

**KROVNE VETROELEKTRANE - MODELOVANJE I PREGLED SOFTVERSKIH ALATA  
ROOF WIND POWER PLANTS – MODELING AND REVIEW OF SOFTWARE TOOLS**Marija Jovanović, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Glavni fokus ovog rada je na primeni i iskorišćenju energije vetra u arhitekturi. Date su glavne prednosti i nedostaci vetrogeneratora u arhitekturi. Takođe predstavljene su matematički modeli malih vetroelektrana, kao i njihove osnovne vrste i mesta primene. Analizirani su i softverski alati koji se mogu koristiti.

**Ključne reči:** Male vetroelektrane, matematički model, softverski alati

**Abstract** – The main focus of this paper is on the application and utilization of wind energy in architecture. The main advantages and disadvantages of wind turbines in architecture are given. Also presented are mathematical models of small wind farms, as well as their basic types and places of application. Software tools that can be used are also analyzed.

**Keywords:** Small wind farms, mathematical model, software tools

**1. UVOD**

Energija vetra je formirala globalno tržište koje uključuje veliki broj kompanija koje proizvode, snabdevaju, upravljaju vetroagregatima i integiraju svoju proizvedenu energiju u postojeće elektroenergetske mreže. Energija vetra je obnovljiv izvor energije koji potiče od snage vetra. Vetar je zapravo oblik solarne energije, jer je uzrokovan neravnomernim zagrevanjem atmosfere od sunca, nepravilnostima površine zemlje i rotacijom zemlje. Strujanja vetra su oblikovana od strane terena zemlje, vode i vegetacije. Industrija vetra je jedna od najbrže rastućih industrija širom sveta sa godišnjim rastom globalnog tržišta od skoro 10%.

Energija vetra osim što je čisto, efikasno i održivo rešenje za proizvodnju energije, ono se takođe visoko ceni od strane javnog mnjenja. Ankete su pokazale da je velika većina građana prihvatila energiju vetra kao održivo rešenje za smanjenje CO<sub>2</sub> i da su u korist energije vetra posebno u Evropi, 89 % javnosti ima pozitivan stav prema energiji vetra.

Takođe, energija vetra je obnovljiva, ne zagađuje vazduh, ne prouzrokuje kisele kiše, ne zrači i ne razara ozonski omotač. Sada i u budućnosti energija vetra se pokazala kao najozbiljniji obnovljiv izvor pri dostignutom razvoju tehnologije. Osnovni razlozi za to su:

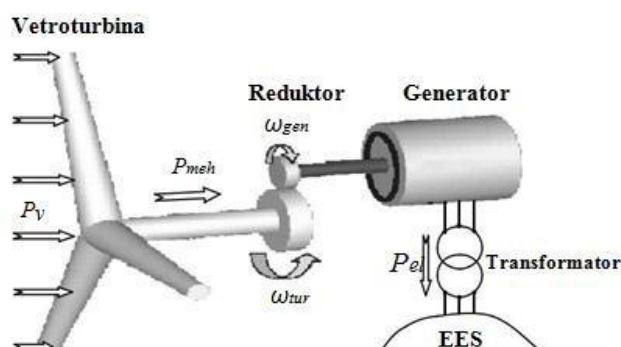
**NAPOMENA:**

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

- neizmerna količina energije,
- pad cena vetrogeneratora i prateće opreme,
- ekološki potpuno čist način pretvaranja energije,
- mala zauzetost zemljišta.

**2. TEHNOLOGIJA VETROGENERATORA**

Kinetička energija vetra se transformiše u mehaničku energiju pomoću vetroturbine. Brzinu obrtanja vetroturbine obično je potrebno prilagoditi zahtevanoj brzini generatora. Zato se koristi mehanički reduktor. Vetrogenerator može biti sinhroni ili asinhroni, pri čemu može raditi sa fiksnom ili promenljivom brzinom obrtanja.



Slika 1. Principijska šema konverzije energije vetra u električnu [1]

**2.1. Vrste vetroturbina**

Generalno postoje dva velika tipa turbina:

**Vetroturbina sa vertikalnom osovinom** (tzv. eng VAWT – „vertical axis wind turbine“) kod koje vetar struji normalno na osu rotacije pa ove vrste vetroturbina ne moraju imati sisteme za detekciju i prilagođavanje smeru duvanja vetra. Generator se kod ove vrste turbine smešta u podnožje te nisu potrebni jaki stubovi, ali opterećenje na donjem kraju osovine je ogromno i zbog velike težine same turbine, a i snage vetra koja se kroz nju prenosi stradaju mehanički elementi pre svega ležajevi u samom podnožju. Primer ovakve turbine je Darrius-ova turbina, koja se obično gradi sa dva ili tri luka i koja ima nizak stepen iskorišćenja, pa se iz tih razloga retko sreće i to uglavnom u području malih snaga.

**Vetroturbina sa horizontalnom osovinom** (tzv. eng. HAWT – „horizontal axis wind turbine“) može biti postavljena uz i niz vetar. Vetroturbine postavljene niz vetar se same prilagođavaju smeru vetra. Lopatice pri rotaciji prolaze kroz zavetrinu stuba pa se stvaraju neželjene mehaničke vibracije i buka što naravno smanjuje koeficijent energetske efikasnosti vetroturbine, pa se ovaj koncept ne koristi pri većim snagama.

### 3. MALE VETROELEKTRANE

Mali vetroagregati su po načinu rada uglavnom jednaki velikim vetroagregatima i s razvojem industrije primenjuju se novi materijali, čime se bitno poboljšala pouzdanost i raspoloživost uređaja. Paralelno s razvojem velikih vetroagregata počeli su se razvijati i mali vetroagregati kao zasebno tržište. Iako ovakav sastav zahteva prilična početna ulaganja, cenom je postao konkurentan tradicionalnim izvorima energije, ako se uzme u obzir celi životni vek postrojenja i izučeće troškova priključka na električnu mrežu. Malim vetroagregatima se smatraju jedinice do 10 kW, koje su namenjene zadovoljenu energetske potreba na nivou domaćinstva.

#### 3.1. Prednosti integrisanja vetrogeneratora u zgradarstvu

Karakteristika brzine vetra jeste da se povećava sa visinom u odnosu na tlo, delimično i zbog manjeg uticaja drveća i drugih prepreka. Postavljanje vetrenjača na krov, naročito visokih zgrada, zvuči logično s obzirom da nije potrebno postavljati visoki stub kao nosač turbine [2].

U nekim slučajevima oblik i anvelopa objekta mogu uticati na performanse integrisanih vetrenjača. Nekoliko proizvođača vetrogeneratora za integraciju u objekte koristi prednosti pojačanih strujanja u zoni atike (niskog obodnog zida, uglavnom kod ravnih krovova) gde se vetar penje uz fasadu većih zgrada i zatim oko zida atike na vrhu pravi jači kovitlac.

Najveći pojedinačni potrošač ukupne proizvedene električne energije u najvećem broju zemalja su upravo zgrade, pa proizvodnja na licu mesta (tj. na samoj parceli) smanjuje potrebu za skupim sistemima prenosa - infrastrukturom. Ovo takođe umanjuje gubitke kod prenosa, kao i količine potrebnog materijala (kablova, stubova i sl).

Kao još jednu prednost ovakvog pristupa u kreiranju koncepta arhitekture nekog objekta treba pomenuti i jasno vizuelno izražavanje stava da je vlasnik objekta posvećen očuvanju resursa i planete. Ovaj slučaj nemamo kod fotovoltaičnih (PV - photovoltaic) solarnih panela, jer oni samo stoje negde na krovu, i često se ne vide sa ulice dok proizvode električnu energiju.

#### 3.2. Mesto postavke malih vetrogeneratora

Vetroturbine dizajnirane za urbano okruženje mogu biti instalirane direktno na krovovima ili se mogu instalirati na prostoru pored zgrada. Lokacija instalacije zavisi od veličine i težine turbine koja zavisi od njenog tipa, primene i eventualno izlazne snage. Stoga, u zavisnosti od gore navedenih faktora, uzimaju se u obzir različiti parametri u pogledu opreme za montažu, strukturnih opterećenja i potrebnih delova.

Jedan od najvažnijih parametara je visina kule koja će ili smestiti lopatice i generator na vrhu (HAWT) ili će delovati kao osa rotacije (VAWT). Opšte je mišljenje da što je toranj veći, to je kvalitet vetra (nizak nivo turbulencije) bolji što će rezultirati efikasnijim i glatkim radom turbine.

Bez obzira na to što je toranj veći, biće potrebno više materijala da se izdrže sve gravitacione i aerodinamičke sile kako bi se osigurala sigurna konstrukcija. Više materijala direktno utiče na ukupnu težinu. Ako se turbina nalazi na zemljištu pored zgrada gde je težina manje važna od maksimiziranja proizvodnje energije, toranj može doseći i do 25 m kako bi se izbegla inducirana turbulencija stabala, zgrada i drugih konstrukcija.

S druge strane, ako se turbina postavi direktno na krov, dozvoljena visina će biti praktično ograničena težinom kule, jer su bezbednosna i vibraciona pitanja od većeg značaja nego maksimiziranje proizvodnje energije. Većina instaliranih HAWT-a na krovu koristi čelike od 5 do 8 metara ili druge materijalne stubove.

#### 3.3. Neke od turbina dostupnih na tržištu EU I SAD

##### 3.3.1. Aero Vironment AVX1000

Ova kompanija je lider u tehnologiji integrisanih turbina. Godine 2006., kompanija je predstavila turbinu od 400W dizajniranu da iskorišćava vetar na atikama objekta. Turbine su dizajnirane da se postavljaju u nizu, npr. 20 komada na zgradi.



Slika 2. Aero vironment AVX1000 [2]

##### 3.3.2. Aerotecture International - turbine na vetar sa spiralnim rotorom

Ovaj tip turbina je visine 3m i 1,5 m u prečniku, 510 V, dizajnirana je za vertikalno instaliranje sa predviđenim izlazom od 1 kW na vetru od 14 m/s. Polazna brzina na kojoj turbina počinje da proizvodi energiju je 2,8 m/s.



Slika 3. Spiralna Aerotecture turbina na zgradi u Čikagu [2]

### 3.3.3. Quiet Revolution QR5 – turbina sa vertikalnom osom

Turbina Quiet Revolution QR5 trenutno je dostupna samo na tržištu Velike Britanije. Zasnovana je na elegantnoj spirralnoj jajolikoj formi (Darrieus), a kao materijal za izradu korišćena su vlakna od karbona i fiberglasa.

Visoka je 5 m (bez nosećeg stuba), sa 3,1 m u prečniku turbina može stajati na nezavisnom stubu ili na krovu zgrade.



Slika 4. Quiet Revolution turbine [2]

### 3.3.4. Vetrogenerator Swift Wind

Prečnik ove turbine je 2,1 m. Ima pet krakova i spoljni ram, kao i dva moguća položaja ugla. Dizajnirana je da stoji na krovovima kuća, na aluminijumskom stubu, sa udaljenjem od krova za samo 0,6 m.

Proizvođač tvrdi da je skoro nečujna. Pravi se od polimera armiranim nano vlaknima.



Slika 5. Swift Wind turbina [2]

## 4. MATEMATIČKI MODEL VETROTURBINE

Kinetička energija raspoloživa u vetru predstavlja kinetičku energiju velikih vazdušnih masa, koje se kreću iznad zemljine površine. Ove vazdušne mase krećući se kroz lopatični prostor turbine predaju deo kinetičke energije koja se transformiše u mehanički rad ili dalje u električnu energiju, zavisno od želje potrošača. Posebno u prošlosti mehanička energija se koristila za pokretanje mlinova za mlevenje žitarica ili za pumpanje vode. Efikasnost konverzije energije vetra u druge korisne energetske oblike zavisi od efikasnosti interakcije rotorskih lopatica sa strujom vetra.

### 4.1. Matematički model trokrake turbine

Kinetička energija struje vazduha mase  $m$  i brzine  $V$  data je jednačinom:

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (4.1)$$

Masa čestice je određena gustinom  $\rho$ , površinom kroz koju se kreće  $S$ , brzinom  $V$  i vremenom kretanja  $t$ ,  $m = \rho SVt$ , tako da izraz (4.1) dobija sledeći oblik:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho SV^3 t \quad (4.2)$$

Snaga posmatrane čestice, odnosno snaga vetra, određuje se kao izvod kinetičke energije po vremenu,  $dE_k/dt$  i iznosi:

$$\frac{dE_k}{dt} = P_{vetra} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dm}{dt} \quad (4.3)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho SV \quad (4.4)$$

$$P_{vetra} = \frac{1}{2} \rho SV^3 \quad (4.5)$$

Prema (4.5) jasno je da je snaga vetra proporcionalna gustini vazduha i trećem stepenu njegove brzine. Gustina vazduha zavisi od temperature, pritiska i vlažnosti. Standardizovana vrednost je  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  za pritisak od 101325 Pa i temperaturu od 15 °C na površini mora.

### 4.2. Matematički model Savoniusove turbine

Chauvin je predložio matematički model zasnovan na padu pritiska na obe strane lopatica, da bi se procenila potencijalna snaga rotora sa dve lopatice, sa razmakom između njih [3]. Trenutni vektor rotacije je  $\vec{\omega} = \dot{\alpha} \vec{k}$  i zbog simetrije Savoniusovog rotora obrtni momenat turbine je:

$$Q = \sum_i (\overline{OM} \times \vec{F}_i) \cdot \vec{k} \quad (4.6)$$

Pretpostavimo da je razlika pritiska na oštrici koja se povlači i na oštrici koja se pruža  $\Delta p_M$  i  $\Delta p_D$  respektivno, pa se obrtni momenat turbine može zapisati i kao:

$$Q = 2r^2 H \int_0^{\pi/2} (\Delta p_M - \Delta p_D) \sin 2\theta d\theta \quad (4.7)$$

Gde je:

$\theta$  – ugao zakreta lopatica,

$r$  – poluprečnik lopatice,

$H$  – visina rotora.

Prosečna snaga  $P$  se dobija integracijom obrtnog momenta u granicama od 0 do  $\pi$ .

$$P = \omega Q = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi} Q d\alpha \quad (4.8)$$

gde je:  $\omega$  – ugaona brzina,  $\alpha$  – azimutni ugao.

Prema eksperimentalnom istraživanju doslo se do zaključka da Darrieus-ova turbina nije samostalna, dok Savonius-ov rotor ima veoma dobre startne momentne karakteristike. Kod Savoniusovog rotora sa dve lopatice postoji velika varijacija statičkog momenta u odnosu na ugaoni položaj, dok su te varijacije kod Savoniusovog rotora sa tri lopatice manje. Savoniusov rotor će startovati iz bilo kog početnog ugla, kada je statički aerodinamički obrtni momenat veći od opterećenja i momenta trenja. Koeficijent maksimalne snage kod Savoniusovog rotora sa dve lopatice je približno 1.5 puta veći od konfiguracije sa tri lopatice. Koeficijenti aerodinamičkih performansi Savoniusovog rotora se normalizuju pomoću koeficijenta ( $q_{\infty} V_{\infty} 4rH$ ) koji je konstantan za sve konfiguracije [3].

## 5. ANALIZA I PREGLED SOFTVERSKIH ALATA

Najzastupljeniji specijalizovani programi za analizu strujanja vetra koji služe kao pomoć pri modelovanju i izgradnji vetroelektrane su Metodyn WT (UrbaWind), Furow, WASP, WindSim, WindStation. Osnovna uloga ovih softverskih alata je prevashodno proračun strujanja vetra kao i prikaz godišnje proizvodnje energije. Svaki od njih je drugačiji na svoj način ali uglavnom svi imaju iste ili slične metode za rad.

Pored osnovne uloge, ovi programi imaju sposobnost da obavljaju i neke funkcije za projektovanje vetroelektrana kao što su izračunavanje proizvodnje turbina na određenim lokacijama, određivanje idealnih pozicija za njihovo instaliranje (s obzirom na strujanja vetra), određivanje trag efekta i sl.

Ovi softverski alati su detaljnije opisani u master radu. Opisani programi su dosta slični zato što su namenjeni da rade iste stvari. Svaki od njih sadži CFD metodologiju koja je dostupna samo kad se program plati u potpunosti.

Nakon njihove analize i ocene, najpogodniji softverski alat za projektovanje je WASP [4].

## 6. ZAKLJUČAK

Predmet naučne analize u ovom radu jeste predstavljanje matematičkih modela vetroturbina i opis softverskih paketa koji se mogu koristiti za projektovanje malih vetroelektrana.

Na samom početku rada opisan je potencijal vetra u svetu i u Srbiji, tehnologija vetrogeneratora, kao i njihove osnovne vrste i karakteristike. Drugi deo rada posvećen je opisu malih vetroelektrana. Male vetroelektrane su namenjene za lokalno korišćenje, za proizvodnju snage od 1 kW do 10 kW. Većina malih vetrogeneratora su horizontalno orijentisani, međutim vertikalno orijentisani vetrogeneratori se sve više upotrebljavaju i njihova prodaja je u porastu.

Pošto projekat malih vetroelektrana nije dovoljno realan u gradovima, rešenje bi bilo korišćenje preciznijih alata za procenu vetra i predviđanja koja uzimaju u obzir efekte senčenja i turbulencije okolnih prepreka u urbanim sredinama.

Mana malih vetroelektrana jeste velika buka i vibracije, pa rešenje leži u tome da se dizajniraju novi noževi za njihovo smanjenje. Takođe, još jedna mana jeste da male turbine nisu bezbedne (za ljude i okolinu) u gradovima. Rešenje je u primeni sistema nadzora i prikupljanja podataka (SCADA sistem) za poboljšanje rada i održavanja – kontrola turbina i pitanja sigurnosti.

Ovakva rešenja bi trebalo da pomognu u smanjenju investicionih troškova i povećanju atraktivnosti i primeni malih vetroelektrana.

U radu su opisane glavne prednosti i nedostaci integrisanja malih vetroelektrana u arhitekturi, kao i njihova mesta postavljanja. Na samom kraju tog dela predstavljene su neke vrste vetroelektrana, različitih proizvođača širom Evrope i SAD.

Nakon ovog dela u radu je predstavljen matematički model trokake i Savoniusove turbine i opis i pregled softverskih alata. Softverski alati se koriste za projektovanje vetroelektrana. Da bi se one projektovale potrebno je prvo odgovoriti na neka od pitanja: koliko energije turbine proizvode na određenim lokacijama, kako napraviti optimalan raspored turbina obzirom na duvanja vetra i ograničenja zbog zaštite životne sredine, koje su posledice priključenja na već postojeću mrežu, koliki su troškovi za izgradnju, koliki kapacitet vetroparka možemo dobiti i dr...

## 7. LITERATURA

[1] <https://sites.google.com/site/tehskolamojaucionica/home/obnovljivi-izvori-energije/princip-konverzije-energije-vetra-u-elektricnu/>

[2] [https://gradjevinarstvo.rs/tekstovi/652/820/ku%C4%87a-vetrenja%C4%8Da-%E2%80%93-da-li-je-integracija-vetrogeneratora-u-objekte-mogu%C4%87a-i-isplativa?fbclid=IwAR0QnOc6Sq3jeNB6qB5PBfpJB4B1N1RrWgSsMCnPx9\\_rCAC\\_F2ScuHeDEIc](https://gradjevinarstvo.rs/tekstovi/652/820/ku%C4%87a-vetrenja%C4%8Da-%E2%80%93-da-li-je-integracija-vetrogeneratora-u-objekte-mogu%C4%87a-i-isplativa?fbclid=IwAR0QnOc6Sq3jeNB6qB5PBfpJB4B1N1RrWgSsMCnPx9_rCAC_F2ScuHeDEIc)

[3] Ion Paraschivoiu „Wind Turbine Design“, Polytechnic International Press

[4] <https://www.wasp.dk/>

### Kratka biografija:



**Marija Jovanović** rođena je u Užicu 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Distribuirani elektroenergetski resursi odbranila je 2019. god. kontakt: jovanovic.marija031@gmail.com



**dr Vladimir Katić red.prof.** rođen je u Novom Sadu 1954. godine. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. godine. Oblasni interesovanja su mu energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, kvalitet električne energije i električna vozila.