

NUMERIČKA SIMULACIJA RADNIH KARAKTERISTIKA MALIH VETROTURBINA

NUMERICAL PERFORMANCE PREDICTION OF SMALL WIND TURBINES

Jovičić, N.¹, Babić, M., Gordić, D., Jovičić, G.

REZIME

Pored brojnih tehnno-ekonomskih faktora, na isplativost investicije u energiju vетра značajno utiče efikasnost vetroturbine, odnosno mogućnost da se sa postojećim postrojenjem proizvede maksimalna količina električne energije. Otuda je u ovom radu prikazana metodologija za simulaciju i proračun radnih karakteristika malih osnovnih horizontalnih vetroturbina. Razvijeni numerički algoritam je iskorišćen za formiranje originalnog softvera pomoću koga je sprovedena predikcija radne karakteristike snaga-brzina veta na primeru projektovane vetroturbine snage 10 kW. Imajući u vidu mogućnosti razvijenog programske paketa, došlo se do zaključka da numerička simulacija radnih karakteristika, u fazi projektovanja radnog kola vetroturbine, doprinosi kvalitetnijem prilagođavanju postrojenja konkretnoj lokaciji na koju će biti postavljeno.

Ključne reči: energija veta, vetroturbina, simulacija radnih karakteristika

SUMMARY

Profitability of investments in wind energy is influenced by many factors. Among others, the wind turbine efficiency, i.e. the possibility to produce maximal electricity with the available machine, is very important. In this paper, it is showed a methodology for numerical prediction and calculation of the small horizontal-axis wind turbines performances. Developed numerical algorithm was used for producing the new software tool that was applied for power-wind velocity performance prediction of the designed 10 kW wind turbine. Having in mind the potentials of new software, it is concluded that numerical simulation of wind turbine performance is crucial in geometrical modelling phase, because of possibility to optimize the impeller parameters with the characteristic of the location when it will be install.

Key words: wind energy, wind turbine, numerical performance prediction

UVOD

Od svih obnovljivih izvora energije najveću stopu razvoja u poslednje dve decenije ima vetroenergetika. Vetar predstavlja neiscrpan ekološki izvor energije čiji globalni potencijal

¹ Prof. dr Nebojša Jovičić, Prof. dr Milun Babić, Dr Dušan Gordić, docent, Dr Gordana Jovičić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac,

višestruko prevazilazi svetske potrebe za električnom energijom. Oko 2% dozračene sunčeve energije se pretvori u vетar [1]. U poređenju sa drugim vidovima obnovljivih izvora energije, vетар ima dominantnu ulogu, jer su njegove prednosti višestruke. Energija vетра je obnovljiva i čista, ne zagađuje vazduh, ne emituje ugljen dioksid, ne prouzrokuje kisele kiše, ne razara ozonski omotač i ne zahteva energetsku zavisnost. Trend porasta u korišćenju energije vетра u svetu je vrlo izražen. Lider na ovom polju su zemlje Evropske Unije, jer je samo u ovim zemljama do početka 2006. godine instalisano oko 70% ukupnih svetskih kapaciteta [2,3,4]. Intenzivan razvoj vetroenergetike u Evropi započeo je u poslednjih deset godina. Tokom 2005. godine u zemljama EU je zabeležen porast od 17,8% ukupno instalisanih vetroenergetskih kapaciteta (40.455 MW) u odnosu na 2004. godinu (34.338 MW). U svim ostalim evropskim zemljama ukupna instalisana snaga elektrana je 370 MW [4]. Samo u 2005. godini u zemljama EU je instalisano 6183 MW novih vetroenergetskih kapaciteta, pri čemu je ukupno uloženo preko 6 milijardi evra. Evropski rekord u instalisanoj snazi od preko 6 GW u vetrogeneratorima u 2005. godini pokazuje da su već početkom 2006. godine prevaziđeni planovi za period 2000. – 2010. postavljeni od strane Evropske komisije za obnovljive izvore energije [5, 6] (40 GW na kraju 2010. godine), dakle pet godina pre planiranog roka. Oko 47.000 vetroagregata u zemljama EU, tokom 2005. godine, proizveli su oko 70 TWh električne energije, što je porast od 21,7% u odnosu na prethodnu godinu [4]. Ova količina električne energije predstavlja nešto preko 2 % ukupne proizvodnje električne energije u zemljama EU i reprezentuje ekvivalent proizvodnji zemlje veličine Austrije (64,7 TW u 2005. god.). Do sada je u industriju energije vетра u Evropi uloženo oko 40 milijardi evra i ukupno je zaposleno oko 100.000 ljudi [1]. Dalji planovi u razvoju vetroenergetike su još ambiciozniji, što će biti objašnjeno u tekstu koji sledi. U prosečno vetrovitoj godini (kakva je bila 2005.), sa instalisanom snagom vetroagregata nešto većom od 40 GW, u Evropi je postignuta godišnja proizvodnja električne energije od oko 70 TWh, što pokazuje da je prosečan broj časova godišnjeg iskorišćenja postrojenja na vетар oko 1.750 h, odnosno prosečni godišnji faktor iskorišćenja oko 20%. Današnja cena električne energije koja se dobija od vетра je tipično od ~3 €c/kWh (za 3.600 časova punog godišnjeg iskorišćenja) do ~8 €c /kWh (za 2.000 časova punog godišnjeg iskorišćenja). Iako još uvek postoje značajne barijere za intenzivniji razvoj vetroenergetike, primetan je efekat da sve veći broj zemalja ulaže sve veća sredstva u vetroenergetiku, zbog već navedenih očiglednih prednosti. Kada se posmatraju ukupno instalirani vetroenergetski kapaciteti, dve zemlje EU imaju instalirano više od 10 GW vetroenergetskih kapaciteta (Nemačka 18.428 MW i Španija 10.027 MW), a 7 zemalja imaju instalirano više od 1 GW vetroenergetskih kapaciteta (Danska 3.128 MW, Italija 1.717 MW, Velika Britanija 1.337 MW, Holandija 1.219 MW i Portugal 1.022 MW) [4].

Prema istraživanjima domaćih eksperata potencijali energije vетра u Republici Srbiji postoje [7, 8, 9], pa se otuda ukazuje na značaj razvoja, pogotovo malih vetroturbina, snage 5-10 kW, prevashodno zbog mogućnosti domaćeg tržišta. Takođe, iskustva stečena u razvoju i eksploataciji malih agregata, od neprocenjive su koristi u osvajanju megavatnih postrojenja. Male vetroturbine su energetski sistemi klasifikovani kao mašine sa snagama od nekoliko vati do 20 kW. Osnovna namena ovih agregata je snabdevanje električnom energijom udaljenih domaćinstava i objekata koji su van dometa elektrodistributivne mreže. Takođe, male vetroturbine se mogu koristiti i pri paralelnom radu sa elektrodistributivnom mrežom. Pored proizvodnje električne energije, ovi uređaji se mogu vrlo uspešno koristiti i za direktni pogon radnih organa uređaja za vodosnabdevanje udaljenih objekata kao i navodnjavanje

poljoprivrednih dobara. Dakle, oblast primene malih vetroturbina je jako velika, bilo da se koriste samostalno ili u kombinaciji sa nekim drugim izvorom energije. Stepen iskorišćenja vetroturbine je dosta nizak, i teoretski u idealnim uslovima, ne prelazi vrednost od 0.593, što se u literaturu naziva i Betz-ovim limitom [10]. Da bi se postigla što veća efikasnost vetroturbine, posebna pažnja se mora posvetiti geometriji radnog kola. Ovaj organ u dinamičkoj interakciji sa vazduhom dovodi do transformacije strujne energije vazduha u mehaničku energiju obrtanja radnog kola i u najvećoj meri utiče na stepen iskorišćenja. U literaturu se mogu naći različiti pristupi i modeli za definisanje optimalne geometrije radnog kola vetroturbine koji se uglavnom zasnivaju na jednodimenzijskim modelima [11]. Takođe, optimizacija geometrijskih parametara radnog kola se može sprovesti korišćenjem modernih numeričkih metoda i uz angažovanje snažne proračunske infrastrukture. Cilj ovog rada je da se prikaže metodologija za simulaciju i proračun radnih karakteristik malih osnovnih horizontalnih vetroturbina. Razvijeni numerički algoritam je iskorišćen za formiranje originalnog softvera pomoću koga je sprovedena predikcija radne karakteristike snaga-brzina veta na primeru projektovane vetroturbine snage 10 kW. Imajući u vidu mogućnosti razvijenog programskog paketa, došlo se do zaključka da numerička simulacija radnih karakteristika, u fazi projektovanja radnog kola vetroturbine, doprinosi kvalitetnijem prilagodavanju postrojenja konkretnoj lokaciji na koju će biti postavljeno.

MATEMATIČKI MODEL

Uvidom u tehnno-ekonomsku analizu isplativosti korišćenja energije veta [12], može se doći do zaključka da nivo profitabilnosti investicije izgradnje postrojenja na vетar zavisi od mnogo faktora, ali svakako najznačajnija je činjenica koliko se sa pri postojećim uslovima, iz energije veta može dobiti električne energije. Takođe, treba imati u vidu da se u fazi projektovanja ili optimizacije radnog kola vetroturbine sa usvojenim profilom lopatice, dolazi do značajnih varijacija u radnim karakteristikama ukoliko se variraju parametri kao što su promena prečnika vetroturbine, promena broja ili ugla zakretanja lopatica, itd.. Sve to ukazuje na neophodnost postojanja alata kojim bi se brzo i jednostavno proračunavale karakteristike vetroturbine na osnovu poznatih dimenzija. Teorijska osnove za formiranje matematičkog modela za simulaciju radnih karakteristika malih vetroturbina se uglavom baziraju na jednodimenzijском pristupu [11]. U tekstu koji sledi prikazana je algoritamski procedura koja je poslužila za izradu odgovarajućeg softvera. Podaci koji je potrebno poznavati, a koji su vezani za geometrijske karakteristike radnog kola, su sledeći:

- $R, [\text{m}]$ – poluprečnik radnog kola
- $c(r_i), [\text{m}]$ – raspodela dužine teteve profila lopatice, ($i = 1, \dots, n$)
- $\theta(r_i), [^\circ]$ – raspodela ugla postavljanja profila, ($i = 1, \dots, n$)
- $v_0, [\text{m/s}]$ – brzina veta
- $\Omega, [\text{s}^{-1}]$ – ugaona brzina radnog kola
- C_L, C_D – koeficijent otpora i koeficijent uzgona za dati profil
- N – broj lopatica

Na osnovu poznatih podataka preračunavaju se sledeći parametri:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v_0} - \text{brzohodost radnog kola}, \quad \mu = \frac{r}{R} - \text{relativni poluprečnik radnog kola},$$

$$\sigma(r) = \frac{N \cdot c(r)}{2 \cdot R \cdot \pi \cdot \mu} - \text{gustina radnog kola}.$$

U iterativnoj proceduri koja je detaljno predstavljena u tekstu koji sledi, lopatica se deli na N delova i proračun se odvija za zadati element lopatice na radijusu r_i (ili μ_i), za zadatu brzinu veta, ugaonu brzinu ili brzohodnost λ .

Pseudoalgoritam proračuna radne karakteristike vetroturbine.

1. Pretpostaviti aksijalni i ugaoni indukcioni faktor : $a = 0, a' = 0$
2. Odrediti ugao relativne struje φ_i za svaki poprečni presek:

$$\varphi_i = \operatorname{atg} \frac{(1-a) \cdot v_0}{(1+a') \cdot \Omega \cdot r_i} = \operatorname{atg} \left(\frac{1-a}{1+a'} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \mu} \right)$$

3. Izračunati vrednost napadnog ugla α_i na osnovu vrednosti ugla relativne struje i ugla postavljanja profila po poprečnom preseku : $\alpha_i = \varphi_i - \theta(r_i)$
4. Definisanje koeficijenata normalnog C_N i tangencijalnog C_T opterećenja:

$$C_N = C_L(\alpha_i) \cdot \cos \varphi_i + C_D(\alpha_i) \cdot \sin \varphi_i, \quad C_T = C_L(\alpha_i) \sin \varphi_i - C_D(\alpha_i) \cos \varphi_i$$

6. Definisanje korekcije za indukacione faktore:

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}), \quad \text{gde je: } f = \frac{N}{2} \cdot \frac{R-2}{r_i \cdot \sin \varphi_i}$$

7. Izračunavanje aksijalnog i ugaonog indukcionog faktora:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \varphi_i}{\sigma(r_i) \cdot C_N} + 1}, \quad a' = \frac{1}{\frac{4F \sin(2\varphi_i)}{\sigma(r_i) \cdot C_T} - 1}$$

8. Korigovanje aksijalnog indukcionog faktora (za $a > 0.2$):

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{[K(1 - 2a_c) + 2]^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right], \quad K = \frac{4F \sin^2 \varphi_i}{\sigma(r_i) \cdot C_N}$$

Ukoliko postoji značajno odstupanje izračunatog i pretpostavljenog indukcionog faktora razlikuju procedura se ponavlja od koraka 2.

9. Definisanje sila uzgona i otpora po jedinici dužine:

$$L(r) = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{rel}^2 \cdot c(r) \cdot C_L(\alpha), \quad D(r) = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{rel}^2 \cdot c(r) \cdot C_D(\alpha), \quad \text{gde je } V_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \varphi}.$$

10. Izračunavanje normalne i tangencijalna sila po jedinici dužine za $i = 1 \dots N$:

$$F_{N_i}(r) = L(r) \cos \varphi + D(r) \sin \varphi, \quad F_{T_i}(r) = L(r) \sin \varphi - D(r) \cos \varphi$$

$$\text{odnosno, } F_{T_i} = F_T(r_i) \cdot \frac{r_{i+1} - r_{i-1}}{2}.$$

11. Ukupna obimska sila na lopatici: $F_T = \sum_{i=1}^N F_{T_i}$

12. Moment opterećenja na segmentu lopatice: $M_i = r_i \cdot F_{T_i}$

13. Uukupni moment opterećenja na lopatici vetroturbine za $i = 1 \dots N$:

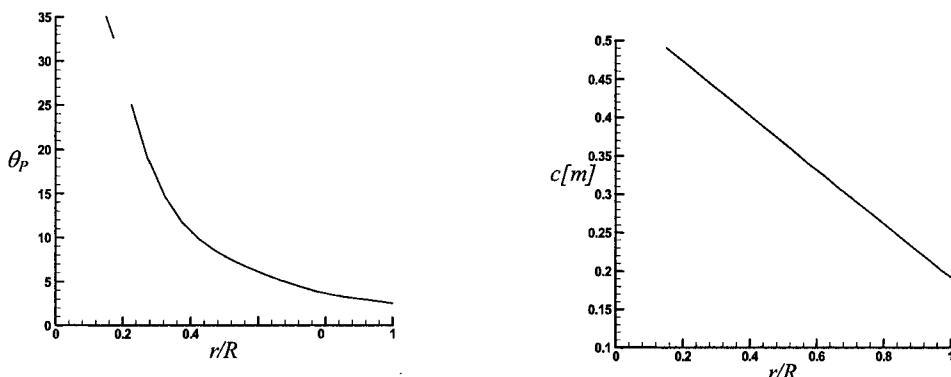
$$M = B \cdot \sum_{i=1}^N M_i = B \cdot \sum r_i \cdot F_{T_i}$$

14. Ukupna snaga na lopatici: $P = M \cdot \omega$

15. Ukupna snaga vetroturbine u funkciji broja lopatica: $P_{uk} = N \cdot P$

PRIMENA NUMERIČKOG ALGORITMA

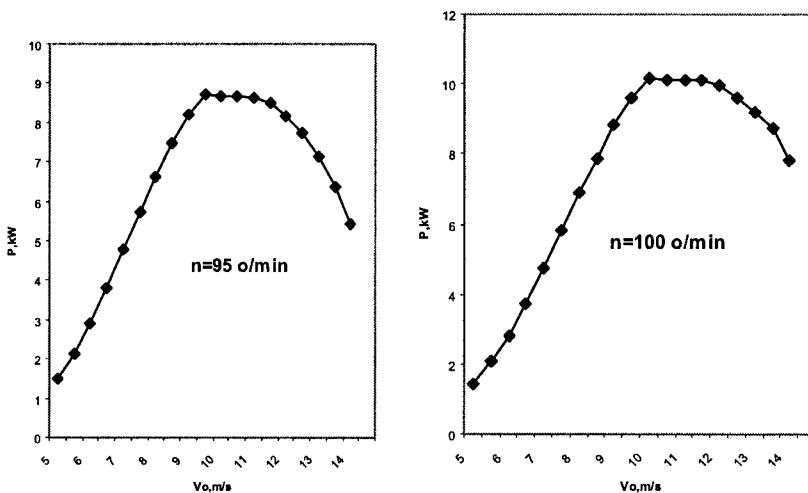
Na osnovu prethodno definisanog matematičkog modela, formiran je softver za simulaciju radnih karakteristika vetroturbine. Ovaj softver je primjenjen za proračun vetroturbine prečnika 8 m. Kao projektni parametri usvojeno je da radnog kola ima tri lopatice, ugao zakretanja od 5° i konstantan broj obrtaja (95 o/min i 100 o/min). Na slici 1 prikazana je raspodela ugla postavljanja izabranog profila S809, kao i raspodela dužine profila lopatice u funkciji radijalnog položaja [12].



Slika 1. Raspodela a) ugla postavljanja profila; b) dužine teteve profila

Figure 1. Distribution of a) pitch angle; b) chord lenght

Na slici 2, prikazane su raspodele snage vetroturbine pri konstantnom broju obrtaja. Sa slike se vidi da za 100 o/min, vetroturbina razvija maksimalnu snagu od 10 kW pri brzini veta od 10 m/s. Takođe, bitno je primetiti jaku nelinearnost raspodele snage i potrebu pažljivog prilagođavanja geometrije radnog kola konkretnoj lokaciji. Prethodnu tvrdnju ćemo obrazložiti i pokazati kolika je praktična primena radnih karakteristika vetroturbine na primeru dve konkretnе lokacije za koje smo imali detaljne podatke o vetu. Naime, Hidrometeorološki zavod je izvršio specijalnu obradu anemografskih podataka o vetu [9], izmerenih na meteorološkim stanicama Surčin i Vršac, kao dve potencijalno vrlo povoljnije lokacije za postavljanje vetroturbine. U tabeli 1 prikazani su podaci o pojedinačnim brzinama veta, odgovarajuće snage vetroturbine dobijene razvijenim softverom, trajanje u satima date brzine veta kao i proračunatu godišnju proizvodnju električne energije na obe lokacije.



Slika 2. Snaga vetroturbinе pri konstantnom broju obrtaja
Figure 2. Wind turbine power for constant angle velocity

Iz tabele 1 može se zapaziti jedan veoma bitan podatak, imajući u vidu da je dobijena godišnja prosečna brzina veta merena na visini 50m od tla, na lokaciji Srčina je 5,1 m/s, a za lokaciju Vršac je 6,3 m/s [9]. I pored te činjenice, ukupna godišnja proizvedena energija ukazuje da je, za konkretnu geometriju radnog kola, raspodela brzina vetrova povoljnija u Surčinu, nego u Vršcu. Treba zapaziti da se vetroturbina pokreće pri brzinama većim od 5 m/s, a iz bezbednosnih razloga isključuje se iz pogona pri brzinama većim od 15 m/s. Dakle, na ovaj način se pokazuje da i pored manje prosečne godišnje brzine veta, moguća proizvodnja električne energije je veća u Surčinu nego u Vršcu. Daljom analizom se može pokazati da ova činjenica vrlo značajno utiče na tok novca (cash flow) u procesu eksploatacije vetroturbina na ovim lokacijama. Takođe, na ovaj način se ukazuje i na neophodnost poznavanja godišnje učestalosti i vremena trajanja pojedinačnih brzina vetrova za vađanju tehnološku analizu.

Tabela 1. Godišnja proizvodnja električne energije na lokacijama Surčina i Vršca

Table 1. Annual production of electricity at location of Sursin and Vrsac

PROIZVODNJA ENERGIJE NA GODIŠnjEM NIVOU							
SURČIN				VRŠAC			
- prosečna godišnja brzina veta 5.1 m/s -				- prosečna godišnja brzina veta 6.3 m/s -			
V_{50} (m/s)	P(W)	t(h)	E(kWh)	V_{50} (m/s)	P(W)	t(h)	E(kWh)
5.7	2643.118793	1174	3103.021463	5.7	2643.118793	871	2302.156469
7.1	5480.433818	738	4044.560158	7.1	5480.433818	474	2597.72563
8.6	8818.015141	479	4223.829253	8.6	8818.015141	423	3730.020405
10	10134.07773	300	3040.223319	10	10134.07773	257	2604.457977
11.4	9880.412489	228	2252.734047	11.4	9880.412489	260	2568.907247
12.8	8125.142306	123	999.3925036	12.8	8125.142306	154	1251.271915
14.3	4016.082256	84	337.3509095	14.3	4016.082256	189	759.0395464
	Σ	3126	18001.11165		Σ	2628	15813.57919

ZAKLJUČAK

U radu je prikazan razvijeni numerički algoritam za simulaciju radnih karakteristika radnog kola horizontalne-osne vetroturbine. Korišćenjem elemenata teorije količine kretanja i tzv. BEM metode, formiran je relativno jednostavan ali i efikasan alat. Razvijeni algoritam je iskorišćen za proračun radnih karakteristika vetroturbine snage 10 kW. Koristeći rezultate proračuna, analizan je uticaj raspodele brzine veta na moguću količinu proizvedene električne energije. Na osnovu rezultata do kojih se došlo može se zaključiti:

- ◆ da isplativost inveticije u najvećoj meri zavisi od izabranog lokaliteta,
- ◆ za pouzdanu analizu neophodno je imati precizne podatke o srednjim časovnim brzinama dobijenih na osnovu satnih merenja pravca i brzine veta,
- ◆ neophodnost posedovanja računarskih programa za simulaciju ponašanja postrojenja na vetar u na različitim lokalitetima, jer u različitim realnim uslovima eksplotacije, pomoću njih možemo dobiti veći broj potencijalnih prihvatljivih rešenja.

Ekonomskim razvojem naše zemlje doći će i do poboljšanja uslova proizvodnje električne energije iz energije veta. Smanjiće se kamatne stope bankarskih kredita, a i pojaviće se interes države da finansijski pomogne proizvodnju ekološki čiste obnovljive energije. Sve ovo ukazuje na veliku perspektivu razvoja prizvodnje električne energije iz energije veta u Republici Srbiji.

LITERATURA

- [1] Mikić D., Radičević B., Aktuelno stanje vetroenergetike u Evropi početkom 2006. i budući trendovi, Energija, str. 192-198, Broj 1-2, Gđina V, Mart 2006
- [2] European record for wind power: Over 6.000 Mw installed in 2005., News Release, EWEA, www.ewea.org, 1st February 2006
- [3] Record year for wind energy: Global wind power market increased by 43% in 2005, Press Release, GWEC, www.gwec.org, 17th February 2006
- [4] Wind Energy Barometer 2006, [Directorate-General for Energy and Transport](http://www.ec.europa.eu/energy_transport/stat_baro171.asp), EurObserv'ER, http://www.ec.europa.eu/energy_transport/stat_baro171.asp, February 2006
- [5] EC(1997) Energy for the future: Renewable sources of energy, White Paper for Community Strategy and Action Plan, COM(1997) 599 final (26/11/1997)
- [6] EC(2001a) Directive 2001/77/EC of the Parlament and of the Council of 27 September 2001 om the promotion of electricity produced from energy sources in the internal electricity market
- [7] Gburčik P., i sar., Studija energetskog potencijala Srbije za korišćenje sunčevog zračenja i energije veta, Centar za multidisciplinarnie studije, Univerzitet u Beogradu, 2004
- [8] Putnik R., i sar., Mogućnost korišćenja energije veta za proizvodnju električne energije, Studija, Elektroprivreda Srbije, Beograd, 2002
- [9] Ocena mogućnosti korišćenja energije veta na teritoriji Republike Srbije, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 1997
- [10] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Ltd, 2002
- [11] Jovičić N., Nekonvencionalne energotehnologije – Energija veta, Skripta, WUS Austria - Project No. 7949-00/02 CDP-031/2003, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, 2004
- [12] Jovičić N., Gordić D., Babić M., Darijević K., Prototipsko rešenje male aerocentrale snage 10 kW, Tractors and Power Machines, Vol.9, No.3, p.94-100, Novi Sad, Dec., 2004