

Metod za inženjersku procenu proizvodnje vetroelektrane

Vladimir A. Katić, *Senior Member, IEEE*

Abstrakt — U ovom radu je razmatrana mogućnost brzog i jednostavnog procenjivanja proizvodnje električne energije planirane vetroelektrane na osnovu korišćenja raspoloživih podataka. Pošlo se od pretpostavke da su raspoložive usrednjene godišnje vrednosti brzine i gustine snage energije vetra. Razmatranjem različitih opcija za procenjivanje proizvodnje, predložena je jedna metoda. Radi verifikacije ona je primenjena za jednu lokaciju i četiri vrste vetrogeneratora. Metoda je verifikovana poređenjem sa izračunatom energijom na bazi stvarnih rezultata merenja brzine vetra. Postignuta je zadovoljavajuća tačnost pogodna za inženjerske procene, čime je metoda opravdala mogućnost primene.

Ključne reči — Vetroenergija, Vetroelektrane, Metod procene proizvodnje.

I. UVOD

Primena obnovljivih izvora energije danas je prihvaćena kao jedno od rešenja za zamenu fosilnih goriva, čije rezerve se ubrzano iscrpljuju. Istovremeno, time se omogućuje smanjenje emisije CO₂ i drugih gasova staklene bašte, za koje je pokazano da doprinose povećanju prosečne temperature na Zemlji i time dovode do klimatskih promena [1].

Za generisanje električne energije iz obnovljivih izvora najčešće se koriste energije vetra, vode, sunca, biomase i geotermalna. Trenutno su u svetu najveći instalisani kapaciteti u vetroelektranama sa dobrim perspektivama rasta. Na sl. 1 prikazana je struktura primene obnovljivih izvora prema planu za 2050. god., gde se vidi da će najveći deo obnovljivih izvora biti angažovan za dobijanje električne energije (58%), od čega 41% (ili 24% od ukupnog) će činiti vetroelektrane [2].

U Srbiji je utvrđen značajan potencijal za korišćenje energije vetra i već su izgrađene ili su u izgradnji vetroelektrane ukupne snage od 566 MW [3,4]. Strategijom razvoja energetike Srbije predviđeno je da se u narednom periodu (do 2030. god.) izgradi ukupno 600 MW, ali su procenjeni potencijali znatno veći (1300 MW, pa i više) [4,5]. To ukazuje na potrebu da se kontinuirano istražuju adekvatne lokacije i mogućnosti izgradnje novih vetroelektrana.

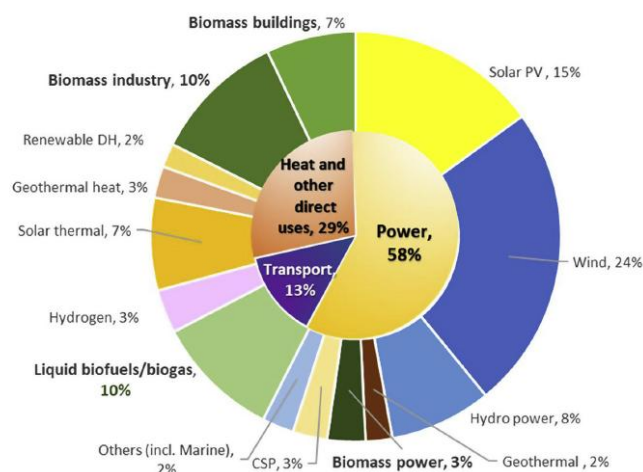
Jedan od prvih preduslova za određivanje pogodne lokacije je poznavanje energetskog potencijala. Ovaj potencijal se određuje preko brzine vetra i gustine snage vetra u određenoj oblasti ili na mikrolokaciji. U svetu je poznat veliki broj studija, naučnih radova i drugih publikacija na ovu temu. Pored toga postoji i veći broj web-sajtova, preko kojih se može dobiti procena vetro-energetskog potencijala, a jedan od takvih je i „Global Wind Atlas“ (<https://globalwindatlas.info/>)

Vladimir A. Katić je sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: kata@uns.ac.rs).

[6]. U Srbiji je rađeno nekoliko studija, a jedan od primera je i studija „Atlas vetrova AP Vojvodine“ [3].

Međutim, problem je što su u tim publikacijama ili na sajtovima date uprosečne godišnje vrednosti brzine i gustine energije vetra. Razlog za to je velika promenljivost energije vetra, kao i zavisnost od mnogih lokalnih faktora (mikroklima, reljefa, orografije, i dr.), što sve umanjuje praktičnu primenljivost ovih podataka. Da bi se dobile tačnije procene za odabranu lokaciju, preporučuju se dugotrajna, specijalizovana merenja parametara energije vetra u trajanju od bar godinu [7]. Na taj način postavljaju se pouzdane osnove na bazi kojih se može dovoljno tačno odrediti količina električne energije, koju bi planirana vetroelektrana proizvela na datoj lokaciji. Ipak, ovakva merenja su skupa, dugo traju i zahtevaju angažovanje specijalizovanih stručnjaka, eksperta u ovoj oblasti.

U ovom radu se razmatraja mogućnost brzog i jednostavnog procenjivanja proizvodnje električne energije planirane vetroelektrane na osnovu korišćenja raspoloživih podataka. Cilj je da se korišćenjem raspoloživih podataka srednje godišnje vrednosti brzine i gustine snage energije vetra, kao i karakteristika vetrogeneratora razvije adekvatna metoda za inženjersku procenu proizvodnje jedne vetroelektrane. Razmatranjem različitih opcija za procenjivanje proizvodnje, predložena je metoda. Radi verifikacije ona je primenjena za jednu lokaciju i četiri vrste vetrogeneratora. Metoda je verifikovana poređenjem sa izračunatom energijom na bazi stvarnih rezultata merenja brzine vetra.

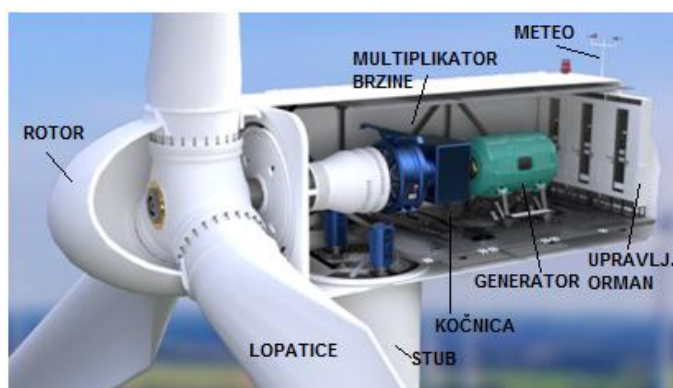


Sl. 1. Plan korišćenja obnovljivih izvora za 2050. god. [2]

II. NAČIN PRETVARANJA ENERGIJE VETRA

Energija vetra, kao linearno vazdušno kretanje pretvara se u korisnu rotacionu mehaničku energiju posredstvom trokake

vetroturbine. Vetroturbina je postavljena na horizontalnu osovinu na vrhu nosećeg stuba. Zbog male brzine obrtanja (20-30 min⁻¹) ova osovina se naziva „spora“. Da bi se postigla potrebna ugaona brzina za pogon električnog generatora koristi se mehanički sklop kojim se povećava brzina - multiplikator brzine. Njime se pogon prenosi na „brzu“ osovinu, koja je direktno spregnuta na električni generator. Na njoj se nalazi i mehanička kočnica, za zaustavljanje pogona u slučajevima velikih brzina vetra ili havarije. Generator pretvara mehaničku energiju prenetu sa vetroturbine u električnu energiju, koja predstavlja finalni proizvod rada vetrogeneratora. Ta električna energija se zatim prilagođava parametrima mreže putem energetskih elektronskih pretvarača (obično dvostrukih pretvarača tipa AC/DC–DC/AC), a naponski pomoću energetskih transformatora. Na sl. 2 prikazan je presek vetrogeneratora, odnosno princip vetroelektričnog agregata sa nekim od pomenutih sklopova.



Sl. 2. Princip konverzije energije vetra u električnu energiju [8]

III. PRORAČUN ENERGETSKIH MOGUĆNOSTI

Generalno energija vetra se izražava preko gustine snage, kao:

$$P_v/A = \frac{1}{2} \rho v^3, \quad (1)$$

gde je P_v snaga vetra, A površina osnove cilindra kroz koji struji vetar, ρ specifična gustina vazduha na određenoj nadmorskoj visini i v brzina vetra [1,3,7]. Vidi se da je najuticajniji parametar brzina vetra, pa je njeno precizno određivanje od ključnog značaja.

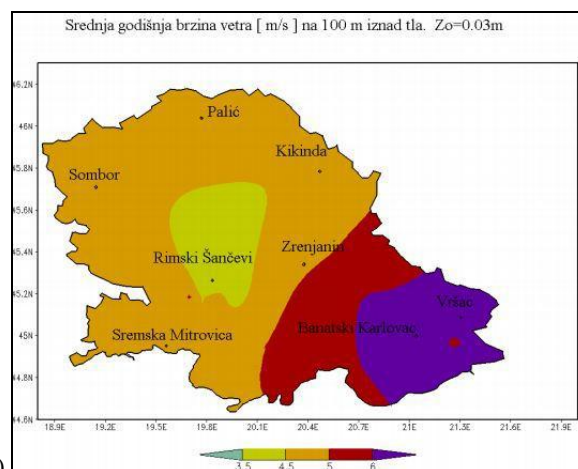
A. Brzina vetra

Brzina vetra dnevno se meri u široko postavljenoj mreži hidro-meteoroloških stanica, kako u Srbiji tako i u svetu. Obično se merenja vrše na 10 m visine na svakih 10 minuta, tj. sa 10-min. usrednjavanjem. Za potrebe vetroenergetike, to nije dovoljno, jer se moderne vetroturbine nalaze na visinama od 100 m ili više. Iz tog razloga, potrebno je ili vršiti merenja na visini vetroturbine ili izmerene vrednosti brzine preračunati na odgovarajuću visinu, uvažavajući i orografiju terena izraženu koeficijentom z_0 .

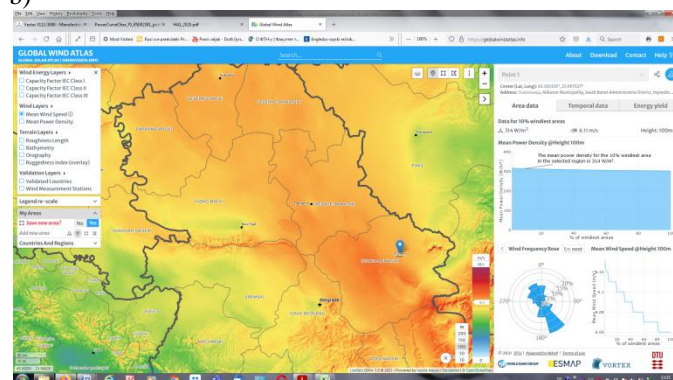
Međutim, iz naučne literature i raspoloživih web sajtova može se dobiti vrednost prosečne godišnje brzine vetra na određenoj lokaciji i visini. Na primer, iz studije “Atlas vetrova AP Vojvodine” može se dobiti prikaz prosečne godišnje brzine vetra na visini od 100 m (sl. 3.a) sa koje se vidi da ona u jugo-istočnoj Vojvodini iznosi preko 5 m/s, odnosno preko 6 m/s [3]. Za isti deo Vojvodine, sa sajta „Global Wind

Atlas”, dobija se da je prosečna godišnja brzina vetra na 100 m iznosi od 5,1 m/s do 9,2 m/s [6].

Za projektovanje novih vetroelektrana ključni podatak je mogući iznos proizvedene električne energije, pa je pitanje da li se i na osnovu ovakvih podataka može dobiti prihvatljiva procena o generisanoj energiji.



a)
b)



Sl. 3. Prosečne godišnje brzine vetra u Vojvodini na 100 m iznad tla prema: a) “Atlasu vetrova APVojvodine” [3] i b) “Global Wind Atlas-u”[6]

B. Snaga vetra

Za odabir snage vetroturbine u sklopu vetroelektrane potrebno je proračunati snagu vetra na zahvatu vetrogeneratora. Merenja pokazuju da raspodelu brzina najbolje prati Weibull-ova funkcija raspodele, koju karakterišu faktor oblika (k) i faktor skaliranja (c) [1,3,7]. Međutim, za većinu lokacija prihvatljiva je vrednost faktora oblika $k=2$, kad se ova funkcija naziva Rayleigh-ova. Sada se srednja godišnja gustina snage može izračunati kao [7]:

$$P_{vSR}/A = 6/\pi^{1/2} \rho (v_{SR})^3 \quad (2)$$

gde je v_{SR} srednja vrednost brzina za određenu lokaciju, koja se dobija iz raspoloživih podataka (kao na sl. 3), a gustina vazduha obično $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ (mada pri većim nadmorskim visinama potrebno ju je posebno proračunati).

Za određen tip vetrogeneratora, može se iz podataka o vetroturbini dobiti površina zahvata, kao $A=R^2\pi$, gde je R dužina lopatica. Na primer, vetrogenerator Vestas V112-3.08 snage 3.08 MW, čije su karakteristike date u tabeli 1 [9], svojim lopicama od 56 m prebriše površinu od 9.852 m², te uz prosečnu godišnju brzinu vetra od $v_{SR}=6,12 \text{ m/s}$, prihvata srednju godišnju snagu vetra od 2,8 MW.

C. Snaga vetrogeneratora

Snaga vetra se koristi za pokretanje vetroturbinе, čiji rad se može podeliti u četiri zone: 1 – polazna $P_{t1}=0$ ($0 < v < v_{in}$), 2 – radna $P_{t2}=f(v)$ ($v_{in} < v < v_n$), 3 – nominalna $P_{t3}=P_n$ ($v_n < v < v_{out}$) i 4 – zaustavna $P_{t4}=0$ ($v > v_{out}$). Na slici 4 prikazane su krive snage nekoliko komercijalnih vetrogeneratora snaga od 2 MW do 3 MW i to REpower MM82 (2 MW), Enercon E 82/2300 (2,3 MW), Nordex N90/2500 (2,5 MW) i Vestas V112/3.08 (3.08 MW). Mogu se uočiti četiri pomenute radne zone.

Za određivanje proizvodnje vetrogeneratora interesantne su radna i nominalna zona, dok je u preostale dve zone snaga turbine jednaka nuli (u polaznoj zoni, jer nije ostvaren dovoljan momenat za pokretanje, a u zaustavnoj zoni da bi se izbegla prevelika mehanička naprezanja). U radnom delu snaga turbine definisana je koeficijentom snage C_p , pa je sada snaga zavisna od brzine vetra na kub:

$$P_{t2} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = \frac{3}{\pi} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot (v_{SR})^3 \quad (3)$$

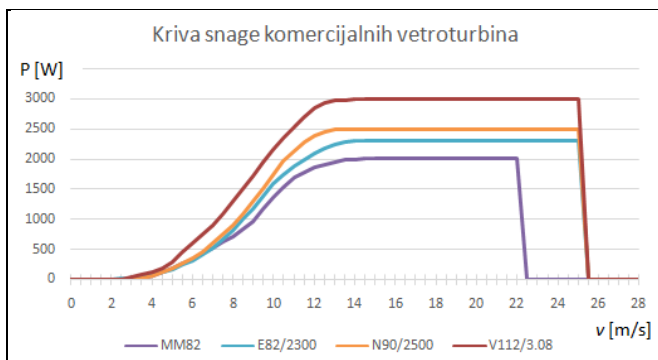
Za proizvodnju najbolje je da turbina radi sa maksimalnom snagom (C_{pmax}), odnosno da je $P_t = C_{pmax} \cdot P_v$. Na primer, za pomenuti model Vestas V112/3080 podaci iz literature definišu $C_{pmax}=0,43$, pa bi prosečna snaga turbine na lokaciji sa sl. 3.b) bila 43% snage vetra, odnosno 1,2 MW [10].

Međutim, u realnim uslovima ovo nije ispunjeno, jer C_p nije konstantno, već funkcija koeficijenta brzohodnosti λ (*tip-speed ratio*) i ugla zakrenutosti lopatica β [7,10]. Koeficijent brzohodnosti zavisi od brzine, pa kriva snage odstupa od kubnog zakona i ima oblik istegnute „S“ krive (sl. 4). Sa sl. 4 vidi se da je moguće izvršiti linearnu aproksimaciju ovh krivih u radnoj zoni. Primer za vetroturbinu V112/3.08 predstavljen je na sl. 5. Sada se kriva snage vetroturbine može linearizovati, tj. napisati kao:

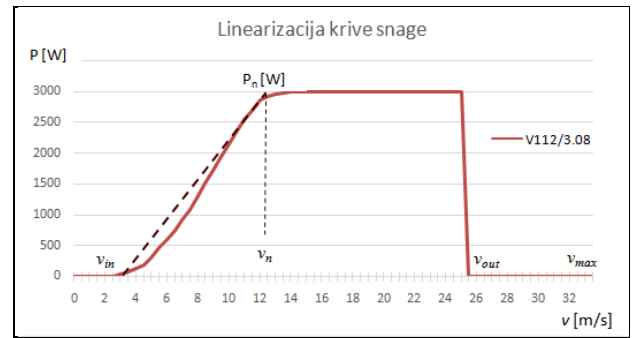
$$P_t = \begin{cases} P_{t1} = P_{t4} = 0, & 0 < v < v_{in} \wedge v > v_{out} \\ P_{t2} = P_n \cdot \frac{v - v_{in}}{v_n - v_{in}}, & v_{in} < v < v_n \\ P_{t3} = P_n, & v_n < v < v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

gde je P_n nominalna snaga u [W], v_{in} upadna brina vetra (*cut-in*), v_n nominalna brzina, v_{out} zaustavna brzina (*cut-out*), a v_{max} maksimalna brzina vetra, sve u [m/s].

Brzina vetra je promenljiva i obično varira u širokim opsezima, Na primer, u jugo-istočnoj Vojvodini (sl. 3) varira u širokom opsegu sa udarima i do 38 m/s [11]. Međutim, meri se sa 10-minutnim usrednjavanjem, čime se nivelišu kratkotrajni udari, pa je mala verovatnoća brzina iznad v_{out} .



Sl. 4. Kriva snage komercijalnih vetroturbin [9]



Sl. 5. Linearizacija krive snage (primer za vetroturbinu V112/3.08)

Za brze proračune ovakva linearizacija i aproksimacija maksimalne brzine je zgodna, jer se sada srednja snaga turbine u celom rasponu brzina vetra može izraziti kao:

$$P_{ISR} = P_n \cdot \left(1 - \frac{v_{in} + v_n}{2 \cdot v_{out}} \right) \quad (5)$$

Izlazna, električna snaga vetrogeneratora P_g zavisi od koeficijenta efikasnosti mehaničkog prenosa (reduktora) η_{meh} i elektro-mehaničkog pretvaranja (generatora) η_{gen} . Sada se za srednju snagu vetrogeneratora može napisati:

$$P_{gSR} = \eta_{gen} \cdot \eta_{meh} \cdot P_{ISR} \quad (6)$$

Na primer, za vetroturbinu V112-3.08, a uz pretpostavku koeficijenata efikasnosti $\eta_{meh}=0,9$ i $\eta_{gen}=0,95$, dobija se za srednju snagu vetrogeneratora 1,03 MW.

D. Procena proizvedene električne energije

Najjednostavnija procena dobijene električne energije iz jednog vetrogeneratora može se dobiti, ako se iskoristi izraz (3) i pretpostavi rad sa C_{pmax} . Ona se dobija poznavanjem samo srednje brzine vetra na nekoj lokaciji (v_{SR}) i karakteristika odabranog vetrogeneratora. Sad je, na bazi (6), generisana godišnja električna energija (E_g) data sa:

$$E_g = P_g \cdot 8760 = \eta_{gen} \cdot \eta_{meh} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot C_{pmax} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_{SR})^3 \cdot 8760 \text{ [MWh]} \quad (7)$$

Na primer, iz vetroturbine V112-3.08 i na lokaciji sa sl. 3.b), može se godišnje očekivati 8.649,23 MWh. Međutim, tu nije uvažena nelinearna priroda koeficijenta snage C_p , pa ni kriva snage vetroturbine (sl. 4), pa se ovakav metod ne može prihvatiti.

Uvažavanjem ovih faktora i uz predloženu linearizaciju krive snage, te usrednjavanje snage turbine prema (5) i uvrštavanjem u (6) za godišnju proizvodnju jednog vetrogenertora dobija se:

$$E_g = \eta_{gen} \cdot \eta_{meh} \cdot P_n \cdot [1 - (v_{in} + v_n) / (2 \cdot v_{out})] \cdot 8760 \text{ [MWh]} \quad (8)$$

Na primer, za pomenuti vetrogenerator Vestas V112-3.08 ukupna godišnja proizvodnja bila bi 16.148,01 MWh. Međutim, korišćenje izraza (5) pretpostavlja se ravnomerna raspodela brzina vetra unutar opsega usrednjavanja, što u praksi nije slučaj, pa ni ovaj metod nije prihvatljiv.

Stvarna raspodela brzina vetra prati pomenutu Rayleighovu funkciju, pa se pomoću nje može izračunati verovatnoća pojavljivanja brzina većih od neke zadate (v_x). Kako su poznati faktori oblika i skaliranja, dobija se jednostavan izraz za ovu verovatnoću [7,12]:

$$\Psi(v \geq v_x) = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_x}{v_{SR}} \right)^2} \quad (9)$$

Ovakva forma je pogodana, jer zahteva poznavanje samo srednje vrednosti brzine vetra. Uz linearizaciju krive snage, može se uzeti da je srednja snaga u radnoj zoni jednaka $P_n/2$ (srednja linija trougla), a u nominalnoj zoni P_n . Sada se za srednju godišnju snagu vetroturbinne može očekivati da je:

$$P_{ISR} = [1/2 \cdot \Psi(v_{in} < v < v_n) + \Psi(v_n < v < v_{out})] \cdot P_n \quad (10)$$

Kako je:

$$\Psi(v_{in} < v < v_n) = \Psi(v > v_{in}) - \Psi(v > v_n), \quad (11)$$

odnosno

$$\Psi(v_n < v < v_{out}) = \Psi(v > v_n) - \Psi(v > v_{out}) \quad (12)$$

izraz (10) se može napisati kao:

$$P_{ISR} = [1/2 \cdot \Psi(v > v_{in}) + 1/2 \cdot \Psi(v > v_n) - \Psi(v > v_{out})] \cdot P_n \quad (13)$$

S obzirom da se verovatnoća $\Psi(v > v_{out})$ može zanemariti u odnosu na ostale, dobija se:

$$P_{ISR} = [\Psi(v > v_{in}) + \Psi(v > v_n)] \cdot P_n / 2 \quad (14)$$

Sad se ukupna godišnja proizvodnja električne energije nekog vetrogeneratora može proceniti na:

$$E_g = \eta_{gen} \cdot \eta_{meh} \cdot [\Psi(v > v_{in}) + \Psi(v > v_n)] \cdot P_n / 2 \cdot 8760 \text{ [MWh]} \quad (15)$$

Na primer, za srednju godišnju brzinu $v_{SR}=6,12$ [m/s] i vetrogenerator V112-3.08, godišnji prinos električne energije može se proceniti na 9.951,8 MWh.

IV. PROVERA TAČNOSTI METODE

Radi provere tačnosti predložene metode procene godišnje proizvodnje električne energije jednog vetrogeneratora biće iskorišćeni stvarni rezultati merenja brzine vetra na visini 60 m (sa usrednjavanjem na 10 minuta) na lokaciji u Banatu [13]. Za poređenje su odabrana četiri različita tipa vetrogeneratora snaga oko 3 MW, čije osnovne karakteristike su date u tabeli 1.

Rezultati su predstavljeni u tabeli 2. Za sva četiri odabrana vetrogeneratora izračunate su vrednosti proizvedene energije u jednogodišnjem period (E_g) prema jednačinama (7), (8) i jednačini (15) - predloženom metodu. Radi tačnog poređenja, rezultati merenja brzine vetra preračunati su na visinu stuba odabranog vetrogeneratora. Na kraju je izračunata greška predložene metode u odnosu na izmereni rezultat.

Može se uočiti da se metoda može primenjivati za brze procene generisane električne energije nekog vetrogeneratora, jer je greška procene u svim slučajevima ispod 5%. Takođe, vidi se da korišćenje jednačina (7) i (8) nije pogodno, jer je greška značajno veća, tj. neprihvatljiva.

V. ZAKLJUČAK

Korišćenje energije vetra za proizvodnju električne energije beleži sve veći porast i otkriva u sve većoj meri svoj pravi potencijal i značaj. U radu je predložena metoda, kojom se korišćenjem raspoloživih podataka o srednjoj godišnjoj vrednosti brzine i gustine snage energije vetra, kao i karakteristika vetrogeneratora može proceniti proizvodnja električne energije jedne vetroelektrane. Metoda je testirana i prikazala je zadovoljavajuću tačnost, te se može pouzdano primeniti za brze inženjerske procene rada vetroelektrane.

Tabela 1. Osnovne karakteristike odabranih vetrogeneratora [9]

Vetrogenerator	V112-3.08	SWT-3.0-101	N131/3000	GE 3.2-130
Proizvođač	Vestas	Siemens	Nordex	Gen.Electric
Snaga (MW)	3.08	3.0	3.0	3.2
v_{in} (m/s)	3,0	3,0	3,0	2,0
v_n (m/s)	12,0	12,5	11,5	12,0
v_{out} (m/s)	25,0	25,0	20,0	25,0
Lopatice, R(m)	56	50,5	65,5	65
Visina (m)	94,0	115	114	110

Tabela 2. Poređenje rezultata primenjene metode i merenja na različitim vrstama vetrogeneratorima

Vetrogenerator /Metod ($v_{SR}=6,12$ m/s)	V112-3.08 E_g [MWh]	SWT-3.0-101 E_g [MWh]	N131/3000 E_g [MWh]	GE 3.2-130 E_g [MWh]
Jedn. (7)	8.649,2	7.573,0	12.699,5	12.344,5
Jedn. (8)	16.148,0	15.503,9	14.324,2	17.256,5
Jedn. (15) (Predl.metod)	10.048,1	9.823,3	10.109,8	11.657,9
Merenje	9.951,8	9.619,9	10.528,4	12.085,8
Greška metode	0,97%	2,11%	3,98%	3,54%

LITERATURA

- [1] L. Freris, D. Infield, „Renewable Energy in Power Systems“, J. Wiley & Sons, Chichester, 2008.
- [2] D. Gielen et al., „The role of renewable energy in the global energy transformation“, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 24, 2019, pp.38-50.
- [3] V.A. Katić i sarad., „Atlas vetrova AP Vojvodine“, Studija, Pokrajinski sekretarijat za energetiku i mineralne sirovine, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008
- [4] <https://mre.gov.rs>
- [5] R. Putnik i sarad., „Mogućnost korišćenja energije vetra za proizvodnju električne energije“, Studija, Elektroprivreda Srbije, Beograd, 2002.
- [6] <https://globalwindatlas.info/>
- [7] Ž. Đurišić, „Vetroelektrane“, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [8] <https://www.infineon.com/cms/en/applications/industrial/wind-energy-systems/>
- [9] <https://www.thewindpower.net>
- [10] C. Carrillo et al., „Review of power curve modelling for wind turbines“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.21, 2013, pp.572-581.
- [11] P. Katić i dr. „Klima SAP Vojvodine“, Poljopr. fakultet, Novi Sad, 1979.
- [12] Z. Ivanović, V.A. Katić, „Obnovljivi izvori električne energije – vežbe“, Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - udžbenici, br.707, Novi Sad, 2018.
- [13] M. Hrnjak, „Glavne karakteristike i komponente vetroelektrane u jugoistočnom Banatu“, Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2021.

ABSTRACT

In this paper, the possibility of quick and simple estimation of electricity production of the planned wind power plant based on the use of available data is considered. We started from the assumption that the average annual values of wind speed and power density are available. By considering different options for estimating production, one method has been proposed. For verification, it was applied to one location and four types of wind turbines. The method was verified by comparison with the calculated energy based on the actual results of wind speed measurements. Satisfactory accuracy suitable for engineering assessments was achieved, which justified the method of application.

A Method for Engineering Assessment of Wind Farm Production

Vladimir A. Katić