

# Optimalno projektovanje hibridnog sistema za off-grid napajanje električnom energijom

Zoran R. Radaković, Nikola M. Paunović, i Ivan L. Mitev

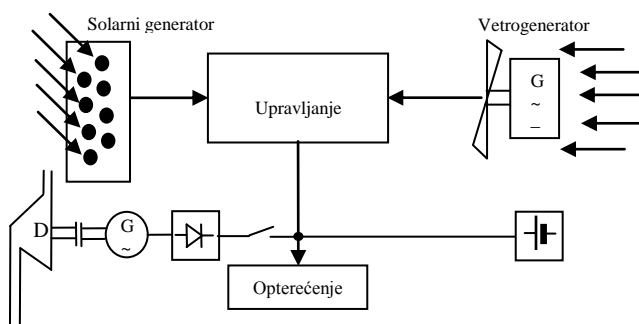
**Sadržaj** — U radu se opisuje metodologija i na bazi nje razvijeni softver za izbor optimalnih karakteristika komponenti hibridnog sistema za napajanje električnih prijemnika (telekomunikacione opreme) na kojoj ne postoji adekvatna mogućnost njihovog napajanje iz elektro-distributivne mreže. Hibridni sistem se sastoji od solarnih panela, vetrogeneratora, baterije akumulatora i dizel-električnog agregata. Softver sadrži solarni kalkulator, koji na bilo kom specificiranom mestu (geografska širina, dužina i nadmorska visina) izračunava sunčevo zračenje tokom godine. Za zadate podatke o brzini vetra na lokaciji, kao i podatke o električnoj potrošnji, program izračunava sve relevantne parametre, kao i trenutke uključenja i vreme rada dizel-agregata. Na osnovu rezultata proračuna se može definisati optimalno tehnoko-ekonomsko rešenje za jedan ovakav sistem, a zatim uporediti i njegova cena sa rešenjem koje podrazumeva izgradnju elektroenergetske mreže do najbližeg dostupnog priključka.

**Ključne reči** — Hibridni sistem napajanja, Solarni kalkulator, Solarni paneli, Vetrogenerator

## I. UVOD

RAD se bavi aktuelnom tematicom projektovanja sistema sa alternativnim izvorima energije. Osnovni cilj rada je da prikaže razvijeni program za optimizaciju karakteristika komponenti sistema. Osnovna namena i motivacija za razvoj sistema je bilo projektovanje jednog sistema za napajanje prijemnika u situaciji da u blizini nije postojalo mesto priključka na javnu elektrodistributivnu mrežu. Topologija predviđenog hibridnog sistema je prikazana na slici 1. Kao generatori električne energije u softveru se mogu koristiti solarni generatori i vetrogeneratori. Baterije električnih akumulatora se koriste kao skladište električne energije, kroz koje se rešava problem različite snage generisanja električne energije i snage potrošnje električne energije – generisanje je neravnomerno, zavisno od atmosferskih prilika i doba dana, dok je potrošnja po pravilu ravnomerna. Pored ove dve komponente, u cilju ostvarenja pouzdanosti napajanja, kao i racionalnog dimenzionisanja solarnih- i vetrogeneratora, po pravilu je neophodan izvor električne energije koji je nezavisan od atmosferskih prilika:

standardno je rešenje sa dizel-električnim agregatom.



Sl. 1. Konfiguracija hibridnog sistema napajanja.

Pri projektovanju sistema, odnosno definisanju karakteristika elemenata, treba imati na umu sledeće činjenice:

- Polazni kriterijum pri projektovanju sistema bi mogao da bude da srednja vrednost energije generisane u toku dana bude jednaka energiji koju zahteva prijemnik u toku dana. Kapacitet baterije bi bio određen potrebnom energijom u periodu kada generatori imaju malu dohodovnost (period bez vetra, u danima kada su kratki dani i duge noći, sa malom vrednošću solarne iradijancije. Dizel generator može da bude manje snage, koja treba da bude nešto veća od snage potrebne za napajanje prijemnika; pošto se u praktičnim slučajevima radi o malim potrošnjama (reda veličine 1 – 3 kW), snaga dizel-agregata nije kritična (u praksi su standardno u upotrebi generatori snage 5 kW i 10 kW).

- Osnovnu teškoću u prethodno izloženom pristupu predstavlja procena kritičnog perioda sa malom dohodovnošću generatora. Poseban problem predstavlja činjenica da se periodi male dohodovnosti solarni- i vetrogeneratora ne poklapaju – po pravilu, minimum za dnevno generisanu energiju za solarne generatore se javlja zimi, a minimum za vetro generatore leti. Razradom prethodno navedenog, dolazi se do ideje i postupka da se izvrši simulacija rada sistema tokom čitave godine, koja predstavlja periodu ponavljanja ponašanja sistema.

- Nominalnu snagu solarnih panela, vetrogeneratora, kao i kapacitet baterija, treba odabrati tako da simulacija rada sistema ima za rezultat mali broj uključenja dizel generatora u toku godine. Prihvatljiv broj uključenja i vreme rada dizel agregata su stvar odluke korisnika.

- Rešenje sa kojim se ima minimalno vreme rada dizel-električnog agregata nije jednoznačno. Primera radi, može se postići povećanjem nominalne snage jednog od generatora ili oba generatora. Može se, takođe, postići

Z. R. Radaković, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-11-3218 328; faks: 381-11-3248681; e-mail: radakovic@etf.rs).

Nikola M. Paunović, Elektrotehnički fakultet (student), Bul. kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (paun14@gmail.com).

Ivan L. Mitev, Elektrodistribucija Beograd d.o.o., Gospodar Jevremova 26 – 28, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail: mitev@sbb.rs).

povećanjem kapaciteta baterija. Svako od navedenih povećanja ima određenu cenu i najbolje je ono rešenje čija je snaga minimalna.

Interesantno je primetiti da povećanje snage jednog od generatora neće neizostavno dovesti do poboljšanja situacije, odnosno smanjenje vremena rada dizel-agregata. Može se dogoditi da se time poveća energija u periodima kada je već ima dovoljno, a da se ništa ne postigne u kritičnim periodima (na primer kada nekoliko dana nema vetra, pa je snaga koju daje vetrogenerator nula, ma koje snage vetrogenerator bio). Ovo je dodatni razlog da se izvrši simulacija rada sistema u toku čitave godine i ustanovi stanje (energetski bilans i trenuci i vreme rada dizel-električnog agregata).

## II. SOLARNI KALKULATOR

Proračun solarne iradijance se vrši koristeći detaljni model koji tretira fiziku nebeskih tela, klimatologiju i meteorologiju. Zbog kratke forme u kojoj je potrebno prikazati čitav simulator (softver), u radu se navode samo veličine čiji je uticaj obuhvaćen u modelu, kao i neke karakteristične ilustracije.

Proračun se zasniva na dnevnim vrednostima indeksa vedrine (odnos globalne horizontalne iradijance na zemlji i iradijance pre ulaska u atmosferu).

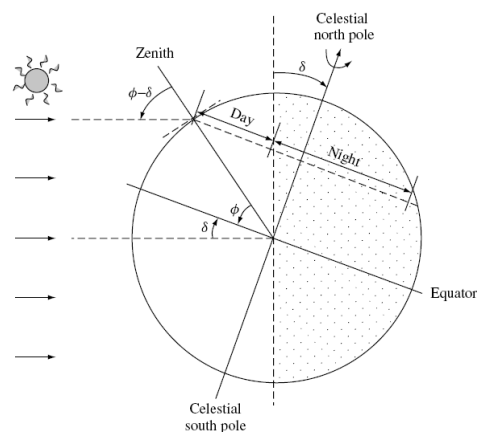
U modelu su uvaženi svi relevantni faktori koji utiču na solarnu iradijansu koja pada na površ panela, kao i na snagu generisanja električne energije solarnim panelima:

- Tri postojeće komponente sučeve iradijance (direktna, difuziona i reflektovana)
- Nagib i orijentacija solarnih panela
- Temperatura ambijenta
- Step en zaprljanja površine solarnih panela
- Faktor starenja (degradacije) solarnih panela

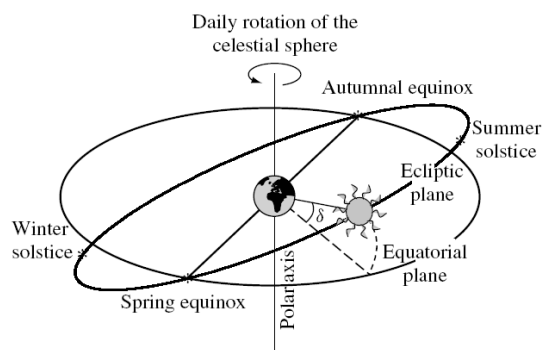
U daljem tekstu se daje nekoliko karakterističnih ilustracija iz metode proračuna:

- Skica za izračunavanje ugla između zraka koji dolazi direktno od sunca do horizontalne površi na zemlji je prikazana na slici 2.
- Skica za precizno izračunavanje pozicije zemlje (koja se okreće oko sunca) u odnosu na ravan ekliptike za svaki dan tokom godine, kao i pozicija sunca na nebu tokom dana je prikazana na slici 3.
- Slika 4 prikazuje uticaj orijentacije solarnih panela na snagu koja padne na površ panela.

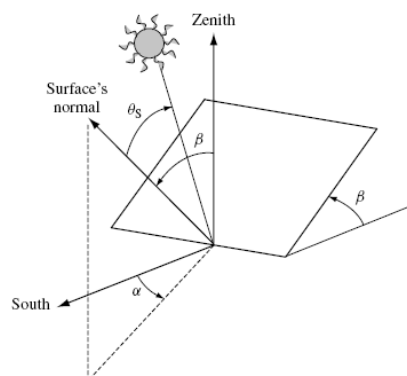
Prethodno navedeni elementi su se odnosili na ulaznu iradijansu (površinsku gustinu snage upadnog sunčevog zračenja) na površi solarnog panela. Pored toga, na snagu generisane električne energije, utiče i zaprljanje solarnih panela, kao i pogoršanje karakteristika panela tokom vremena, što je takođe uzeto u obzir. Sam proračun snage generisanja energije je vršen po formulama koje su izvedene iz ekvivalentne šeme solarnog panela, pri čemu se u formuli koriste standardni parametri solarnih panela (napon praznog hoda, struja kratkog spoja, napon i struja u tački maksimalne snage (MPP) itd.).



Sl. 2. Relativna pozicija Zemlje u odnosu na Sunce zadata za podnevne sate i dnevnu negativnu deklanaciju ( $\phi$  – geografska širina,  $\delta$  – ugao deklanacije za zadati dan u toku godine).



Sl. 3. Nebeska sfera i ekvatorijalna ravan



Sl. 4. Uticaj ugla incidencije upada sunčevog zraka  $\theta_s$  u odnosu na orjentisanu površinu (nagib  $\beta$  orijentacija  $\alpha$ )

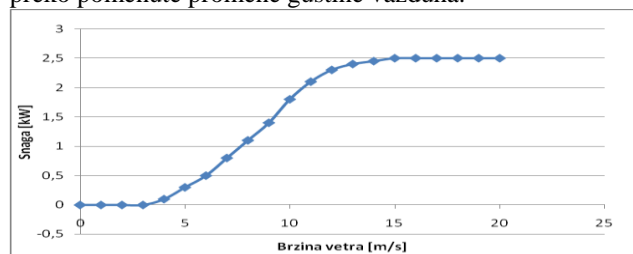
## III. ENERGIJA GENERISANA IZ VETRA

Ulazni parametri, odnosno veličine čiji je metod uvažen u proračunskoj metodi, su sledeći:

- Profil promene brzine vetra tokom vremena – bar na jednoj visini
- Hrapavost površi tla (ako se poznaje vrednost brzine vetra na dve visine, iz njihovih vrednosti se može izvršiti finija procena hrapavosti)
- Visina rotora
- Nadmorska visina
- Temperatura

Nadmorska visina i temperature su podaci koji služe za određivanje gustine vazduha, od koje zavisi energija vetra, pa i energija koja se dobija na izlazu iz vetrogeneratora.

Osnovna kataloška karakteristika generatora je zavisnost izlazne snage od brzine vetra (na visini rotora) – slika 5. Brzina na visini rotora se određuje iz brzine na poznatoj visini i hrapavosti terena. Korekcionni faktori pri izračunavanju izlazne snage generatora se izračunavaju preko pomenute promene gustine vazduha.



Sl. 5. Kataloška karakteristika vetrogeneratora

#### IV. PRORAČUN STANJA BATERIJE

Stanje baterije se u svakom trenutku procenjuje na osnovu stanja u prethodnom trenutku i energetskog bilansa u periodu od prethodnog trenutka. U programu vremenski korak proračuna je 1 sat. U energetski bilans ulaze generisana i utrošena energija, ali i gubici na unutrašnjem otporu baterije, koji je srazmeran kvadratu struje – struja je jednaka odnosu razlike generisane i utrošene energije i napona na bateriji. Metoda uvažava promenu unutrašnjeg otpora baterije od temperature, ali i uticaj temperature na vrednost kapaciteta baterije. Karakteristike baterije potrebne da se sprovede postupak proračuna iz programa se mogu definisati na osnovu standardno dostupnih karakteristika iz kataloga proizvođača baterija.

U programu je implementiran i pomoćni program za procenu potrebnog kapaciteta baterije, koji se izračunava na bazi zadate potrošnje, perioda u kome baterija treba da obezbedi tu potrošnju i minimalne temperature ambijenta pri kojoj se odvija ovaj proces (slika 6).

Sl. 6. Ulazna maska sa karakteristikama baterije i prozorom za inicijalnu procenu kapaciteta

#### V. TEMPERATURA AMBIJENTA

Tokom razvoja metode za precizno opisivanje svake od relevantnih komponenti sistema javila se potreba da se na osnovu poznatih vrednosti minimalne ( $T_{min}$ ) i maksimalne ( $T_{max}$ ) temperature ambijenta u jednom danu (to su podaci do kojih se može doći), odredi i vremenska promena

temperature u toku čitavog dana. Analizom podataka i detaljnim testiranjem se došlo do sledećeg postupka. U periodu od izlaska sunca ( $H_{SUNRISE}$ ) do zalaska sunca – ova vremena se dobijaju iz solarnog kalkulatora – temperatura ambijenta u satu "hour" se izračunava prema izrazu

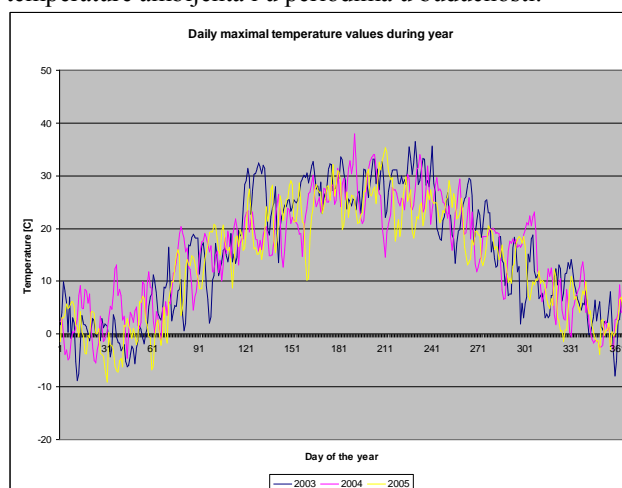
$$T_x = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{t_1} (hour - 15)\right) + \frac{T_{max} + T_{min}}{2}, \quad (1)$$

gde je  $t_1 = 15 - H_{sunrise}$ . U periodu od zalaska sunca do izlaska sunca sledećeg dana ( $H_{SUNRISE, N}$ ), temperatura se izračunava po izrazu

$$T_x = \frac{T_{max} - T_{min, N}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{t_2} (hour - 15)\right) + \frac{T_{max} + T_{min, N}}{2}, \quad (2)$$

gde je  $t_2 = 24 - 15 + H_{SUNRISE, N}$ , a  $T_{min, N}$  minimalna temperatura sledećeg dana.

Vrednosti minimalnih i maksimalnih dnevnih temperatura su dostupne za prethodne godine, ali za procenu snage generisanja električne energije u budućnosti je potrebno izvršiti njihovu procenu. Na slici 7 je, ilustracije radi, prikazana promena maksimalnih dnevnih vrednosti temperatura u Beogradu za tri uzastopne godine. Sa slike se vidi da postoji jasna sinusna zavisnost promene, koja se ponavlja iz godine u godinu, tako da se na osnovu ovih podataka može izvršiti i dobra procena promene temperature ambijenta i u periodima u budućnosti.



Sl. 7. Promena maksimalnih dnevnih temperatura ambijenta

#### VI. O PROGRAMU

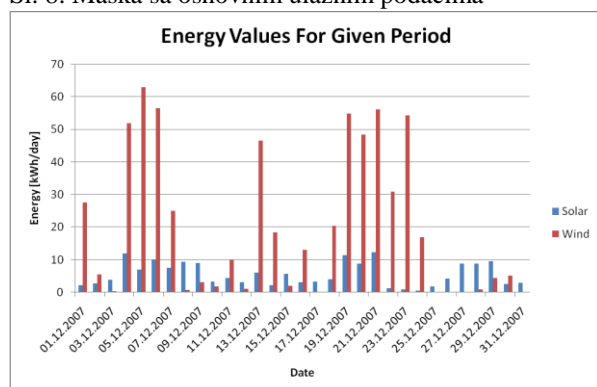
Program je razvijen koristeći sledeće alate: Excel (za ulazne podatke i pomoćne izlazne podatke), VBA (za rutine za proračune i za generisanje grafičkih izveštaja), Access (za baze podataka).

Na slici 8 je prikazan osnovni ekran sa ulaznim podacima. Interesantno je primetiti da se, pored tipa i broja solarnih panela, o njima daje i podatak o položaju istok zapad, kao i sever jug, što je bitno za određivanje solarne iradijancije. Pored tipa, za vetrogenerator se zadaje i visina postavljanja, jer se brzina vetra menja sa promenom rastojanja od tla.

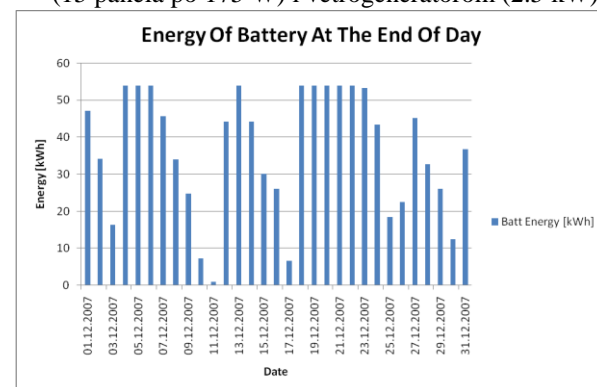
Softver omogućava generisanje različitih formi izveštaja o svim rezultatima proračuna relevantnim za hibridni sistem napajanja, ali i o interesantnim međurezultatima,

kao što su komponente solarne iradijancije. Postoje forme izveštaja koje omogućavaju analize i detaljno razumevanje rada sistema, ali i forme koje daju globalne pokazatelje rada sistema. Primeri izveštaja su dati na slikama 9 – 12.

Sl. 8. Maska sa osnovnim ulaznim podacima



Sl. 9. Dnevno generisane energije solarnim generatorima (15 panela po 175 W) i vetrogeneratorom (2.5 kW)



10. Stanje baterije na kraju dana

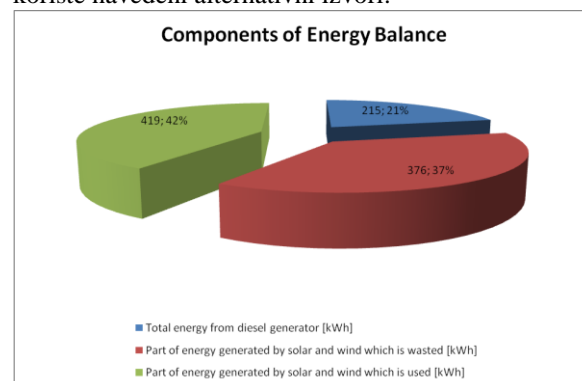
## VII. MOGUĆE PRIMENE PROGRAMA

Program praktično predstavlja simulator rada hibridnog sistema napajanja. Njime se može sagledati tehnički aspekt ponašanja ovakvih sistema, ali i proceniti ukupni troškovi (investicioni i operativni – rad dizel agregata), a zatim i odabrati optimalno tehničko rešenje. Poređenjem ukupnih troškova sa onima koji bi se imali za izradu električne mreže do prijemnika se može doći do odgovora da li je u konkretnom slučaju bolje izgrađivati mrežu ili implementirati hibridni sistem napajanja.

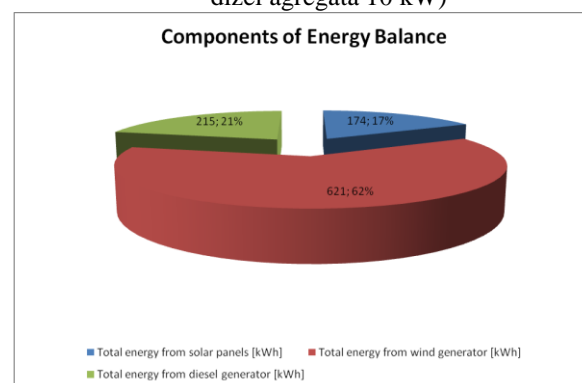
Delovi programa se mogu koristiti i za jednostavnije proračune, kao što je određivanje električne energije koju bi dali solarni generatori ili vetrogenerator postavljeni na nekoj lokaciji, pri čemu se celokupna generisana energija

iskorišćava – ili se troši na prijemnicima ili se predaje javnoj elektrodistributivnoj mreži.

Jednostavnim preuređenjem programa, mogu se izračunati i druge konfiguracije napajanja u kojima se koriste navedeni alternativni izvori.



Sl. 11. Komponente energetskeg bilansa (nominalna snaga dizel agregata 10 kW)



Sl. 12. Ukupne energije generisane u čitavom periodu

## VIII. ZAKLJUČCI

U radu su prikazane teorijske osnove i funkcionalnost razvijenog softvera za simulaciju rada hibridnog sistema napajanja, koja je neophodna ako se želi postići optimalno ekonomsko rešenje, uz pouzdano tehničko rešenje. Softver je razvijen za potrebe projekta napajanja bazne stanice mobilne telefonije koja se nalazi na lokaciji udaljenoj od mesta mogućeg priključka na električnu mrežu. Modularna izvedba softvera omogućava njegovo šire korišćenje u oblasti alternativnih izvora energije.

## ABSTRACT

The paper presents the methodology and developed software for optimum sizing of components of hybrid power supply (solar panels, wind generator, batteries and diesel generator) of basic mobile phone stations, when there is no suitable possibility of power supply from public electric network. Solar calculator is imbedded in the software. Software can fully simulate the behavior of hybrid system. Based on it, total costs (investment and operational costs) can be estimated and right decision for power supply can be met.

## SIZING OF OFF GRID HYBRID POWER SUPPLY

Zoran Radaković, Nikola Paunović, Ivan Mitev