

# Analiza performansi samostalnih fotonaponskih sistema za napajanje baznih stanica mobilne telefonije

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, BiH  
 cedomir.zeljkovic@etf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org, bojan.erceg@etf.unibl.org

**Sažetak**—U ovom radu je teorijski opisan i softverski implementiran metod za analizu performansi samostalnih fotonaponskih sistema, baziran na sekvenčnoj Monte Carlo simulaciji. Metod je testiran na primjeru napajanja bazne stanice mobilne telefonije. Rezultati simulacija pokazuju koliko se godišnje iskoristi solarne energije, koliko časova u toku godine je neophodno angažovati dizel agregat, zatim koliko energije se utroši na hlađenje itd., te mogu da posluže kod tehnno-ekonomske ocjene kvaliteta odabranog rješenja za napajanje bazne stanice.

**Ključne riječi**—fotonaponski sistemi; bazna stanica mobilne telefonije; sekvenčna Monte Carlo simulacija.

## I. UVOD

Cijene fotonaponskih modula, energetskih pretvarača i baterija za skladištenje električne energije kontinuirano opadaju [1]. Iako je kilovat-čas koji je proizведен samostalnim sistemom i dalje značajno skuplji od kilovat-časa iz mrežnog povezanog sistema, samostalni sistemi mogu biti isplativi na lokacijama koje su veoma udaljene od postojeće distributivne mreže [2]. Upotreba samostalnih sistema je posebno atraktivna u nerazvijenim zemljama, jer na primjer u Africi 600 miliona ljudi u današnjem trenutku nema pristup električnoj energiji. U razvijenim zemljama stepen elektrifikacije je mnogo veći, ali uprkos tome postoje slučajevi gdje je adekvatno primijeniti samostalne sisteme napajanja, kao npr. u udaljenim nacionalnim parkovima, odmorištima na auto putevima itd.

Karakterističan primjer upotrebe samostalnih fotonaponskih sistema predstavlja napajanje baznih stanica mobilne telefonije. Ovakav zadatak ima smisla, jer se može ispostaviti da je bazne stanice pozicionirane na planinskim uzvišenjima, nekada jeftinije napajati iz samostalnog sistema, nego praviti dalekovod velike dužine. Ispostavlja se da je to zanimljiv problem, kako u pogledu dimenzioniranja sistema napajanja [3], tako i u pogledu optimalnog upravljanja potrošnjom u svrhu uštede energije [4]-[6].

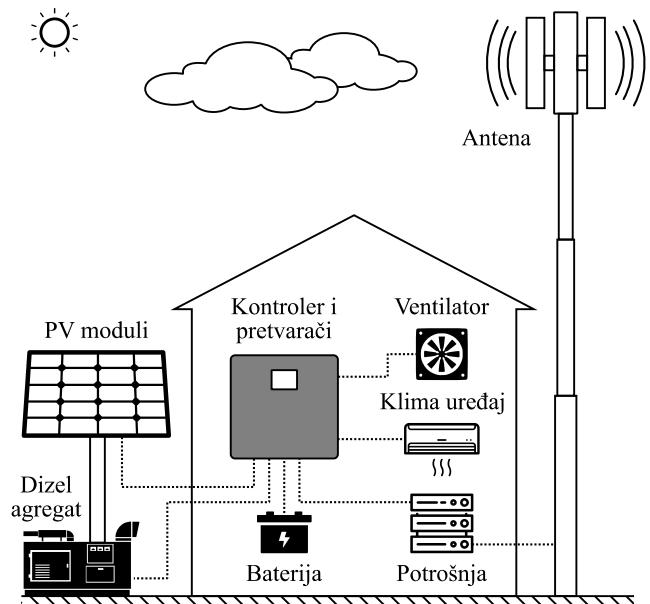
Kvalitetno dimenzioniranje sistema podrazumijeva optimalno određivanje snage obnovljivih izvora energije, kapaciteta baterije i snage generatora za rezervno napajanje, te izbor efikasnog načina upravljanja. U literaturi su predloženi različiti postupci za ovu svrhu, a tipično su bazirani na determinističkim [7] ili heurističkim principima [8]. Postoje i stohastički metodi, ali se u njima najčešće upotrebljavaju nesekvenčne simulacione metode [9]. Navedenim metodima nije moguće sveobuhvatno testiranje rada sistema i praćenje važnih promjenljivih u vremenu, kao što su npr. promjena stanja napunjenoosti baterije, broj ciklusa punjenja i

pražnjenja, temperatura unutar objekta sa telekomunikacionom opremom itd. Nasuprot tome, sekvenčna Monte Carlo simulacija predstavlja numerički zahtjevniji, ali znatno moćniji metod, kojim se najbolje oponaša realnost i koji omogućava praćenje vremenske promjene veličina od interesa.

U ovom radu je razvijena platforma za simulaciju samostalnih fotonaponskih sistema na bazi sekvenčne Monte Carlo metode. Ovakav alat može biti iskorišćen za tehnno-ekonomsko vrednovanje projekata napajanja baznih stanica mobilne telefonije, ali i napajanja drugih izolovanih potrošača.

## II. OPIS I MODELOVANJE SISTEMA

Skica bazne stanice mobilne telefonije na kojoj su uočljivi osnovni funkcionalni elementi prikazana je na slici 1. Potrošnja se primarno napaja iz fotonaponskih modula, preko odgovarajućeg DC-DC pretvarača sa ugrađenom MPPT funkcijom. Kada su potrebe za potrošnjom zadovoljene, eventualni višak električne energije se koristi za punjenje baterije. Ukoliko raspoloživa energija iz fotonaponskih modula ipak nije dovoljna, nedostatak se pokriva iz baterije. U slučaju nepovoljnih meteoroloških uslova izraženih kroz višednevni manjak insolacije i pojavu pražnjenja baterije do minimalno dozvoljenog praga, koristi se dizel agregat kao rezervno napajanje.



Sl. 1. Osnovni elementi samostalnog sistema za napajanje bazne stanice.

Osnovnu potrošnju u baznoj stanici predstavlja telekomunikaciona oprema. Predviđeni napon napajanja je 48 V DC, tako da se elektronika može direktno vezivati na bateriju bez upotrebe invertora. Klima uređaj i motor ventilatora rade na 220 V AC, te je prema tome neophodan DC-AC pretvarač u režimu kada se napajanje vrši iz fotonaponskog sistema. Kada se uključi dizel agregat moguće je izvesti da se potrošači naizmjenične struje prespoje na sabirnice generatora, čime bi se izbjegla neefikasna dvostruka konverzija energije.

U sekundarnu, ali neophodnu potrošnju, ubrajamo uređaje za hlađenje. Kada su vanjske temperature visoke, za odvođenje toplice iz objekta koristi se klima uređaj. U slučajevima kada su vanjske temperature relativno niske (npr. tokom ljetnih noći ili tokom zime praktično stalno), moguće je koristiti ventilator za slobodno hlađenje, kao uređaj koji troši znatno manje energije [4].

#### A. Model fotonaponskog izvora

Snaga fotonaponskog izvora prvenstveno zavisi od iradijanse i temperature. Izračunavanje raspoložive DC snage  $P_{PV}$  obavljamo u skladu sa metodologijom američke laboratorije NREL [11].

#### B. Model dizel agregata

U ovom radu dizel agregat ćemo posmatrati kao generator konstantne snage  $P_D$ , koja je jednaka nominalnoj snazi  $P_{D,nom}$ .

#### C. Model baterije

Osnovne činjenice o kojima treba voditi računa kod modelovanja baterije su kapacitet baterije, brzina i efikasnost punjenja, te uticaj samopražnjenja. Kapacitet baterije kao mjeru energije koja se može uskladištiti u bateriji izražava se u vat-časovima (Wh) ili, još češće, u amper-časovima (Ah). U funkciji temperature baterije  $T_{bat}$ , dostupni kapacitet baterije  $C'_{bat}$  dat je izrazom:

$$C'_{bat} = C_{bat} \left[ 1 + \delta_C (T_{bat} - 25) \right], \quad (1)$$

gdje je  $C_{bat}$  nominalni kapacitet baterije ostvarljiv pri nominalnim uslovima (pri  $T = 25^\circ\text{C}$ ), a  $\delta_C$  temperaturni koeficijent, koji najčešće iznosi oko 0,6%/°C [8].

Trenutno stanje napunjenoosti baterije obilježeno je akronimom  $SOC$  (od engl. *state of charge*). Da bi se odredilo stanje napunjenoosti u aktuelnom trenutku  $SOC(h)$  potrebno je znati informaciju o napunjenoosti baterije na početku posmatranog intervala  $SOC(h-1)$ , struju punjenja/praznjenja  $I_{bat}$  i efikasnost konverzije  $\eta_{bat}$ . Takođe, u formuli će participirati i stepen samopražnjenja baterije  $\sigma$ , koji zavisi od napunjenoosti i zdravlja baterije i čija preporučena vrijednost iznosi 0,2% po danu [8]. Uz uvažavanje svih relevantnih činjenica, stanje napunjenoosti baterije se računa na osnovu sljedećeg izraza:

$$SOC(h) = SOC(h-1) \times \left( 1 - \frac{\sigma \times \Delta t}{24} \right) + \frac{I_{bat}(h) \times \Delta t \times \eta_{bat}}{C'_{bat}}. \quad (2)$$

Struja punjenja baterije se računa kao:

$$I_{bat}(h) = \frac{P_{PV}(h) + P_D(h) - P_P(h)}{U_{bat}(h)}, \quad (3)$$

gdje je  $P_P$  ukupna snaga svih priključenih potrošača, a  $U_{bat}$  napon baterije.

U slučajevima kada se dobija prevelika vrijednost struje, koja bi mogla da ošteti bateriju, struja se pomoću kontrolera punjenja ograničava na  $I_{bat,max}$ . Punjenje se završava kada  $SOC$  dostigne vrijednost 1, dok se pražnjenje stopira prije vrijednosti  $SOC = 0$ , pri preporučenoj vrijednosti  $SOC_{min}$ , da bi se izbjeglo neželjeno skraćenje životnog vijeka baterije.

#### D. Model potrošnje telekomunikacione opreme

Napon napajanja elektronske opreme je 48 V DC. Prosječna snaga potrošnje zavisi od složenosti stанице odnosno broja ugrađenih funkcija i tipično se kreće od oko pola kilovata do reda nekoliko kilovata. Pokazuje se da je potrošnja prilično konstantna u vremenu, te da ispoljava samo blage varijacije koje zavise od intenziteta telekomunikacionog saobraćaja [12]. Primjera radi, u jednodnevnom test mjerjenju izvršenom na baznoj stanicici kod Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci, utvrđeno je da prosječna snaga iznosi 2,55 kW, a relativna standardna devijacija 3,1%.

#### E. Model potrošnje klima uređaja

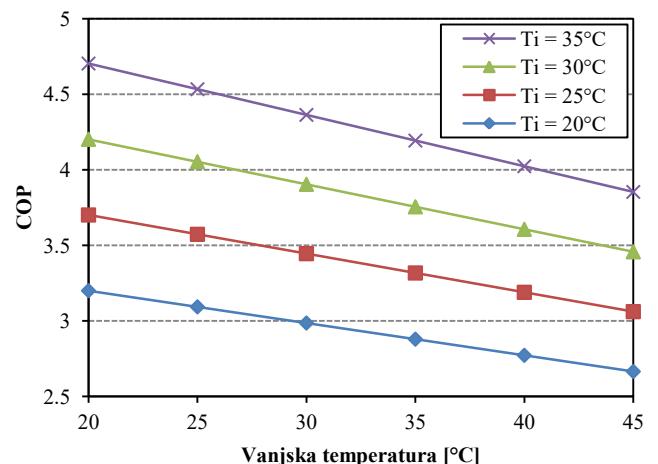
Klima uređaj je predviđen za rad na naizmjeničnom naponu od 220 V, a biće modelovan kao termostatski regulisan potrošač konstantne električne snage, čije vrijeme rada zavisi od termičkog bilansa, odnosno potrebe za hlađenjem. Učinak klima uređaja zavisi od režima, odnosno od toga u kojem odnosu su unutrašnja i vanjska temperatura. Količinu toplice koju klima uređaj odvede iz objekta određujemo na osnovu relacije:

$$Q_{KU} = COP \cdot P_{KU}, \quad (4)$$

gdje se koeficijent performansi ( $COP$ ) procjenjuje po sljedećoj regresionoj formuli:

$$COP = a_0 + a_1 T_i + a_2 T_{amb} + a_3 T_i T_{amb}. \quad (5)$$

Vrijednosti konstanti u prethodnoj formuli su određene interpolacijom na osnovu realnih podataka (slika 2) i iznose  $a_0 = 1,287$ ,  $a_1 = 0,117$ ,  $a_2 = -4,58 \cdot 10^{-3}$  i  $a_3 = -8,4 \cdot 10^{-3}$  [6].



Sl. 2. Efikasnost klima uređaja je bolja što je veća razlika između unutrašnje temperature ( $T_i$ ) i vanjske temperature ( $T_{amb}$ ).

#### F. Model ventilatora za hlađenje

Kada je ambijentalna temperatura relativno niska, upotreba ventilatora umjesto tehnološki komplikovanijeg klima uređaja, predstavlja energetski efikasnije rješenje. Potrošnja ventilatora se svodi na potrošnju pogonskog elektromotora, a količina odvedene toplotne iz prostorije  $Q_V$  proporcionalna je razlici unutrašnje i vanjske temperature:

$$Q_V = H_v \cdot v_v \cdot A_p \cdot (T_i - T_{amb}), \quad (6)$$

gdje su  $H_v$  zapreminska topotna kapacitet vazduha,  $v_v$  brzina cirkulacije vazduha, a  $A_p$  površina prozora kroz koji se obavlja cirkulacija. Na osnovu istraživanja [17], u ovom radu biće smatrano da za ventilator od 500 W koeficijent proporcionalnosti  $H_v \cdot v_v \cdot A_p$  iznosi 108 W/°C.

#### G. Model termičkog provođenja objekta

Transfer energije kroz zidove i krov objekta zavisi od razlike interne i eksterne temperature:

$$Q_{TP} = U \cdot A_Z \cdot (T_i - T_{amb}), \quad (7)$$

gdje je  $U$  koeficijent termičke provodnosti, a  $A_Z$  ukupna površina svih zidova i krova objekta. Očigledno da ova veličina može biti kako pozitivna tako i negativna, jer topotna energija napušta objekat tokom noći i hladnih dana, a dovodi se spolja tokom vrelih ljetnih dana. Potrebno je napomenuti da je, zahvaljujući savremenim izolacionim materijalima, provođenje energije kroz zidove objekata baznih stanica prilično malo i da se može uzeti da iznosi oko 21 W/°C [17].

#### H. Model grijanja objekta Sunčevim zračenjem

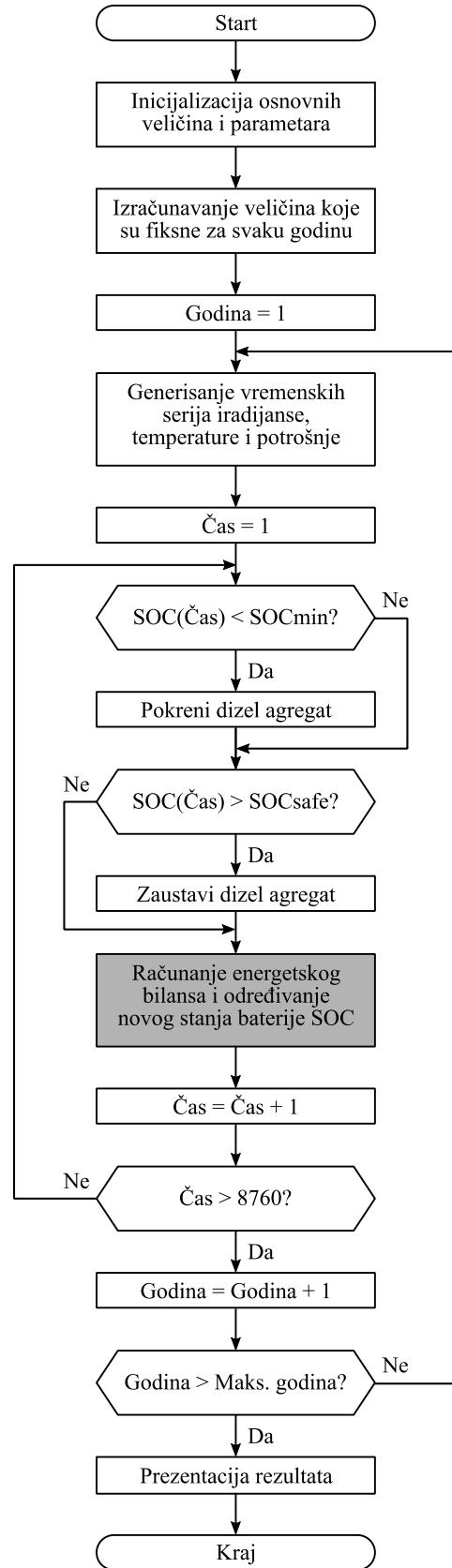
Kada su raspoloživi podaci o iradijansi i odgovarajućem položaju Sunčevog diska na nebu, relativno jednostavno je odrediti intenzitet zagrijavanja objekta uslijed zračenja Sunca. Snaga koju objekat apsorbuje od Sunca je:

$$Q_S = G \cdot A_S \cdot (1 - \rho), \quad (8)$$

gdje je  $G$  iradijansa mjerena u  $\text{W/m}^2$ ,  $A_S$  projekcija površine objekta koja je izložena Suncu i  $\rho$  koeficijent refleksije zidova i krova objekta. Znajući da je moguće fotonaponske panele postaviti tako da u velikoj mjeri zaklanjavaju objekat bazne stanice, u ovom radu će biti usvojeno  $A_S = 0$ , tj. efekat Sunčevog zračenja na termički bilans objekta će biti u potpunosti zanemaren.

### III. ALGORITAM SEKVENCIJALNE MONTE CARLO SIMULACIJE

Rad sistema se testira primjenom sekvencijalne Monte Carlo simulacije. Iako je navedeni metod računarski najzahtjevniji, pomoću njega se dobija vjerna slika o ponašanju sistema u realnom okruženju. Važna karakteristika metoda je i očuvanje vremenskih odrednica pojedinih događaja (trenuci izlaska i zalaska Sunca, položaj Sunca na nebu u određeno doba dana), te autokorelacija i međusobna korelacija pojedinih promjenljivih, kao što su npr. iradijansa i temperatura. Korak simulacije je 1 čas. Za simulaciju aktiviranja uređaja za hlađenje ispostavlja se da je to gruba podjela, pa se kod termičkih proračuna prelazi na minutnu rezoluciju. Blok dijagram algoritma simulacije je prikazan na slici 3.



Sl. 3. Osnovni koraci simulacionog algoritma.

#### A. Generisanje vremenskih serija iradijanse

Procedura za generisanje časovnih vremenskih serija iradijanse, detaljnije je opisana u našem ranijem radu [9]. Ovdje navodimo samo osnovne korake:

- Učitavaju se prosječne vrijednosti dnevne insolacije koje su usrednjene na mjesečnom nivou.
- Generišu se dnevni indeksi vedrine  $K_T$  [13].
- Generišu se časovni indeksi vedrine  $k_t$  [14].
- Na osnovu indeksa vedrine računa se globalna insolacija na horizontalnu podlogu.
- Izdvaja se difuzna komponenta, a posredno i direktna komponenta zračenja na horizontalnu podlogu [15].
- Zračenje na horizontalnu podlogu transformiše se u zračenje na panel proizvoljne orientacije [16].

#### B. Generisanje vremenskih serija temperature

S obzirom na činjenicu da performanse fotonaponskih modula do određene mjeru zavise od temperature ambijenta, simulaciona procedura uključuje i generisanje vremenskih serija temperature. I ova procedura je opisana u radu [9], a osnovni koraci i principi su:

- Generiše se serija dnevnih prosjeka temperature. U ovoj proceduri uvažava se činjenica da je korelacija prosječne dnevne temperature sa iradijansom mala.
- Generišu se dnevni hod temperature na časovnom nivou, uzimajući u obzir korelaciju sa iradijansom, tako da je hod temperature veći tokom vedrih dana, a manji kada je oblačno.

#### C. Generisanje vremenskih serija potrošnje

Potrošnja telekomunikacione opreme  $P_{TO}$  u nekom času  $h$  biće modelovana na sljedeći način:

$$P_{TO} = P_{TO,sr} \left[ 1 + \sigma_{TO} \cdot N(0,1) \right], \quad (9)$$

gdje je  $P_{TO,sr}$  srednja vrijednost snage potrošnje,  $\sigma_{TO}$  standardna devijacija, a  $N(0,1)$  slučajni broj izvučen iz standardne normalne raspodjele.

#### D. Kontrolni algoritam za angažovanje dizel agregata

U ovom stadijumu istraživanja, odabrali smo krajnje jednostavnu logiku angažovanja dizel agregata. Naime, predviđeno je da se, kada stanje baterije opadne ispod podešenog donjeg praga ( $SOC_{min}$ ), dizel agregat startuje kao ispomoć obnovljivom izvoru energije. Planirano je da agregat radi konstantno nominalnom snagom sve dok stanje napunjenoosti baterije ne dostigne prag za sigurni nastavak rada ( $SOC_{safe}$ ).

#### E. Kontrolni algoritam sistema hlađenja

U ovom radu je primijenjen jednostavni histerezisni algoritam prema kojem se angažuju uređaji za hlađenje. Osnovni principi upravljanja su:

- Kada temperatura u prostoriji pređe gornji prag ( $T_{Hon}$ ) hlađenje se uključuje, a kada padne ispod donjeg praga ( $T_{Hoff}$ ) hlađenje se isključuje.
- Kada vanjska temperatura padne ispod podešenog praga ( $T_{Von}$ ) prelazi se u režim ventilatorskog hlađenja, a kada se vrati na vrijednost veću od gornjeg praga ( $T_{Voff}$ ) za hlađenje će biti angažovan klima uređaj.

I ovdje je očigledno da se izborom pragova i dodatnim usavršavanjem upravljačkog algoritma otvara prostor za smanjenje potrošnje energije za hlađenje.

#### F. Računanje energetskog bilansa

Za računanje bilansa električne energije potrebno je prvo uraditi termički bilans, da bi se došlo do informacije o električnoj potrošnji uređaja za hlađenje. S obzirom na činjenicu da se bazne stanice najčešće realizuju u formi kontejnera sa jednom termičkom zonom, smatraćemo da je za termički opis sistema adekvatan model prvog reda:

$$m \cdot c \cdot dT_i = (Q_{TO} + Q_S - Q_H - Q_{TP}) dt, \quad (10)$$

gdje je  $Q_{TO}$  snaga disipacije telekomunikacione opreme,  $Q_S$  snaga grijanja objekta kao posljedica zračenja Sunca,  $Q_H$  snaga hlađenja koju po potrebi obezbjeđuje klima uređaj ( $Q_{KU}$ ) ili ventilator ( $Q_V$ ), a  $Q_{TP}$  snaga termičkog provođenja, odnosno snaga razmjene topote sa okolinom kroz zidove i krov objekta. Navedena diferencijalna jednačina se rješava numerički, sa korakom od jednog minuta, a kao rezultat se dobija trend interne temperature objekta i časovna potrošnja klima uređaja i ventilatora ( $P_{KU}(h) + P_V(h) = P_H(h)$ ).

Nakon računanja termičkog bilansa, proračun se nastavlja proračunom električnih snaga. Za svaki čas u simuliranoj godini, računa se debalans električne energije  $P_d$  po sljedećoj formuli:

$$P_d(h) = P_{PV}(h) + P_D(h) - P_{TO}(h) - P_H(h). \quad (11)$$

Iz snage debalansa se izračunava struja baterije

$$I_{bat} = P_d / U_{bat}, \quad (12)$$

gdje pozitivna snaga debalansa znači punjenje, a negativna pražnjenje baterije. Na potrebnim pozicijama se uvažavaju odgovarajući koeficijenti efikasnosti konverzije, u zavisnosti od konfiguracije i načina kako su pojedini elementi uvezani u sistem.

#### G. Analiza i prezentacija rezultata

Po završetku proračuna rezultate je moguće prezentovati kako u vidu hronoloških dijagrama za promjenljive od interesa tako i u vidu histograma sa kojih očitavamo vjerovatnoće pojave odgovarajućih scenarija.

#### IV. ILUSTRATIVNI PRIMJER

Svi navedeni simulacioni koraci su implementirani softverski i program je testiran na ilustrativnom primjeru napajanja bazne stanice u okolini grada Banja Luka.

#### A. Parametri simulacije

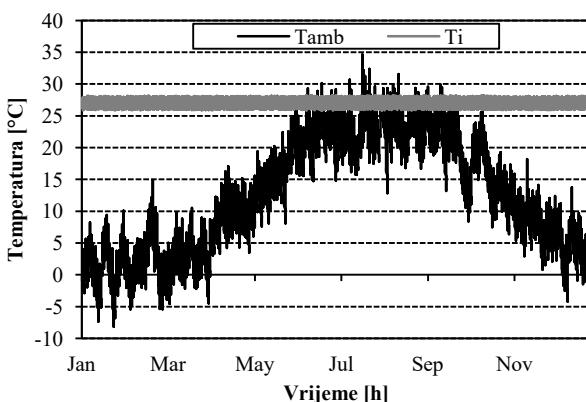
Posmatrana je bazna stanica sa prosječnom potrošnjom telekomunikacione opreme od 2 kW. Za hlađenje objekta predviđen je klima uređaj električne snage od 1,4 kW i ventilator od 500 W. Za napajanje se koriste fotonaponski moduli instalisane snage 30 kW i dizel agregat snage 5 kW. Softverski generatori vještackih vremenskih serija iradijanse i temperature podešeni su prema meteorološkim statističkim podacima za Banju Luku. Monte Carlo simulacija je obavljena na vremenskom horizontu od 1000 godina. Ostali važniji parametri simulacije navedeni su u tabeli I.

TABELA I. OSNOVNI PARAMETRI SIMULACIJE

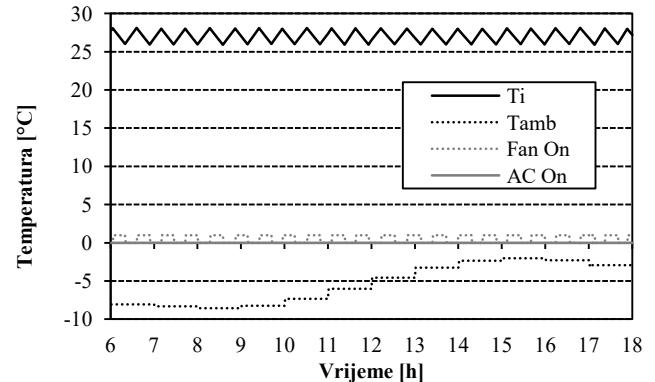
Karakteristika	Vrijednost
Instalirana snaga PV sistema	30 kW
Nagib modula $\Sigma$	50°
Azimutalna orijentacija $\phi_c$	0° (orijentacija ka jugu)
Efikasnost DC-DC pretvarača	0,95
Efikasnost invertora	0,90
Efikasnost ispravljača	0,90
Instalirana snaga dizel agregata	5 kW
Kapacitet baterije	2000 Ah
Nominalni napon baterije	48 V
Efikasnost konverzije punj. i praznj. baterije	0,85
Stepen samopražnjenja baterije	0,8%
Snaga ventilatora za hlađenje	500 W
Električna snaga klima uređaja	1400 W
Prag za uključenje hlađenja $T_{Hon}$	28°C
Prag za isključenje hlađenja $T_{Hoff}$	26°C
Donji prag za ventilatorsko hlađenje $T_{Von}$	24°C
Gornji prag za ventilatorsko hlađenje $T_{Voff}$	25°C
Prosječna potrošnja telekom. opreme	2 kW
Stand. devijacija potrošnje telekom. opreme	0,1 kW
Min. dozvoljeno stanje baterije $SOC_{min}$	0,20
Stanje baterije za isključenje dizel agregata	0,80
Koeficijent toplotne provodnosti objekta ( $K$ )	21 W/°C
Termička vremenska konstanta objekta ( $T_c$ )	8 h
Prosječna godišnja ambijentalna temperatura	12,2°C

Na slici 4 prikazan je odnos ambijentalne temperature i temperature unutar objekta za jednu test godinu. Kakva god bila varijacija vanjske temperature, proizvodnje fotonaponskih panela i potrošnje telekomunikacione opreme, uređaji za hlađenje unutrašnju temperaturu održavaju između zadatih histerezisnih granica (koje su u ovom primjeru 26°C i 28°C).

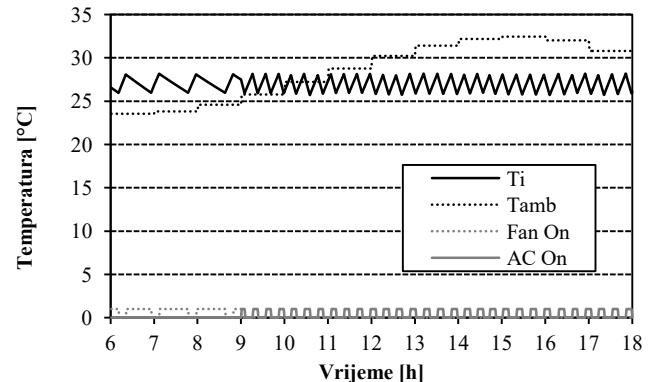
Rezultati simulacije u detaljnijoj rezoluciji dati su na slikama 5 i 6. Slika 5 odnosi se na zimski dan u kojem temperatura okoline ne prelazi nulti podjeljak. Prema podešenim upravljačkim parametrima, hlađenje se isključivo obavlja ventilatorom, a njegovo uključivanje oko dva puta u toku jednog časa ispostavlja se kao adekvatno rješenje. Tokom ljetnih dana (slika 6), zbog viših temperatura okoline, ventilator za isti učinak mora da radi duže, a kada je napolju toplije od 25°C prelazi se na hlađenje pomoću klima uređaja.



Sl. 4. Temperatura: vanjska ( $T_{amb}$ ) i unutrašnja ( $T_i$ ).



Sl. 5. Isječak iz simulacije (primjer za zimski dan 9. januar). Zbog niske ambijentalne temperature, ventilator (*fan*) je dovoljan za hlađenje i nema potrebe za upotrebot klima uređaja.



Sl. 6. Isječak iz simulacije (primjer za ljetni dan 17. avgust). Ventilator (*fan*) se povremeno aktivira u noćnim i jutarnjim časovima, a klima uređaj (AC) u srednjem dijelu dana

Na slikama 5 i 6 se vidi da je period odabiranja ambijentalne temperature 1h. Time se čini određena greška, pa je u nastavku istraživanja moguće poraditi na tome da se temperatura unutar sata interpolira linearno ili nekim drugim interpolacionim metodom.

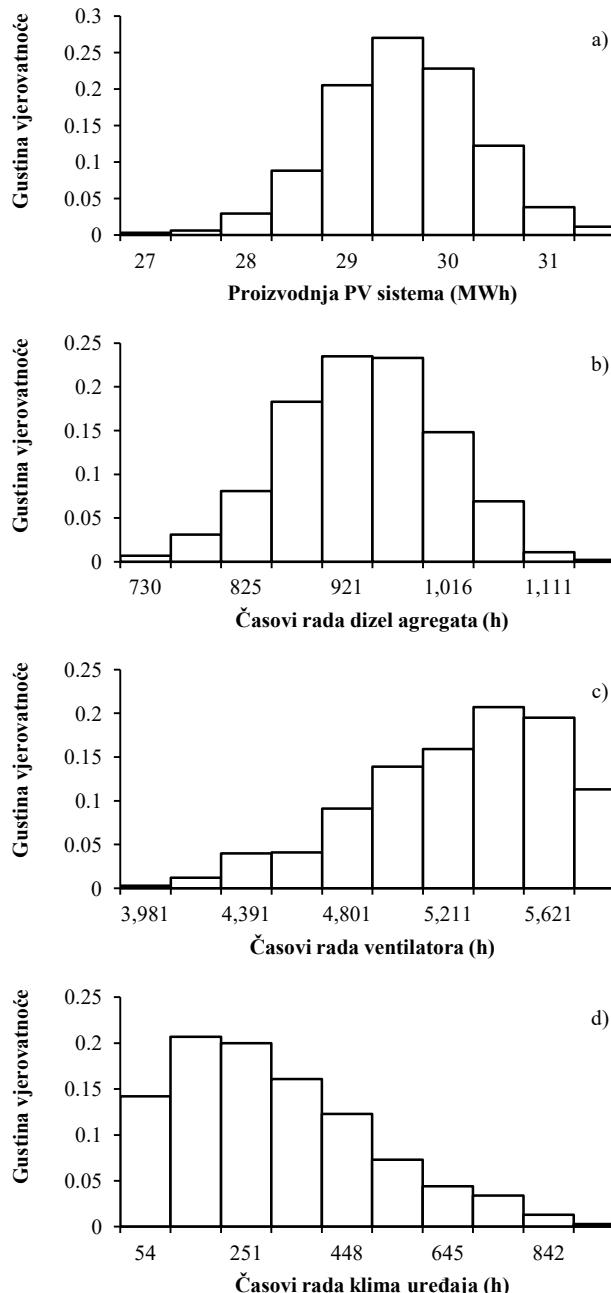
Na slici 7 prikazani su histogrami proizvodnje fotonaponskog sistema, te vremena rada dizel agregata, ventilatora i klima uređaja.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je opisano programsko okruženje za simulaciju napajanja baznih stanica mobilne telefonije samostalnim fotonaponskim sistemima. Sekvencijalnom *Monte Carlo* simulacijom moguće je hronološki pratiti ponašanje svih elemenata sistema u realističnim uslovima. Prikazani su ilustrativni rezultati na primjeru baziranom na jednostavnom principu upravljanja, gdje se vidi koliko solarne energije se iskoristi, koliko časova u toku godine je neophodno angažovati dizel agregat, koliko energije se utroši na hlađenje itd.

U nastavku istraživanja na ovu temu moguće je raditi u više pravaca. Kako u ovom radu nije primijenjena nikakva optimizacija, moguće je testirati nove algoritme upravljanja uređajima za hlađenje, sa ciljem poboljšanja energetske efikasnosti. Nadalje, potrebno je razmotriti da li su upotrijebljeni modeli adekvatni i da li ima smisla da se traga

za preciznijim i detaljnijim varijantama. Na kraju, moguće je testirati dodavanje vjetroagregata ili drugačijih izvora energije u hibridni miksi, u namjeri da se poveća pouzdanost napajanja i smanji potrošnja fosilnih goriva.



Sl. 7. Empirijske funkcije gustine vjerovatnoće: (a) proizvodnje PV sistema, (b) broja časova dizel agregata, (c) broja časova rada ventilatora za hlađenje i (d) broja časova rada klima uređaja

#### LITERATURA

- [1] SolarPower Europe [SPE], “Global Market Outlook For Solar Power 2019-2023,” SPE Technical Report, Brussels, 2019.
- [2] Y. Thiaux, T. T. Dang, L. Schmerber, B. Multon, H. B. Ahmed, S. Bacha, Q. T. Tran, “Demand-side management strategy in stand-alone hybrid photovoltaic systems with real-time simulation of stochastic

electricity consumption behavior,” *Applied Energy*, vol. 253, article 113530, 2019.

- [3] K. Kusakana, H. J. Vermaak, “Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries,” *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 419-425, 2013.
- [4] A. Spagnuolo, A. Petraglia, C. Vetromile, R. Formosi, C. Lubritto, “Monitoring and optimization of energy consumption of base transceiver stations,” *Energy*, vol. 81, pp. 286-293, 2015.
- [5] R. Tu, X.-H. Liu, Z. Li, Y. Jiang, “Energy performance analysis on telecommunication base station,” *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 315-325, 2011.
- [6] J. Wang, Q. Zhang, Y. Yu, “An advanced control of hybrid cooling technology for telecommunication base stations,” *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 172-184, 2016.
- [7] S. Semaoui, A. H. Arab, S. Bacha, B. Azoui, “Optimal Sizing of a Stand-alone Photovoltaic System with Energy Management in Isolated Areas,” *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 358-368, 2013.
- [8] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, Z. Fang, “Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm,” *Solar Energy*, vol. 82, pp. 354-367, 2008.
- [9] C. V. T. Cabral, D. O. Filho, A. S. A. C. Diniz, J. H. Martins, O. M. Toledo, L. V. B. M. Neto, “A stochastic method for stand-alone photovoltaic system sizing,” *Solar Energy*, vol. 84, pp. 1628-1636, 2010.
- [10] Č. Zeljković, P. Mršić, B. Erceg, “Simulation-Based Energy Assessment of PV Systems Installed in an Urban Environment,” 20th International Symposium Power Electronics Ee2019, Novi Sad, Serbia, October 23-26, 2019.
- [11] A. P. Dobos, PVWatts Version 5 Manual, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 2014.
- [12] J. Lorincz, T. Garma, G. Petrovic, “Measurements and modelling of base station power consumption under real traffic loads,” *Sensors*, vol. 12, pp. 4281-4310, 2012.
- [13] R. J. Aguiar, M. Collares-Pereira, and J. P. Conde, “Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices,” *Solar Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 269-279, January 1988.
- [14] R. Aguiar and M. Collares-Pereira, “TAG: a time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation,” *Solar energy*, vol. 49, no. 3, pp. 167-174, September 1992.
- [15] B. Ridley, J. Boland, and P. Lauret, “Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 478-483, February 2010.
- [16] 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.
- [17] A. Petraglia, A. Spagnuolo, C. Vetromile, A. D’Onofrio, C. Lubritto, “Heat flows and energetic behavior of a telecommunication radio base station,” *Energy*, vol. 89, pp. 75-83, 2015.

#### ABSTRACT

In this paper, a method for performance analysis of stand-alone photovoltaic systems based on sequential Monte Carlo simulation is theoretically described and programmatically implemented. The method is applied to the supply of mobile telephony base stations. The results provide information about the annual use of renewable energy, working hours of back-up diesel generator, energy needed for cooling etc. These data can serve in the techno-economic assessment of the selected base station power supply solution.

#### PERFORMANCE ANALYSIS OF STANDALONE PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR TELECOMMUNICATION BASE STATIONS

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg