povećanje serijskog otpora, smanjenje otpora shanta vidljivi su iz I-U karaktristike fotonaponskog modula. Sljedeće dvije važne metode ispitivanja su ispitivanje infracrvenom termografijom i elektroluminiscencijom. Elektroluminiscencija i infracrveno isptivanje su nedestruktivne tehnike mjerenja. Ove vrste optičkih ispitivanja daju nam brze slike visoke rezolucije u stvarnom vremenu s dvodimenzionalnom distribucijom karakterističnih značajki fotonaponskih modula. Kombinacijom elektroluminiscencije i infracrvene termografije možemo detektirati veliki broj kvarova u fotonaponskom modulu. Odgovarajuća metoda ovisi o specifičnom tehnološkom problemu koji se promatra. Elektroluminiscencija najbolji je postupak za određivanje životnog vijeka, oslikavanje serijskog otpora i točnog mjesta loma spoja te skupno oslikavanje nepravilnosti i kvaorava fotonaponskog modula, dok nam je infracrveno ispitivanje puno bolje za sve zadatke koji zahtijevaju kvantitativno mjerenje struje.

LITERATURA

[1] B. Udovičić, Elektroenergetika, Zagreb: Školska knjiga, 1983.

[2] H. Požar, Osnove energetike, Zagreb: Školska knjiga, 1973.

[3] L. Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Zagreb: Graphis, 2008.

[4] L. Majdandžič, Solarni sustavi, Zagreb: Graphis, 2010.

[5] K. Hartung, R. Horeczki, Z. Klaić, S. Z. Kovács, B. Pallos, D. Pelin, M. Primorac, P. Póla, D. Šljivac, A. Suvák, T. Szabó, D. Topić i V. Varjú, Utjecaj fotonaponskih sustava na regiju, Pécs: Publikon Kiadó, 2014.

[6] D. Šljivac i D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2018.

[7] A. Fairbrother, M. Boyd, Y. Lyu, J. Avenet, P. Illich, Y. Wang, M. Kempe, B. Dougherty, L. Bruckman i X. Gu, Differential degradation patterns of photovoltaic backsheets at the array level, Elsevier Ltd, 2016.

[8] J. H. Wohlgemuth, P. Hacke, N. Bosco, D. C. Miller, M. D. Kempe i S. R. Kurtz, Assessing the Causes of Encapsulant Delamination in PV Modules, IEEE, 2016.

[9] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu i M. V. Iseghem, Review of Failures of Photovoltaic Modules; IEA PVPS Task 13, External final report IEA-PVPS, International Energy Agency, 2014.

[10] D. Došen, M. Žnidarec i D. Šljivac, Measurement Data Acquisition System in Laboratory for Renewable Energy Sources, IEEE, 2019.

[11] G. G. Kim, W. Lee, B. G. Bhang, J. H. Choi i H. K. Ahn, Fault Detection for Photovoltaic Systems Using Multivariate Analysis With Electrical and Environmental Variables, IEEE, 2020.

[12] H. Glavaš, M. Hadzima-Nyarko, I. Haničar Buljan i T. Barić, Locating Hidden Elements in Walls of Cultural Heritage Buildings by Using Infrared Thermography, MDPI, 2019.

[13] H. Glavaš, M. Vukobratović, M. Primorac i D. Muštran, Infrared Thermography in Inspection of Photovoltaic Panels, IEEE, 2017.

[14] H. Glavaš, M. Žnidarec, D. Šljivac i N. Vesić, Application of Infrared Thermography in an Adequate Reusability Analysis of Photovoltaic Modules Affected by Hail, Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2022.

[15] U. Jahn, M. Herz, M. Köntges, D. Parlevliet, M. Paggi, I. Tsanakas, J. S. Stein, K. A. Berger, S. Ranta, R. H. French, M. Richter i T. Tanahashi, Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications, International Energy Agency, 2018.

[16] A. Perić, Izvedba upravljačkog sustava hibridnog naponsko-toplinskog sunčanog modula, Diplomski rad, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2017.

[17] Schrak Technik, Fotonapon i pohrana energije, Fotonapnski moduli, dostupno na: https://www.schrack.hr/trgovina/fotonapon-pohrana-energije/fotonaponski-moduli/exe-solar-a-exp-290wp-poly-iec-8kpa-paletno-pak-pvm42900-p.html/. [Lipanj 2022.].

[18] B. Danko, Fotonaponski sustavi i sklopovi energetske elektronike za fotonaponske sustave, Diplomski rad, Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2016.

[19] Sunkauf, Module mit delamination, dostupno na: https://www.sunkauf.de/module-mit-delamination/. [Kolovoz 2022].

[20] Winaico, A Defective Junction Box Can Leave a Solar Panel in Open Circuit, dostupno na: https://winaico.com/blog/common-solar-panel-defects/. [Kolovoz 2022].

[21] D. C. Jordan i S. R. Kurtz, Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review, Wiley Online Library, 2011.

[22] Residencestyle, How to Know When Your Solar Panels Need Repairing, dostupno na: https://www.residencestyle.com/how-to-know-when-your-solar-panels-need-repairing/. [Kolovoz 2022].

[23] RST-CleanTech Solutions, How to Prevent Your Solar Panels From Cracking, dostupno na: https://www.rst-cleantech.com/blog/how-to-prevent-your-solar-panels-from-cracking/. [Kolovoz 2022].

[24] M. Jankovec, M. Topič i M. Herman, Optimal I-V Curve Scan Time of Solar Cells and Modules in Light of Irradiance Level, Hindawi Publishing Corporation, 2012.

[25] Flir, Products, Professional tools, Thermography Cameras, dostupno na: https://www.flir.com/browse/professional-tools/thermography-cameras/. [Kolovoz 2022].

[26] Fluke, Products, Thermal cameras, dostupno na: https://www.fluke.com/en-us/products/thermal-cameras/. [Kolovoz 2022].

[27] I. Bićanić, Infracrvena termografija u održavanju fotonaponske elektrane, Diplomski rad, Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2021.

[28] Kitawa, Photovoltaic Systems, dostupno na: https://kitawa.de/en/thermography-pv-systems/. [Kolovoz 2022].

[29] A. Ciocia, A. Carullo, P. Di Leo, G. Malgaroli i F. Spertino, Realization and Use of an IR Camera for Laboratory and On-field Electroluminescence Inspections of Silicon Photovoltaic Modules, IEEE, 2019.

SAŽETAK

Ovaj rad opisuje metode ispitivanja fotonaponskih elektrana u praksi te nedostatke i kvarove koji se mogu otkriti pojedinom metodom. Opisane su fizikalne osnove fotonaponskih modula, PN spoj i fotonaponski efekat. Navedena su i tehnička svojstva fotonaponskih panela, najčešće upotrebljeni materijali pri proizovdnji fotonaponskih ćelija, postupak proizdovnje te princip rada fotonaponske ćelije. Također definirani su fotonaponski sustavi, njihova osnovna podjela te dijelovi svake fotonaponske elektrane. Nadalje, u radu su detaljno opisane glavne metode ispitivanja fotonaponskih elektrana u praksi: vizualni pregled fotonaponskih modula, ispitivanje pomoću I-U karakterstike, testiranje infracrvenom termografijom te ispitivanje elektroluminiscencijom. Istaknute su karateristike ovih testiranja te kvarovi i nepravilnosti koji se mogu identificirati pojedinom metodom ispitivanja. Svi teorijski dijelovi upotpunjeni su formulana, tablicama i slikama iz prakse.

Ključne riječi: PN spoj, fotonaponski efekt, fotonaponska ćelija, I-U karakteristika,vizualni pregled, infracrvena termografija, elektroluminiscencija.

ABSTRACT

This paper describes the methods of testing photovoltaic power plants in practice and the defects and faults that can be detected by a particular method. The physical basis of photovoltaic modules, the PN junction and the photovoltaic effect are described. The technical properties of photovoltaic panels, the most commonly used materials in the production of photovoltaic cells, the production process and the principle of operation of photovoltaic cells are also listed. Photovoltaic systems, their basic division and parts of each photovoltaic power plant are also defined. Furthermore, the paper describes in detail the main methods of testing photovoltaic power plants in practice: visual inspection of photovoltaic modules, testing using I-U characteristics, testing with infrared thermography and testing with electroluminescence. The characteristics of these testing failures and irregularities that can be identified by a particular testing method are highlighted. All theoretical parts are completed with formulas, tables and pictures from practice.

Key words: PN junction, photovoltaic effect, photovoltaic cell, I-U characteristic, visual inspection, infrared thermography, electroluminescence.