



GLAVNE KARAKTERISTIKE I KOMPONENTE VETROELEKTRANE U JUGOISTOČNOM BANATU

MAIN CHARACTERISTICS AND COMPONENTS OF THE WIND POWER PLANT IN SOUTHEAST BANAT

Marko Hrnjak, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast-ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj –U radu je razmatrana primena energije vetra za dobijanje električne energije. Predstavljeni su principi rada vetrogeneratora i vetroelektrana. Opisan je projekat jedne vetroelektrane u jugoistočnom Banatu i izvršena procena nivoa energije vetra u toj oblasti. Na osnovu podataka merenja brzine vetra na 60 m visine, urađeni su proračuni za formiranje vetroparka sa turbinama od 3 MW visine kućišta od 110 m. Analizirana je snaga i proizvodnja ovakvog vetroparka i urađena odgovarajuća poređena.

Ključne riječi: *Obnovljivi izvor energije, Energija vetra, Vetroelektrane*

Abstract –The paper discusses the application of wind energy to obtain electricity. The principles of operation of wind generators and wind power plants are presented. The project of a wind farm in southeastern Banat is described and the assessment of wind energy levels in that area is performed. Based on the data of wind speed measurements at 60 m height, calculations were made for the formation of a wind farm with turbines of 3 MW with a hub height of 110 m. The power and production of such a wind farm were analyzed and appropriate comparisons were made.

Keywords: *Renewable energy source, Wind power, Wind power plants*

1. UVOD

Sa porastom svetske populacije istovremeno rastu i energetske potrebe. Povećana potrošnja dovodi do stalnog povećanja obima iskorišćavanja fosilnih goriva, koja obezbeđuju više od 85% današnjih potreba za energijom. Međutim, ovi izvori energije (fosilnih goriva) praktično su neobnovljivi. Nekoliko miliona godina taloženja biljaka i životinja bilo je potrebno za njihovo stvaranje, da bi u moderno doba bili korišćeni. Procenjuje se da će nafta, ugalj i prirodni gas, koji predstavljaju ekonomski najprihvatljivija goriva, biti iscrpljena već za 30 do 100 godina. Dakle, sve prirodne reserve bi savremeno čovečanstvo moglo potrošiti za svega oko 300 godina.

Pored toga, radom ovih energetske postrojenja emituju se velike količine CO₂ i drugih gasova staklene baste. To dovodi do klimatskih promena i ugrožavanja okoline. Ova

NAPOMENA:

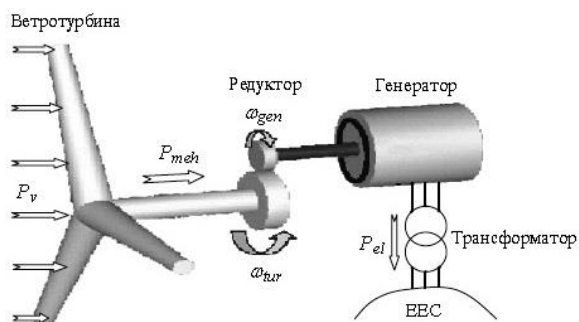
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. dr Vladimir Katić.

pojava značajno utiče na život čoveka, odnosno životna sredina postala je ozbiljno ugrožena i uskoro može doći do ekoloških katastrofa. Rešenje se vidi u intenzivnijem korišćenju postojećih obnovljivih izvora energije, a pre svega energije vetra, vode, sunca, biomase i geotermalne. U ovom radu će se razmatrati mogućnost korišćenja vetroelektrana u jugoistočnom Banatu.

2. UOPŠTENO O ENERGIJI VETRA I VETROGENERATORIMA

Vetar predstavlja horizontalno strujanje vazdušnih masa nastalo usled temperaturne, odnosno prostorne razlike u vazdušnom pritisku. Nastaje kao posledica neujednačenog zagrevanja atmosfere od strane Sunca, te predstavlja oblik solarne energije. Rezultat je i nepravilnosti Zemljine površine i rotacije Zemlje. Brzine strujanja vetra značajno variraju širom planete i zavise od geografskih činilaca, kao što su oblici reljefa i visinske razlike terena, vodene površine, vegetacija i dr. [1].

Brzina vetra meri se anemometrom ili anemografom (Fusov anemograf), koji meri pravac, srednju i trenutnu brzinu vetra. Sve tri veličine se registruju neprekidno na anemografskoj traci. Detektorski deo anemografa obično se nalazi na 10 m iznad tla, na stubu u krugu meteorološke stanice. U novije vreme merenja podataka o vetru vrše se pomoću digitalnih uređaja za prikupljanje podataka, jer standardni meteorološki podaci zahtevaju dodatne obrade (očitanj) pre primene u vetroenergetici. Energija vetra pokreće vetroturbinu, pa time i rad vetrogeneratora. Vetroturbina je smeštena na samom vrhu noseće konstrukcije i može da se sastoji od jedne ili više lopatica. Najčešće se sastoje od tri lopatice, jer se takva konstrukcija pokazala najefikasnijom [1]. Turbina je vezana na električni generator mehaničkim sklopom, koji uključuje sporu osovinu, reduktor (u stvari, multiplikator brzine), mehaničku kočnicu i brzu osovinu. Principijska šema konverzije energije vetra u električnu u vetroagregatima, koji su priključeni na mrežu prikazana je na slici 1. Generator pretvara mehaničku energiju prenetu sa vetroturbine u električnu energiju, koja predstavlja finalni proizvod rada vetrogeneratora. Ta električna energija se zatim prenosi na električnu mrežu za dalje napajanje. Za to je potrebno ostvariti i vezu između priključka vetrogeneratora i električne mreže. Naponsko prilagođavanje generatora EES-u se ostvaruje pomoću energetske transformatora, a po pitanju parametara pomoću energetske elektronske pretvarača (obično dvostrukih pretvarača tipa AC/DC – DC/AC).

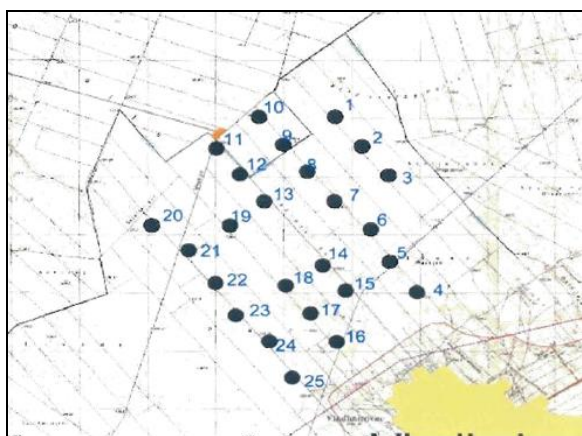


Slika 1. Princip konverzije energije vetra u električnu energiju [2]

3. PROJEKAT VETROPARKA U OKOLINI VRŠCA

Okolina Vršca je veoma pogodna za izgradnju vetroparkova, jer je uvršten značajan vetroenergetski potencijal [3]. U proteklom periodu već je izgrađeno nekoliko vetroelektrana (VE), kao što su VE La Picolina (6,6 MW), VE „Košava“ (68 MW), VE „Mali bunar“ (4 MW), VE „Alibunar“ (42 MW), VE „Čibuk 1“ (157 MW) i VE „Kovačica“ (104,5 MW). U ovom radu će biti razmatran novi projekat vetroparka „Alibunar 2“ [3].

Projekat Vetropark (VP) „Alibunar 2“ planiran je da počne sa realizacijom još 2016. godine, kao jedan od prvih i najznačajnijih projekata u Srbiji vezanih za energiju vetra. Projekat je realizovalo preduzeće „WindVision Windfarm B“ d.o.o. VP „Alibunar 2“ na poljoprivrednom zemljištu u K.O. Alibunar i K.O. Vladimirovac sa leve strane državnog puta I A reda br.3 Beograd – Vršac (po staroj kategorizaciji M 1.9), na potezu od km 53+300 do km 55+900 puta. Lokacija za vetropark odabrana je na osnovu detaljnih analiza vetra i reljefa terena. Vetropark „Alibunar“ sastojao se od 25 vetrogeneratora nominalne jedinične snage po 3,0 MW koji svoju punu snagu razvijaju pri brzinama vetra od 11 m/s. Pri optimalnim uslovima ukupna instalisana snaga vetroparka Alibunar je 75 MW [4,5]. Na slici 2. prikazana je šira lokacija vetroparka.



Slika 2. Šira lokacija „Vetroparka Alibunar 2“ [3]

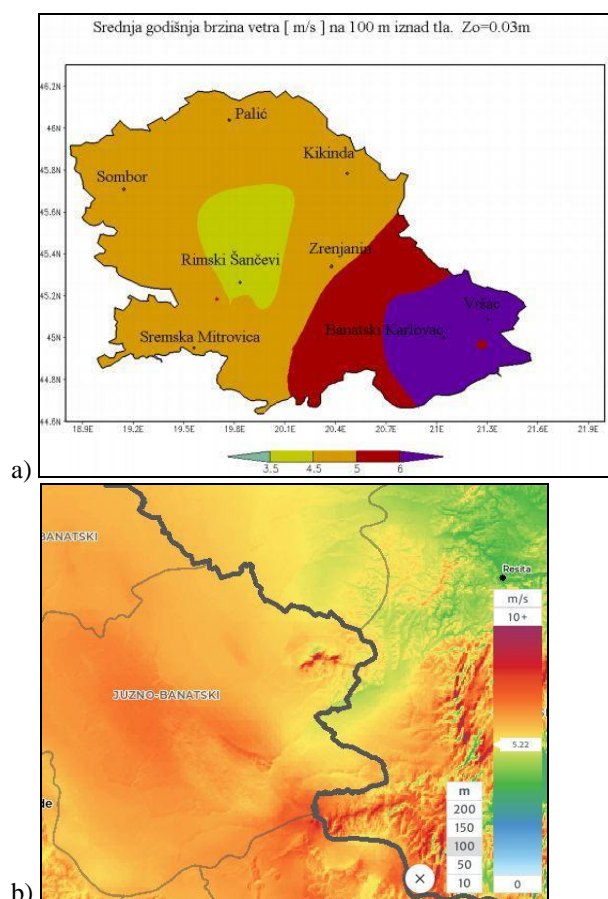
Prostor predviđen za izgradnju vetroparka pokriven je njivama, bez šumske i šumskostepske vegetacije. Eventualnu žbunastu i drvenastu vegetaciju čine pojedinačna stabla i žbunovi kao i pojedini drvodredi uz zemljane puteve. Lokacija na kojoj se planira realizacija vetroparka nalazi se između naselja Vladimirovci i Alibunar i to bliže naselju Vladimirovci od koga je

udaljena oko 2,5 km ka severoistoku. Površina na kojoj se planira vetropark iznosi oko 450 ha, a na njoj nema vodenih površina [3].

4. PRORAČUN ENERGETSKIH MOGUĆNOSTI

4.1. Proračun brzine vetra

Proizvodnja električne energije dobijena iz vetroelektrana zavisi od brzine vetra na treći stepen, pa je to ključni parameter pri projektovanju. Iz raspoložive literature i softverskih alata može se dobiti vrednost prosečne godišnje brzine vetra na određenoj lokaciji. Na slici 3.a prikazana je prosečna godišnja brzina vetra na visini od 100 m iz studije „Atlas vetrova AP Vojvodine“ sa koje se može videti da je u okolini Vršca ona iznosi preko 6 m/s [4]. Na slici 3.b prikazana je ista brzina iz izvora „Global Wind Atlas“ [5], gde se vidi da je prosečna brzina vetra na 100 m iznosi oko 7,78 m/s. Ovo se uklapa u podatak sa slike 5.a. Ipak, za planiranje proizvodnje vetroelektrane potreban je precizniji podatak, kao i u manjim vremenskim jedinicama.



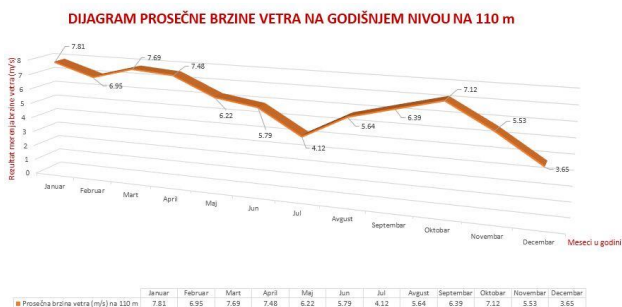
Slika 3. Prosečne godišnje brzine vetra u okolini Vršca na 100 m iznad tla prema: a) „Atlasu vetrova AP Vojvodine“ [4] i b) „Global Wind Atlas-u“ [5]

Na predviđenoj lokaciji za izgradnju vetroelektrane izvršeno je višegodišnje merenje karakteristika vetra na visini od 60 m. Na slici 4 prikazani su rezultati merenja, odnosno prosečna mesečna brzina vetra. Mogu se uočiti standarne sezonske oscilacije brzine vetra, a najniže brzine zabeležene su u julu i decembru. Prosečna godišnja brzina vetra je 5,74 m/s.



Slika 4. Prosečna izmerena brzina vetra na godišnjem nivou na 60 m [3]

Međutim, pošto je kućište planiranog vetrogeneratora je na visini od 110 m potrebno je preračunati brzinu na datu visinu. Za to je iskorišćena poznata logaritamska formula, s tim da je za parameter z_0 uzeto da je $z_0=0,03$, što odgovara zaoranom poljoprivrednom zemljištu [1]. Rezultati proračuna dati su na slici 5, na kojoj su prikazane prosečne mesečne brzine vetra tokom jedne godine. Može se uočiti da je dobijena brzina vetra na 110 m iznad tla, na godišnjem nivou veća za oko 8% od merene na 60 m. Sada je prosečna godišnja brzina vetra jednaka $v_{SR}=6,2$ m/s. To se uklapa u podatak iz “Atlasa vetrova AP Vojvodine”, ali je nešto niže od očitavanja iz “Global Wind Atlas-a”, kao i u shvatanje da su najbolja mesta za postavljanje vetroelektrane ona gde su prosečne brzine vetra od 8 m/s do 10 m/s.



Slika 5. Prosečna proračunata brzina vetra na godišnjem nivou na 110 m

4.2. Proračun snage vetra

Uz brzinu vetra, obično se daje podatak o gustini snage vetra, što je pogodno za izbor vetroturbine. Na osnovu podataka sa slike 5 i primenom izraza

$$P_v/A = 6/\pi \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1)$$

dobija se prikaz mesečnih vrednosti ove veličine, gde je P_v je snaga vetra, A je površina obuhvata lopatica turbine, ρ koeficijent gustine vazduha, a v brzina vetra. Izračunavanjem se dobija gustina snage vetra sa prosečnim mesečnim vrednostima od $55,8 \text{ W/m}^2$ - $563,2 \text{ W/m}^2$, odnosno godišnjom vrednosti $311,7 \text{ W/m}^2$.

Za odabir snage vetroturbine u sklopu vetroelektrane potrebno je proračunati srednju snagu vetra na zahvatu vetrogeneratora. Snaga se izračunava iz izraza:

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

Uvrštavanjem vrednosti merenja iz [3] i uz pretpostavku izbora vetroturbine snage 3 MW sa lopaticama od 55 m u Tabeli 1 data je snaga vetra P_v na mesečnom i godišnjem nivou. Vidi se da je srednja godišnja vrednost snage vetra 2,94 MW, što opravdava izbor vetroturbine od 3 MW.

4.3. Proračun snage i energije vetrogeneratora

Mehanička snaga na osovini vetroturbine P_t zavisi od karakteristike turbine, koja se može podeliti u 4 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 $P_{t4}=0$ ($v > v_{out}$). U radnom delu snaga turbine definisana je koeficijentom snage turbine C_p , pa je sada

$$P_{t2} = C_p \cdot P_v = 6/\pi \cdot 1/2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3)$$

Obično se teži da turbina radi sa maksimalnom snagom (C_{pmax}), pa se izraz (3) može napisati kao

$$P_{t2} = C_{pmax} \cdot P_v = K \cdot v^3 \quad (4)$$

Na osnovu podataka proizvođača, uzeto je da je $C_{pmax}=0,45$, pa je radna karakteristika kubna zavisnost od brzine vetra. Prosečne snage turbine date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Snaga vetra i vetrogeneratora na visini 110m

Mesec	Prosečna snaga vetra [MW]	Prosečna snaga vetroturbine [MW]
Januar	5,35 MW	2,41 MW
Februar	3,63 MW	1,63 MW
Mart	4,96 MW	2,23 MW
April	4,58 MW	2,06 MW
Maj	2,67 MW	1,20 MW
Jun	2,10 MW	0,95 MW
Jul	0,78 MW	0,35 MW
August	1,91 MW	0,86 MW
Septembar	2,85 MW	1,28 MW
Oktoibar	4,01 MW	1,81 MW
Novembar	1,87 MW	0,84 MW
Decembar	0,53 MW	0,24 MW
Sred. god. vrednost	2,94 MW	1,32 MW

Međutim, u realnim uslovima relacija (4) nije ispunjena, jer C_p nije konstantno, već funkcija koeficijenta brzohodnosti λ (tip-speed ratio) i ugla zakrenutosti lopatica β . Koeficijent brzohodnosti definisan je sa:

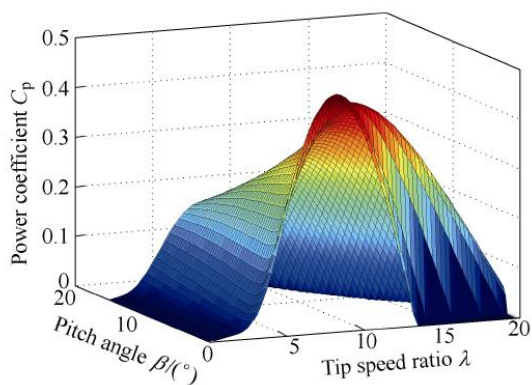
$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{v} \quad (5)$$

gde je ω_r ugaona brzina obrtanja turbine (u [rad/s]), n brzina obrtanja ili broj obrtaja u minuti (u [1/min]), R dužina lopatica, a v brzina vetra. Zakrenutost lopatice koristi se u regulaciji snage turbine i to obično pri radu u trećoj, nominalnoj zoni. Na slici 6 prikazana je kompleksnost ove zavisnosti, gde se vidi uticaj oba parametra [6]. Može se uočiti da se za $\lambda=7$ i $\beta=0$ postiže maksimalni faktor snage, koji za ovaj tip turbine iznosi $C_{pmax}=0,4$.

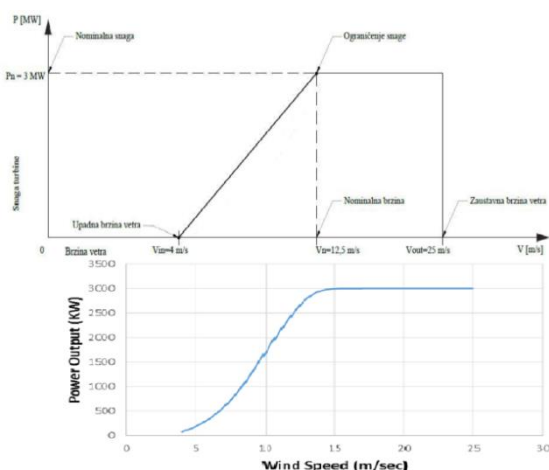
Iz (5) se vidi da koeficijent brzohodnosti zavisi od brzine vetra, pa kriva snage u radnoj zoni odstupa od kubnog zakona datog sa (4), tj. definisana je sa (3) ili

$$P_{t2} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v = 6/\pi \cdot 1/2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

Sada ona ima oblik više kao istegnuta „S“ kriva, kako je pokazano na slici 7 (dole). To omogućava njenu linearnu aproksimaciju u radnoj zoni (slika 7 - gore), pa se sada karakteristika snage vetroturbine može napisati kao:



Slika 6. Zavisnost faktora snage of ugla zakrivljenosti lopatica β i koeficijenta brzohodnosti λ [6]



Slika 7. Kriva snage vetroturbine 3.0 MW: gore - linearna aproksimacija; dole - stvarna karakteristika

$$P_t = \begin{cases} P_{t1} = 0 & , & 0 < v < v_{in} \\ P_{t2} = P_n \cdot \frac{v - v_{in}}{v_n - v_{in}} & , & v_{in} < v < v_n \\ P_{t3} = P_n & , & v_n < v < v_{out} \\ P_{t4} = 0 & , & v_{out} < v < v_{max} \end{cases} \quad (7)$$

gde je P_n nominalna snaga, v_{in} upadna brina vetra (*cut-in*), v_n nominalna brzina, v_{out} zaustavna brzina (*cut-out*), a v_{max} maksimalna brzina vetra. Za brze proračune ovakva aproksimacija je zgodna, jer se sada može izraziti srednja snaga kao:

$$P_{tSR} = P_n \cdot \frac{2v_{out} - v_n - v_{in}}{2v_{max}} \quad (8)$$

Brzina vetra je promenljiva i u jugo-istočnom Banatu varira u širokom opsegu sa udarima i do $v_{max}=38$ m/s [7]. Sada se iz (8), a za podatke o karakterističnim brzinama vetroturbine od 3 MW date na slici 7, može dobiti da je srednja snaga te vetroturbine:

$$P_{tSR} = P_n \cdot \frac{2v_{out} - v_n - v_{in}}{2v_{max}} = 0,44 \cdot P_n \quad (9)$$

Izlazna, električna snaga vetrogeneratora P_{vg} zavisi od koeficijenta efikasnosti mehaničkog prenosa (reduktora) η_{meh} i elektro-mehaničkog pretvaranja (generatora) η_{gen} , pa se može izraziti sa:

$$P_{vgSR} = \eta_{gen} \cdot \eta_{meh} \cdot P_{tSR} \quad (10)$$

Korišćenjem (9) i (10) i uz pretpostavku koeficijena efikasnosti $\eta_{meh}=0,9$ i $\eta_{gen}=0,95$ može se proceniti ukupna godišnja proizvodnja vetrogeneratora (E_{vg}), odnosno kompletnog vetroparka (E_{vp}) „Alibunar 2“:

$$E_{vp} = 25 \cdot P_{vgSR} \cdot 8760 = 247,6 \text{ GWh} \quad (11)$$

Međutim, pretpostavka za primenu izraza (7) je da postoji uglavnom ravnomerna raspodela brzina vetra, što nije slučaj, tj. raspodela brzina prati *Weibull*-ovu, odnosno *Rayleigh*-ovu raspodelu [1,3]. U tom slučaju, može se proceniti ukupna godišnja generisana električna energija i korišćenjem srednje snage vetra (izraz (2)) i sveukupnog koeficijenta efikasnosti vetrogeneratora η_{vg} , koji obično iznosi oko $\eta_{vg}=0,32$ (ili oko 32%) [1], pa se dobija:

$$E_{vp} = 25 \cdot \eta_{vg} \cdot P_{v,SR} \cdot 8760 = 206,03 \text{ GWh} \quad (12)$$

Na ovaj način dobijene su okvirne vrednosti proizvodnje električne energije za dati vetropark. Tačna vrednost je negde između i ona zahteva kompleksnija proračunavanja. Ona bi se dobila ako bi se koristili mereni podaci za brzinu vetra (iz [3]) i izraz (6), te agregirali na godišnjem nivou i za dati broj vetrogeneratora ($N=25$), što ostaje za dalji rad.

6. ZAKLJUČAK

Korišćenje energije vetra za proizvodnju električne energije predstavlja oslonac tkzv. zelene tranzicije Srbije. Linearizacijom krive snage vetroturbine, moguće je jednostavno izračunati snagu vetrogeneratora, odnosno godišnju proizvodnju vetroparka. Sličan podatak može se dobiti iz srednje gustine snage vetra, pa se oba postupka mogu koristiti za određivanje okvirnog nivoa proizvodnje. Tačna vrednost je negde između, ali ona zahteva kompleksnija proračunavanja.

7. LITERATURA

- [1] Ž. Đurišić, „Vjetroelektrane“, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [2] <https://sites.google.com/site/tehskolamojaucionica/home/obnovljiv-i-izvori-energije/princip-konverzije-energije-vetra-u-elektricnu>
- [3] Glavni projekat vetroelektrane „Alibunar“, 2016.
- [4] V. Katić i dr., „Atlas vetrova AP Vojvodine“, Studija, Pokr. sekret. za energ. i miner. sirov., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008
- [5] <https://globalwindatlas.info/>
- [6] F. Xu et al., „Multi-Objective Control of Direct- Driven Wind Power Generation System with Frequency Separation“, Chinese Journal of Electrical Eng., Vol.3, No.1, June 2017, pp.42-50.
- [7] P. Katić, D. Đukanović, P. Đaković, „Klima SAP Vojvodine“, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 1979.

Kratka biografija:



Marko Z. Hrnjak rođen je u Vršcu, 14.09.1994. godine. Završio je školski centar »Nikola Tesla«, smer elektrotehničar procesnog upravljanja u Vršcu. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije upisao je školske 2013/2014. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetski sistemii diplomirao 2019. god., odnosno odbranio master rad 2021. god.



Vladimir A. Katić, red. prof. rođen je 1954. godine u Novom Sadu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1978. godine, a magistrirao i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. i 1991. godine, respektivno. Od 2002. godine je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori, električna vozila i kvalitet električne energije.