

# Procjena uticaja prepreka i topologije fotonaponskog sistema na godišnju proizvodnju električne energije

Predrag Mršić<sup>1,2</sup>, Čedomir Zeljković<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina  
predrag.mrsic@etf.unibl.org

*Sažetak* — U ovom radu je prikazana metodologija za procjenu uticaja prepreka, koje prave sjenku, na proizvodnju električne energije iz fotonaponskih sistema. Posebna pažnja je usmjerena na detaljno modelovanje fotonaponskih modula i topologiju samog sistema. Takođe, izvršena je detaljna analiza uticaja prepreka na difuznu komponentu zračenja. Reflektovana komponenta zračenja je zanemarena. Matematički model je softverski implementiran i testiran na ilustrativnom primjeru fotonaponskog sistema instalisane snage 11 kW za tipičnu meteorološku godinu posmatrane lokacije.

*Ključne riječi* - fotonaponski sistemi; model fotonaponskog modula; softverski alat; uticaj prepreka.

## I. UVOD

Ovaj rad predstavlja dio sveobuhvatnog istraživanja procjene godišnje proizvodnje fotonaponskog sistema na krovu potencijalne zgrade amfiteatra Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci. On predstavlja nadogradnju na rad [1], pa će ovaj uvod biti nešto kraći. U radu [1] je opisan matematički model za procjenu godišnje proizvodnje fotonaponskog sistema u prisustvu prepreka koje prave sjenku na module. Procjena godišnje proizvodnje električne energije je izvršena na bazi tipične meteorološke godine. Difuzna komponenta zračenja na module u sjenci je zanemarena, te fotonaponski moduli i topologija sistema nisu detaljno modelovani. U odnosu na rad [1] u ovom radu je u analizu uključena i difuzna komponenta zračenja u prisustvu prepreka, fotonaponski moduli su detaljno modelovani, a takođe i topologija sistema.

Tehnička i ekonomska analiza fotonaponskih sistema u gradskim sredinama zahtijeva detaljniji pristup u odnosu na sisteme locirane van gradova budući da zaklanjanje čak i male površine fotonaponskog modula dovodi do neuporedivo većeg gubitka u proizvodnji električne energije. Naime, u gradskim sredinama, zbog gustine stambenih objekata, veća je vjerovatnoća pojave sjenčenja koja dovodi do smanjenja proizvedene električne energije bez obzira da li je fotonaponski sistem integrisan u fasadu zgrade ili se nalazi na krovu [2].

Za analizu rada i uticaja sjenčenja na rad fotonaponskog panela polazimo od strujno-naponske karakteristike modula. Karakteristike fotonaponskih modula su nelinearne i zavise od iradijansa i temperature modula. Povezivanjem više modula na red formiraju se fotonaponski nizovi. Različite iradijanse i temperature modula koji čine niz dovode do različitih strujno-naponskih karakteristika fotonaponskih modula, što dovodi do određenih gubitaka usljed neusklađenosti, odnosno odstupanja

radnih tačaka modula od optimalnih [3]. U ovoj analizi, pošto se radi o godišnjoj procjeni energije, modul se posmatra kao cjelina i analiza se vrši na nivou jednog sata.

Rad se fokusira na gubitke koji nastaju usljed neusklađenosti optimalnih radnih tačaka modula sa radnim tačkama koje se uspostavljaju kada moduli rade u nizu, te na gubitke nastale sjenčenjem modula. Ostali gubici, kao što su: gubici nastali usljed zaprljanosti modula, gubici u provodnicima za povezivanje modula i pretvarača, gubici u konektorima, gubici nastali usljed svjetlosne degradacije, gubici nastali usljed odstupanja parametara modula od naznačenih i gubici nastali usljed isključenja sistema, planiranih i neplaniranih nisu detaljno modelovani nego je samo za procijenjeni iznos tih gubitaka, prema [5], umanjena DC snaga modula, odnosno iradijansa na module kada su u pitanju gubici usljed zaprljanosti modula.

## II. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Metodologija za proračun godišnje proizvodnje fotonaponskog modula, u suštini, ima isti oblik kao u radu [1]. Proračun je razdvojen na dva dijela: geometrijski i energetski. U geometrijskom dijelu se proračunava uticaj prepreka na fotonaponske module. Dok se u energetskom, prvo određuje iradijansa na module, a zatim analizira proizvodnja fotonaponskog sistema u zavisnosti od načina povezivanja modula i broja invertora.

Računarski algoritam je koncipiran na sljedeći način:

1. Učitavanje fiksnih parametara
  - 1.1. Učitavanje geografskih koordinata lokacije
  - 1.2. Učitavanje pozicija i orijentacije modula
  - 1.3. Učitavanje geometrije prepreka
  - 1.4. Učitavanje tehničkih karakteristika modula
  - 1.5. Učitavanje topologije sistema
2. Proračun konstanti
  - 2.1. Proračun redne i paralelne otpornosti modula
  - 2.2. Procjena uticaja prepreka na difuznu komponentu
3. Petlja za svaki čas u godini (8760 časova)
  - 3.1. Određivanje pozicije Sunca
  - 3.2. Određivanje modula koji nisu u hladu
  - 3.3. Određivanje iradijansa na module
  - 3.4. Određivanje temperature modula
  - 3.5. Simulacija rada sistema
  - 3.6. Određivanje optimalne radne tačke (DC snage)
  - 3.7. Konverzija DC snage u AC snagu
3. Sumiranje na nivou godine
  - 3.1. Računanje totalne godišnje proizvedene energije

U narednim poglavljima će biti opisane funkcije za: proračun uticaja prepreka na difuznu komponentu zračenja, proračun redne i paralelne otpornosti modula, određivanje optimalne radne tačke i način modelovanja fotonaponskih modula. Ostale funkcije su iste kao i u radu [1], pa se ovdje neće navoditi njihov način rada.

### III. PRORAČUN KONSTANTI

U ovom poglavlju će biti opisan način za proračun uticaja prepreka na difuznu komponentu zračenja fotonaponskog modula i proračun redne i paralelne otpornosti modula.

#### A. Uticaj prepreka na difuznu komponentu zračenja

Difuzna komponenta zračenja koja pada na površinu Zemlje nastaje rasipanjem zračenja u atmosferi usljed čestica i vlage, te refleksijom od oblaka i površine Zemlje. Za estimaciju difuzne komponente zračenja razvijeni su modeli koji sredinu posmatraju kao izotropnu, odnosno anizotropnu. Model izotropne sredine podrazumijeva da je difuzno zračenje nezavisno od ugla prostiranja. Tada se difuzna komponenta zračenja na proizvoljno postavljen kolektor, pod uglom  $\Sigma$ , računa na osnovu izraza:

$$G_{dc} = G_{dh} \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right), \quad (1)$$

gdje je  $G_{dh}$  difuzna komponenta zračenja na horizontalnu podlogu [4].

Tokom oblačnih i maglovitih dana može se primjetiti da je nebo svjetlije na horizontu i u oblasti gdje Sunčevi zraci padaju na oblake. Model koji uvažava ovu pojavu podrazumijeva da je sredina anizotropna i intenzitet zračenja zavisi od pravca iz koga dolazi. Izraz za proračun difuzne komponente zračenja u ovom slučaju je [6]:

$$G_{dc} = G_{dh} \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \Sigma \right], \quad (2)$$

gdje su  $F_1$  i  $F_2$  koeficijenti koji zavise od indeksa čistine neba, a promjenljive  $a$  i  $b$  su jednake:

$$a = \max(0; \cos \theta), \quad (3)$$

$$b = \max(0, 087; \sin \beta), \quad (4)$$

gdje je:

$\theta$  - incidentni ugao Sunca na kolektor i

$\beta$  - ugao elevacije Sunca.

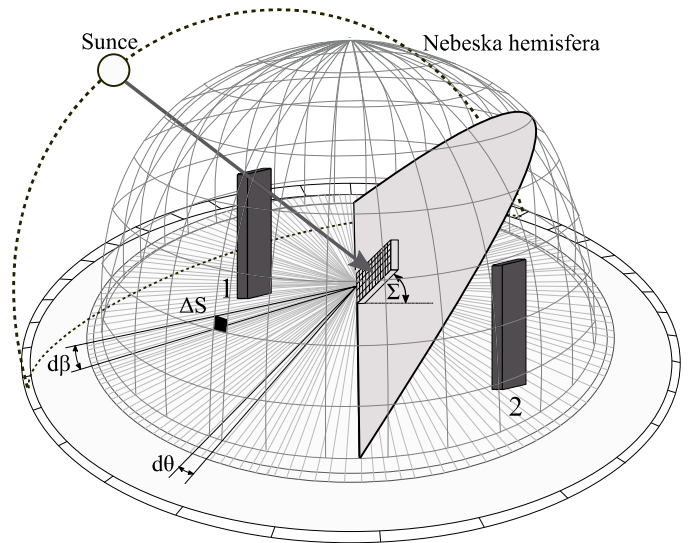
Procjena uticaja prepreka na difuznu komponentu zračenja proizvoljno postavljenog fotonaponskog modula zahtijeva podatak o intenzitetu zračenja u funkciji smjera. Ako bi se koristio model za anizotropnu sredinu, javlja se problem kako odrediti intenzitet zračenja u funkciji od smjera. Dok kod modela koji podrazumijeva da je sredina izotropna intenzitet zračenja je isti bez obzira na smjer koji se posmatra. Iz navedenih razloga difuzna komponenta zračenja, u ovom radu, će biti računata na osnovu izraza (1), uz uvažavanje uticaja prepreka.

Izraz (1) je izveden pod pretpostavkom da je intenzitet zračenja isti bez obzira na smjer i da nema prepreka koje bi iz određenog smjera blokirale dio zračenja. U suštini, ovaj model ne uvažava postojanje prepreka. Da bismo to uvažili definišimo koeficijent SVF (engl. *sky view factor*) koji će dati vezu između

difuzne iradijance na modul kada postoje prepreke i difuzne iradijance kada ne bi bilo prepreka:

$$SVF = \frac{G_{dcobs}}{G_{dc}}. \quad (5)$$

Ovdje treba voditi računa da li prepreka uopšte utiče na difuznu komponentu zračenja. Odnosno da li bi zračenje koje zaustavlja prepreka padalo na prednju stranu panela ili na poleđinu. Na primjer, na Sl. 1 je dat ilustrativan primjer uticaja prepreke na iradijansu. U posmatranom satu, prepreke ne utiču na direktnu komponentu zračenja, dok na difuznu utiču. Prepreka (označena sa 1 na Sl. 1) utiče na smanjenje difuzne komponente zračenja na modul jer ona zaustavlja dio zračenja koje bi dospjelo na ćelije fotonaponskog modula. Međutim, druga prepreka (označena sa 2 na Sl. 1) zaustavlja dio zračenja koje bi padalo na poleđinu modula, pa ona ne utiče na proizvodnju električne energije posmatranog modula.



Slika 1. Uticaj prepreka na iradijansu modula

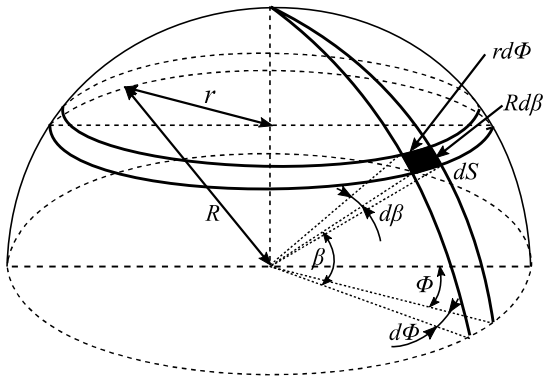
S obzirom na prethodnu analizu  $G_{dcobs}$  se dobija integraljenjem difuzne komponente koja potiče iz oblasti  $\Delta S$  i dopijeva na modul iz oblasti koja je određena nagibom panela. Kriva koja razgraničava oblast iz koje difuzna komponenta doprinosi proizvodnji električne energije i oblasti iz koje ne doprinosi se dobija u presjeku modela nebeske hemisfere i ravni koja je određena orijentacijom i nagibom modula [7]. Dijeljenjem ove iradijance sa iradijansom koja se dobija integraljenjem po istoj oblasti uz zanemarenje prepreka dobija se koeficijent SVF.

Proračun SVF faktora ćemo uraditi kao što je opisano u prethodnom paragrafu. Prvo se nebeska hemisfera izdijeli na oblasti  $\Delta S$ . Oblik i površina oblasti  $\Delta S$  može biti različita [8]. U ovom radu je korišten sistem dijeljenja sfere na elementarne površine dobijene promjenom ugla elevacije ( $\beta$ ) i azimuta ( $\phi$ ) za 0,25 stepeni (Sl. 1). Na ovaj način površina elementarne oblasti zavisi od ugla elevacije:

$$dS = R \cdot d\beta \cdot r \cdot d\phi, \quad (6)$$

gdje je  $R$  poluprečnik sfere, a  $r$  je poluprečnik kružnice koja se dobija u presjeku sfere i ravni koja je paralelna površini tla, a nalazi se na visini posmatrane površine  $dS$  (Sl. 2.):

$$r = R \cdot \cos(\beta). \quad (7)$$



Slika 2. Određivanje površine elementarne oblasti

Uvrštavanjem izraza (7) u izraz (6) dobija se površina elementarne oblasti u zavisnosti od ugla elevacije:

$$dS = R^2 \cdot \cos(\beta) \cdot d\beta \cdot d\phi. \quad (8)$$

Zatim, zračenje koje potiče iz elementarne površine je srazmjerno iradijaciji sfere ( $G_{sph}$ ) i količniku te površine i površine sfere:

$$dG_d = G_{sph} \frac{dS}{2 \cdot \pi \cdot R^2} = G_{sph} \frac{\cos(\beta) \cdot d\beta \cdot d\phi}{2 \cdot \pi}. \quad (9)$$

Ako bi ugao između difuznog zračenja elementarne oblasti i normale na panel ( $\theta$ ) bio nula onda bi ovo bila iradijansa na modul, pod uslovom da prepreka ne presjeca duž koja povezuje elementarnu oblast i centar modula, ako prepreka presjeca datu duž onda je iradijansa na modul jednaka nuli. U slučaju da prepreka ne presjeca datu duž i da ugao  $\theta$  nije jednak nuli, iradijansa na modul je:

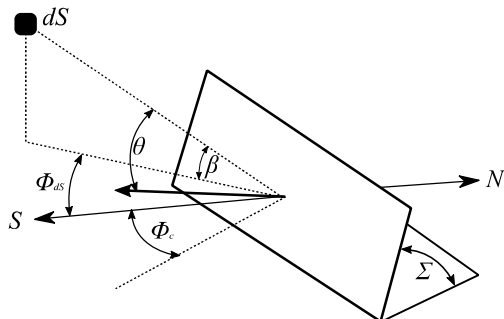
$$dG_{dc} = dG_d \cdot \cos(\theta). \quad (10)$$

Ugao  $\theta$  zavisi od međusobnog položaja (Sl. 3.) elementarne oblasti i modula, te od nagiba modula:

$$\cos(\theta) = \sin(\beta) \cos(\phi_{ds} - \phi_c) \sin(\Sigma) + \sin(\beta) \cos(\Sigma), \quad (11)$$

gdje je:

- $\beta$  - ugao elevacije posmatrane oblasti,
- $\phi_{ds}$  - ugao azimuta posmatrane oblasti,
- $\phi_c$  - ugao azimuta modula i
- $\Sigma$  - ugao elevacije modula.



Slika 3. Međusobni položaj elementarne oblasti i modula

Nakon proračuna koeficijenta SVF difuzna iradijansa na modul se dobija množenjem vrijednosti dobijene iz izraza (1) sa SVF koeficijentom posmatranog modula.

#### B. Proračun serijske i paralelne otpornosti modula

Određivanjem ukupne iradijansa na module prelazi se na sljedeći korak, proračun temperature modula. Temperatura modula se računa na isti način kao i u radu [1], pa odmah prelazimo na simulaciju rada sistema. Za potrebe simulacije rada sistema svaki modul je pojedinačno modelovan, nakon čega je u zavisnosti od konfiguracije sistema simuliran rad nizova. Prije detaljnog modelovanja fotonaponskih modula, estimiraće se serijska i paralelna otpornost modula.

U literaturi se može naći više principijelno različitih načina da se estimiraju vrijednosti serijske i paralelne otpornosti modula [9] - [11]. U ovom radu, za estimaciju serijske i paralelne otpornosti korišćen je izraz izveden u radu [11]. Serijska otpornost se estimira iterativno koristeći izraz:

$$R_s = \frac{1}{I_{mp}} \left[ U_{oc} - U_{mp} - A \cdot V_{th} \ln \left( \frac{U_{mp} + A \cdot V_{th} - I_{mp} \cdot R_s}{A \cdot V_{th}} \right) \right], \quad (10)$$

gdje je:

- $U_{oc}$  - napon otvorenog kola modula,
- $U_{mp}$  - napon pri  $P_{max}$
- $I_{mp}$  - struja pri  $P_{max}$
- $V_{th}$  - kontakti potencijal i
- $A$  - faktor idealnosti.

Da bi se iterativni postupak mogao započeti, početna vrijednost otpornosti se računa na sljedeći način:

$$R_s = \frac{1}{I_{mp}} \left[ U_{oc} - U_{mp} - A \cdot V_{th} \ln \left( \frac{U_{mp}}{A \cdot V_{th}} \right) \right]. \quad (11)$$

Kada je poznata vrijednost serijske otpornosti, paralelna otpornost je:

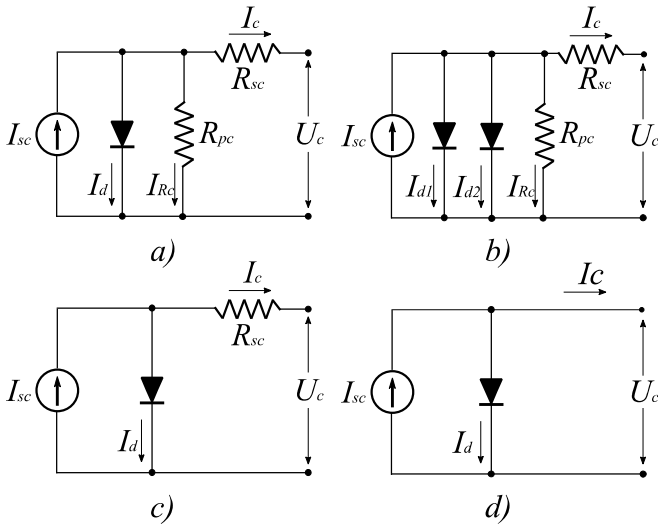
$$R_p = \frac{(U_{mp} - A \cdot V_{th})(U_{mp} - R_s \cdot I_{mp})}{(I_{sc} - I_{mp})(U_{mp} - R_s \cdot I_{mp}) - A \cdot I_{mp} \cdot V_{th}}, \quad (12)$$

gdje je  $I_{sc}$  struja kratkog spoja modula.

#### IV. MODELOVANJE FOTONAPONSKOG SISTEMA

Fotonaponski sistem je modelovan iz nekoliko koraka. Prvo je napravljen model jednog modula sa *bypass* diodom. Zatim je u zavisnosti od konfiguracije sistema modelovan jedan niz.

Fotonaponska ćelija se može modelovati na nekoliko načina. Modeli koji se obično koriste sastavljeni su od strujnog izvora sa paralelno vezanim diodama, te paralelne i serijske otpornosti, kao što je prikazano na Sl. 4 [12]. Paralelno strujnom izvoru može biti vezana jedna ili dvije diode (Sl. 4a i 4b). Dvije diode (Sl. 4a) se koriste za bolje fitovanje strujno naponske karakteristike [13]. Paralelna otpornost je dosta velika u odnosu na napon koji je napaja, pa se često zanemaruje [14]. I na kraju (Sl. 4d), zanemarenjem i serijske otpornosti dobija se idealizovani model fotonaponske ćelije [15].



Slika 4. Načini modelovanja fotonaponske ćelije

U ovom radu će biti korišten model fotonaponske ćelije sa jednom diodom na osnovu koga će se izvesti model fotonaponskog modula. Za struju fotonaponske ćelije se može pisati:

$$I_c = I_{sc} - I_d - \frac{U_d}{R_{pc}}, \quad (13)$$

gdje je:

- $I_{sc}$  - struja kratkog spoja ćelije (ista je kao i struja kratkog spoja modula pa nosi istu oznaku),
- $I_d$  - struja kroz diodu,
- $U_d$  - napon na diodi,
- $R_{pc}$  - paralelna otpornost ćelije.

Struja kroz diodu prvenstveno zavisi od napona koji vlada na njoj, ali i od faktora idealnosti:

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{q \cdot U_d}{A \cdot k \cdot T_c}\right) - 1 \right), \quad (14)$$

gdje je:

- $I_0$  - inverzna struja zasićenja diode,
- $q$  - naelektrisanje jednog elektrona,
- $k$  - Boltzmann-ova konstanta,
- $T_c$  - temperatura diode.

Iz izraza (14) se može zaključiti da se struja kroz diodu mijenja sa promjenom temperature, budući da temperatura ćelije figuriše u izrazu za proračun iste. Pored temperature koja direktno figuriše u izrazu, temperatura utiče i na promjenu inverzne struje zasićenja:

$$I_0 = I_{0ref} \left( \frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 \exp\left(\frac{q \cdot \epsilon_L}{A \cdot k} \left( \frac{1}{T_{cref}} - \frac{1}{T_c} \right)\right), \quad (15)$$

gdje je:

- $T_{cref}$  - temperatura ćelije pri standardnim uslovima ispitivanja,
- $\epsilon_L$  - širina energetskog procjepa materijala i

$I_{0ref}$  - inverzna struja zasićenja diode pri standardnim uslovima ispitivanja.

Struja strujnog izvora  $I_{sc}$  se mijenja u zavisu od iradijancije i od temperature ćelije shodno izrazu:

$$I_{sc} = \frac{G_c}{G_{cref}} \left( I_{scref} + \mu_{sc} (T_c - T_{cref}) \right), \quad (16)$$

gdje je:

- $I_{scref}$  - struja pri standardnim uslovima ispitivanja,
- $G_c$  - iradijansa na modul,
- $G_{cref}$  - iradijansa pri standardnim uslovima ispitivanja i
- $\mu_{sc}$  - temperaturni koeficijent promjene struje.

Ako posmatramo fotonaponski modul koji sa sastoji od više redno vezanih ćelija i ako pretpostavimo da su ćelije idealno uparene, prethodno izloženi izrazi (13)-(16) važe i za modul uz korekciju da je napon  $N_s$  puta veći od napona jedne ćelije, gdje je  $N_s$  broj redno vezanih ćelija i da su redna i paralelna otpornost modula, takođe  $N_s$  puta veće od otpornosti ćelije. Struja je ista jer su ćelije redno vezane. Prema tome, napon modula je:

$$U = N_s \cdot U_d - I_c \cdot R_s, \quad (17)$$

gdje je:

- $R_s$  - serijska otpornost modula.

Većina parametara modula se može naći u tehničkim specifikacijama određenog modula. Međutim, tu se obično ne daje serijska i paralelna otpornost, te inverzna struja zasićenja. Serijska i paralelna otpornost se mogu estimirati izrazima (10) i (12), respektivno. A inverzna struja zasićenja pri standardnim uslovima ispitivanja se može izračunati na osnovu podataka o struji kratkog spoja i naponu otvorenog kola:

$$I_{0ref} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot U_{oc}}{N_s \cdot A \cdot k \cdot T_{cref}}\right) - 1}. \quad (18)$$

Na osnovu prethodno izložene matematike formiran je model fotonaponskog modula dat izrazima (15)-(18) i izrazima:

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{q \cdot U_{oc}}{A \cdot k \cdot T_c \cdot N_s}\right) - 1 \right), \quad (19)$$

$$I_{sc} - I_c - I_d - \frac{U}{R_p} = 0. \quad (20)$$

Dakle, u ovom modelu se numeričkim putem određuje napon za koji se dobija tačna jednakost data izrazom (20). Odnosno, da bi se dobila strujno-naponska karakteristika, zadaje se struja, a računa napon.

Matematičkom modelu modula je dodata još jedna jednačina koja modeluje *bypass* diodu koja je priključena na modul:

$$U_{module} = \max\left(U, -\frac{A \cdot k \cdot T_c}{q} \ln\left(\frac{I_c}{I_0} + 1\right)\right), \quad (21)$$

gdje su uvršteni koeficijenti ( $A$ ,  $k$  i  $q$ ) i promjenljive ( $T_c$  i  $I_0$ ) *bypass* diode.

Dakle, nakon što se izračunaju iradijansi na module i temperatura modula, na osnovu matematičkog modela datog izrazima (15)-(21) simulira se rad jednog niza. U suštini, snimi se strujno-naponska karakteristika niza. Zatim se simulira rad MPPT (engl. *Maximum Power Point Tracking*) uređaja i određuje optimalna radna tačka niza, tj. maksimalna snaga. Nakon toga, na isti način kao i u radu [1] računa se snaga na izlazu invertora.

## V. ILUSTRATIVNI PRIMJER

Funkcionalnost izložene metodologije proračuna je testirana na primjeru potencijalne zgrade amfiteatra Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci. Moduli su postavljeni prema idejnom rješenju projektanta. Položaj modula i stare zgrade Fakulteta je prikazan na Sl. 5. Može se vidjeti da su moduli u određenim periodima dana u sjenci zidova i krova stare zgrade.



Slika 5. Paneli na amfiteatru u sjenci zgrade fakulteta

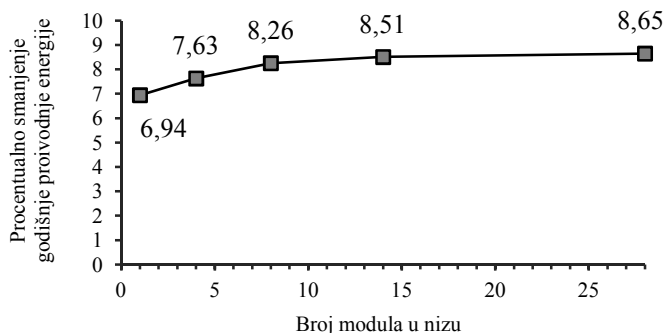
Tehničke karakteristike fotonaponske instalacije i korištenih modula su date u tabeli I.

TABELA I. OSNOVNE KARAKTERISTIKE SISTEMA I MODULA

Karakteristika	Vrijednost
Broj PV modula	56
Raspored modula	Prema idejnom projektu (i slici 5)
Nagib modula $\Sigma$	30°
Azimalna orijentacija $\phi_c$	0° (orijentacija ka jugu)
Vertikalna pozicija modula $z_s$	8,75 m
Maksimalna visina prepreke	18,2 m
Pojedinačna snaga modula	200 W
Struja kratkog spoja modula	5,61 A
Napon otvorenog kola modula	45,4 V
Napon pri $P_{max}$	38,0V
Struja pri $P_{max}$	5,27 A
Broj ćelija u modulu	72
Promjena struje kratkog spoja pri promjeni temperature	0,050 %/°C
Promjena snage pri promjeni temperature	-0,490 %/°C
Promjena napona otvorenog kola pri promjeni temperature	-152 mV/°C

Usklađenost radnih tačaka redno vezanih modula i gubici koji se pri tome javljaju zavise od broja tih modula budući da i mala odstupanja iradijansi na module dovodi do značajnih gubitaka niza. Antiparalelno svakom modulu je vezana *bypass*

dioda kako bi se smanjio uticaj različitih iradijansi na strujno-naponsku karakteristiku niza. U ovom radu je analizirano nekoliko topologija formiranja fotonaponskog panela. Analizirani su slučajevi kada se mijenja broj modula u nizu, odnosno broj redova. Smatra se da svaki niz ima odgovarajući invertor, pa nisu analizirani uticaji blokirajućih dioda na rad sistema. Na Sl. 6 su prikazani rezultati simulacije. Kada ne bi bilo prepreke, bez obzira na broj modula u nizu, odnosno na broj nizova dobija se ista godišnja proizvedena energija. Međutim, ako postoji prepreka godišnja proizvodnja energije blago zavisi od broja modula u nizu. Za prvu topologiju gdje svaki modul ima svoj pretvarač (1 modul puta 56 redova) dobija se najveća proizvedena energija 10 549,32 kWh, jer moduli ne utiču jedni na druge i nema gubitaka usljed neusklađenosti. Postoje samo gubici usljed sjenčenja modula, koji uzrokuju smanjenje proizvedene električne energije za 6,94%. Povećanjem broja modula u nizu rastu gubici usljed neusklađenosti i godišnja proizvedena energija se smanjuje. Na primjer za 14 modula u nizu smanjenje godišnje proizvedene energije je 8,51%. Ova analiza je data sa tehničke strane, naravno da bi se odredio optimalan broj modula u nizu trebalo bi sprovesti i ekonomsku analizu. Gubici usljed neusklađenosti modula se smanjuju sa povećanjem broja nizova, ali se povećavaju troškovi jer je potreban veći broj invertora. Na osnovu kriterijuma maksimalne zarade na nivou posmatranog perioda eksploatacije dobio bi se optimalan broj nizova što se ostavlja za neke naredne analize.



Slika 6. Godišnja proizvodnja električne energije u zavisnosti od broja modula u nizu

## VI. ZAKLJUČAK

U radu je detaljno analiziran uticaj prepreke na difuznu komponentu iradijansi na module. Modelovan je fotonaponski modul sa jednom *bypass* diodom, a na osnovu njega napravljen model fotonaponskog sistema. Razvijeni alat je testiran na primjeru fotonaponskog sistema na budućoj zgradi amfiteatra Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci. Analizirano je nekoliko topologija s ciljem da se sagleda uticaj topologije sistema na proizvedenu električnu energiju. Procijenjeno je da je smanjenje proizvedene električne energije usljed postojanja stare zgrade Fakulteta od 6,94 do 8,65% u zavisnosti od topologije fotonaponskog sistema.

## LITERATURA

- [1] Č. Zeljković, P. Mršić, B. Erceg, "Metod za određivanje uticaja prepreka na godišnju proizvodnju fotonaponskih sistema," III naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost - ENEF 2017, str. 100-105, Banja Luka, 3-4. novembar 2017.

- [2] N. D. Kaushika, Anil K. Rai, "An Investigation of Mismatch Losses in Solar Photovoltaic Cell Networks," *Energy*, vol. 32, no. 5, pp. 755-759, 2007.
- [3] H. Patel, V. Agarwal, "MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, March 2008.
- [4] Gilbert M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, New York: Wiley Interscience, 2004.
- [5] A. P. Dobos, *PVWatts Version 5 Manual*, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 2014.
- [6] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance," *Solar Energy*, vol. 44, pp. 271-289, 1990.
- [7] B. Goss, I. Cole, T. Betts, R. Gottschalg, "Irradiance modelling for individual cells of shaded solar photovoltaic arrays," *Solar Energy*, vol. 110, pp. 410-419, 2014.
- [8] S. Freitas, C. Catita, P. Redweik, M.C. Brito, "Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 915-931, 2015.
- [9] D. Sera, R. Teodorescu, "Robust series resistance estimation for diagnostics of photovoltaic modules," 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, Portugal, November 3-5, 2009.
- [10] K. Ding, X.G. Bian, H.H. Liu, T. Peng, "A MATLAB-Simulink-Based PV Module Model and Its Application Under Conditions of Nonuniform Irradiance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 864-872, December 2012.
- [11] C. Carrero, J. Rodríguez, D. Ramírez, C. Platero, "Simple estimation of PV modules loss resistances for low error modelling," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1103-1108, May 2010.
- [12] NA. Rahim, HW. Ping, J. Selvaraj, "Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 17 pp. 537 – 546, 2013.
- [13] V. Tamrakar<sup>1</sup>, S.C. Gupta, Y. Sawle, "Single-Diode and Two-Diode PV Cell Modeling Using Matlab for Studying Characteristics of Solar Cell Under Varying Conditions," *Electrical & Computer Engineering: An International Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 67-77, 2015.
- [14] X. Weidong, W. G. Dunford, and A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells," *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 3, pp. 1950-1956, 2004.
- [15] H. Bellia , R.Youcef , M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB," *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 3, pp. 53-61, 2014.

#### ABSTRACT

The paper presents a methodology for determining the annual production of photovoltaic systems with respect to the shading influenced by the surrounding objects. The photovoltaic modules and system are modeled in detail. Also, the impact of obstacles to the diffuse radiation is analysed. Reflected radiation is neglected. Mathematical models are implemented programmatically and tested on an illustrative example of the PV system of 11 kW according to the typical meteorological year for the observed location.

#### **ESTIMATING THE IMPACT OF OBSTACLES AND TOPOLOGY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM TO THE ANNUAL ENERGY PRODUCTION**

Predrag Mršić, Čedomir Zeljković