

# Poređenje merenja brzine vetra anemometrom sa šoljicama i ultrasoničnim anemometrom na vetroturbini

Robert Fajhner, Marjan Urekar, *Member*, IEEE

**Apstrakt** – Ovaj rad se bavi poređenjem performansi anemometra sa šoljicama i ultrasoničnog anemometra, instrumenata za merenje brzine vetra na jednoj od vetroturbina u vetroparku Alibunar. Podaci korišteni u analizi pribavljeni su putem SCADA sistema vetroparka Alibunar.

**Ključne reči:** vetar; brzina vetra; anemometar; vetroturbina

## I UVOD

U današnje vreme, potreba za merenjem brzine vetra je prisutna u mnogim sferama privrede. Prvenstveno za potrebe meteorologije, u cilju praćenja vremenskih prilika i ocene zagađenosti vazduha, zatim za sisteme reagovanja u vanrednim situacijama, avionski saobraćaj kao i energetiku. U vetroenergetici, podaci o izmerenoj vrednosti brzine vetra koriste se za planiranje budućih projekata vetroparkova ali i za upravljanje radom postojećih vetroturbina.



Sl. 1. Blok dijagram mernog sistema vetroturbine

Anemometar je uređaj koji se koristi za merenje brzine vetra. Naziv potiče od 'anemos', što je starogrčka reč za 'vetar'. Iako je reč izvedena iz starogrčkog, nismo bili u mogućnosti izmeriti brzinu vetra sve do 1450. godine kada je Leon Battista Alberti izumeo prvi mehanički anemometar – sa klatnom, koji se sastojao od ravnog diska koji se slobodno okreće oko horizontalne ose u svojoj ravni i iznad svog centra gravitacije, ceo sklop je bio usmeren u pravcu vetra pomoću vetrokazna (kasnije je ovaj izum pripisan Robert Hook-u 1667.godine). Poznatiji anemometar je anemometar sa šoljicama, koji je 1846. izumeo irski astronom Thomas Romney Robinson. Vetar je uzrokovao da se šoljice-lopaticice rotiraju vodoravno, što je pomeralo niz točkica-zupčanika koji bi pokazivali brzinu vetra. Originalni anemometar koji je on postavio na opservatoriji (sa 4 lopaticice), gde je radio

Robert Fajhner – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: [rfajhner@gmail.com](mailto:rfajhner@gmail.com)).

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: [urekarm@uns.ac.rs](mailto:urekarm@uns.ac.rs)).

eksperimente, još uvek stoji na tom mestu. Njegov dizajn se i danas koristi, naravno uz moderne materijale i drugačije načine prenosa informacije o samoj brzini vetra. Najnovija tehnologija anemometra je ultrasonični anemometar, koji je izumljen 1994. godine. Ova tehnologija se i dalje razvija, i kao rešenje za merenje brzine vetra je najzastupljenija u svetu (pored informacije o brzini vetra, ultrasonični anemometar može još da daje informacije o pravcu vetra, temperaturi).

Kroz ovaj rad, porediće se izmerene vrednosti vetra mehaničkog anemometra (sa šoljicama) i ultrasoničnog anemometra, koji se koriste u mernom sistemu vetroturbina, u vetroparku Alibunar, u različitim temperaturnim uslovima, pri različitim izmerenim brzinama vetra.

## II KARAKTERISTIKE MERNIH UREĐAJA

Mehanički anemometar je proizvod kompanije Thies, model 4.3519.00. sa 3 lopaticice [1], i služi za merenje



Sl. 2. Anemometar sa šoljicama Thies 4.3519.00. [9]

horizontalne brzine vetra. Uređaj je napravljen od materijala otpornih na koroziju. Kućište je napravljeno od eloksiranog aluminijuma i nerđajućeg čelika, dok su lopaticice izrađene od ojačanog fiberglasa. Na izlazu iz anemometra je signal u opsegu 2–630 Hz (optoelektrični princip merenja brzine vetra) koji se pretvara putem integrisanog mernog pretvarača u analogni signal oblika 4-20 mA. Optoelektrični princip zasniva se na slanju LED svetla kroz kodni prsten prema foto prijemniku, na osnovu kojeg se formiraju električni impulsi. Merni opseg je od 0,5 m/s do 50 m/s, sa rezolucijom od 0,1

m/s. Tačnost uređaja je definisana na intervalu: za vrednosti vetra 0,5 – 17 m/s, tačnost je +/- 0,5 m/s; za vrednosti 17-50 m/s, tačnost je +/-3% od merene vrednosti.

Ultrasonični anemometar je proizvela, takođe, kompanije Thies, model 2D 4.382x. sa dva para, naspramnih ultrazvučnih pretvarača, na rastojanju od 200 mm [2]. Izlazni signal može biti digitalni i/ili analogni. Anemometar pouzdano radi pri temperaturama od -50°C do +70°C. Merni opseg brzine vetra je 0,01 – 75 m/s (prag detekcije je 0,01 m/s). Što se tiče tačnosti merenja brzine vetra, za brzine do 5 m/s, tačnost je +/- 0,1 m/s, dok za brzine vetra preko 5 m/s, tačnost je +/- 2 % od merene vrednosti [3]. Zbog svoje konstrukcije (otporni materijali, nema pokretnih delova) redovna kalibracija usled starenja nije potrebna.



Sl. 3. Ultrasonični anemometar Thies 2D [2]

Greške u merenju se javljaju usled mehaničkih deformacija nosača pretvarača, odnosno promene dužine mernog puta između ultrasoničnih pretvarača. Uticaji pravca strujanja vazduha i turbulencije su kompenzovani u procesu računanja.

### III ODREĐIVANJE VREDNOSTI BRZINE VETRA

Merene vrednosti brzine vetra se šalju u digitalnom obliku upravljačkom sistemu vetroturbine. Operacije izračunavanja brzine vetra se izvršavaju u elektronskom sklopu dnevnika izmerenih vrednosti (data logger).

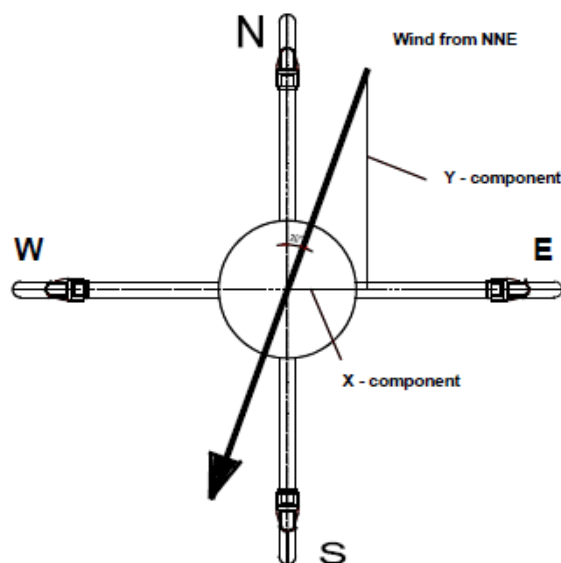
Kod anemometra sa šoljicama, preko data logger-a, dobijene vrednosti se uzorkuju (u kratkom vremenskom intervalu 10 ms) i tako dobijene vrednosti se dalje koriste u proračunima brzine vetra, u upravljačkom sistemu. Ove vrednosti se usrednjavaju na intervalima 50 ms, 100 ms, 500 ms, 1s, 10s, 30s i 600s, u pokretnom smislu i kao promenljive

koriste u drugim operacijama kontrolnog sistema. Proračuni u pokretnom smislu se izvršavaju tako da se 'najstarija' merena vrednost zameni najskorijom merenom vrednošću, i ponovo izračuna srednja vrednost. Prilikom produkcije električne energije, u proračunima vrednosti brzine vetra mora da se uključi uticaj turbulencije rotirajućih elisa i vibracija gondole koji utiču na izmerene brzine vetra. Kroz te faktore se linerazuje jednačina po kojoj se vrednost brzine vetra računa i povećava preciznost mernog uređaja:

$$v_v = A f_s + B \quad (1)$$

Merena brzina vetra je  $v_v$  u [m/s],  $f_s$  je frekvencija generisanog signala na izlazu anemometra [Hz], a  $A$  i  $B$  koeficijenti dobijeni prilikom kalibracije samog anemometra [4]. Linearna zavisnost izmerene brzine kod anemometra sa lopaticma je i dokazana u laboratorijskim ispitivanjima [5]. Prilikom kalibracije navedenog tipa anemometra sa lopaticama izračunata je merna nesigurnost uređaja  $\sigma=2,04\%$  [6].

Kod ultrasoničnog anemometra, proces merenja vrednosti vetra i njeno usrednjavanje je drugačije. Dve putanje na kojima se vrši merenje su međusobno upravne. Pretvarači rade i kao predajnici i kao prijemnici. Elektronski kontrolni sistem anemometra bira pravac i smer merenja, i u jednoj sekvenci merenja (2,5ms pri temperaturi 20°C) izvrše se 4 individualna merenja u sva četiri smera (S-N,W-E,N-S,E-W) mernih putanja. Brzina zvuka značajno zavisi od temperature vazduha, međutim pošto se merenje brzine prostiranja zvuka obavlja duž oba pravca merenja, i u oba smera, time se isključuje uticaj temperature na merenje.



Sl. 4. Princip merenja ultrasoničnog 2D anemometra [3]

Merene vrednosti brzine prostiranja daju dve komponente vektora brzine vetra (X i Y), koje DSP anemometra pretvara u polarne koordinate, na osnovu kojih se u potpunosti rekonsruirše vektor brzine vetra. Usrednjavanje merenih vrednosti se odvija svakih 20ms, u pokretnom smislu kao i kod mehaničkog anemometra. Ove srednje vrednosti se ponovo preračunavaju na intervalima 100ms, 500ms, 1s, 10s, 30s i 600s. Pojedinačna horizontalna komponenta brzine vetra  $u$  [m/s] može se aritmetički izračunati kao:

$$u = \frac{c^2}{2f_z d} \quad (2)$$

gde je  $c$  – brzina prostiranja zvučnog talasa koji se šalje između ultrasoničnih pretvarača;  $f_z$  – frekvencija tog zvučnog talasa; a  $d$  – rastojanje između pretvarača. Izračunata vrednost brzine vetra  $v_v$  [m/s] je :

$$v_v = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (3)$$

gde su  $u_x$  i  $u_y$  komponente vektora brzine vetra. Prilikom testiranja navedenog tipa 2D ultrasoničnog anemometra izračunata je merna nesigurnost uređaja  $\sigma=2\%$  [7].

#### IV POREĐENJE RADA MERNIH UREĐAJA

U svrhu analize rada mernih uređaja, upotrebljeni su podaci iz memorije jedne od vetroturbina iz vetroparka Alibunar, pri čemu se vodilo računa da se uzmu u obzir različiti vremenski uslovi (brzina vetra i spoljna temperatura). Podaci u dalje navedenim tabelama predstavljaju izmerene i usrednjene desetominutne vrednosti brzine vetra, u toku jednog dana (vremena su birana nasumično). Zbog značajno boljih karakteristika i nedostatka referentnog mernog instrumenta na koji ne bi uticali postojeći spoljni faktori, merenja ultrasoničnog anemometra će se smatrati referentnim. Veličine koje se navode u tabelama su:  $v_1$  – brzina izmerena anemometrom sa lopaticama;  $v_2$  – brzina izmerena ultrasoničnim anemometrom;  $\Delta v$  – razlika između izmerenih brzina i % - relativna greška u odnosu na referentnu vrednost.

U Tabeli I, prikazani su podaci iz 10. januara 2021. Na prvi pogled, lako se uočavaju drastične razlike između merenja mehaničkog i ultrasoničnog anemometra. Promene spoljne temperature su relativno male (manje od 1°C), dok razlike u merenim brzinama variraju od 2,32 m/s do 3,71 m/s (što daje grešku preko 40% u odnosu na referentnu vrednost). Uzrok greške je relativno niska spoljna temperatura (nekoliko dana je bila temperatura konstantno ispod 0°C), što je skoro dovelo do smrzavanja mehaničkog anemometra. Za ova

merenja, mehanički anemometar ne ispunjava navedene tačnosti od strane proizvođača.

U Tabeli II, prikazani su izmerene vrednosti vetra od 25.01.2022. Opseg promene spoljne temperature se malo povećao, ali je i dalje na ivici temperature mogućeg smrzavanja anemometra sa lopaticama. Iz izmerenih vrednosti brzine vetra se vidi da se greška mehaničkog anemometra smanjila (sad je do 16% merene vrednosti) ali se nalazi u granicama koje navodi proizvođač.

TABELA I MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD -2,8°C DO -3,5°C

VREME	$v_1$ [m/s]	$v_2$ [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	%
20:10	3,720	6,769	3,049	39,25
17:40	3,859	6,960	3,101	44,54
14:30	2,960	5,280	2,320	43,94
11:30	3,950	7,110	3,160	44,44
09:40	3,670	6,420	2,750	42,83
08:00	4,349	8,029	3,680	45,83
06:30	4,590	7,989	3,399	42,54
04:20	5,170	8,869	3,699	41,71

TABELA II MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD -3,3°C DO 1,6°C

VREME	$v_1$ [m/s]	$v_2$ [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	%
22:10	3,259	3,660	0,401	10,95
20:20	3,130	3,519	0,389	11,05
18:10	1,559	1,860	0,301	16,18
15:50	2,359	2,779	0,420	15,11
12:10	2,920	3,309	0,389	11,76
09:30	2,960	3,329	0,369	11,08
06:50	5,448	5,931	0,483	8,14
04:00	4,260	4,710	0,450	9,55

U Tabeli III (vrednosti merene 19.02.2022.) prikazani su uslovi temperature iznad nule odnosno ukupni porast spoljne temperature od 5,6°C u toku dana, pri vetrovima do 5 m/s. Vrednost relativne greške mehaničkog anemometra se i dalje smanjuje (ispod 10%).

TABELA III MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 4,2°C DO 9,8°C

VREME	$v_1$ [m/s]	$v_2$ [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	%
22:00	2,589	2,849	0,260	9,12
20:10	2,599	2,880	0,281	9,76
18:00	4,428	4,659	0,231	4,96
15:50	1,848	1,960	0,112	5,71
13:20	1,210	1,230	0,020	1,63
10:00	0,989	1,041	0,052	4,99
07:00	1,191	1,230	0,039	3,17
03:40	0	0,280	0,280	100

Zanimljivo je primetiti podatak kada mehanički anemometar ne detektuje vetar (brzina 0,28 m/s), što se u potpunosti slaže sa specifikacijom instrumenta.

Tabela IV prikazuje vrednosti izmerene brzine vetra za slučaj iste promene spoljne temperature (od 5,6°C), pri nešto višoj spoljnoj temperaturi u odnosu na Tabelu III. Podaci su od 13.03.2022. U ovom slučaju, izmerene brzine vetra su mnogo veće (preko 5 m/s), i može se zaključiti da se relativna greška merenja mehaničkog anemometra još više smanjila (manje od 2%) u odnosu na referentnu vrednost.

TABELA IV MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 9,5°C DO 15,1°C

VREME	$v_1$ [m/s]	$v_2$ [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	%
22:40	10,729	10,699	0,030	0,28
20:20	7,597	7,689	0,092	1,19
18:30	10,792	10,890	0,098	0,90
16:00	10,010	10,069	0,059	0,58
14:10	8,810	8,890	0,080	0,90
12:00	8,100	8,100	0,000	0
09:20	5,309	5,400	0,091	1,68
06:10	11,147	11,189	0,042	0,37

U Tabeli V i Tabeli VI prikazane su brzine vetrova izmerene pri spoljnim temperaturama preko 20 °C (Tabela V sadrži podatke od 01.08.2020. a Tabela VI od 03.07.2020.).

TABELA V MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 26,1°C DO 34,7°C

VREME	$v_1$ [m/s]	$v_2$ [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	%
22:50	8,039	8,060	0,021	0,26
20:50	9,707	9,710	0,003	0,03
18:40	5,059	5,059	0	0
16:20	9,010	9,020	0,010	0,11
13:30	7,789	7,771	0,018	0,23
11:20	7,420	7,409	0,011	0,15
08:00	10,102	10,149	0,047	0,46
05:30	9,770	9,770	0	0

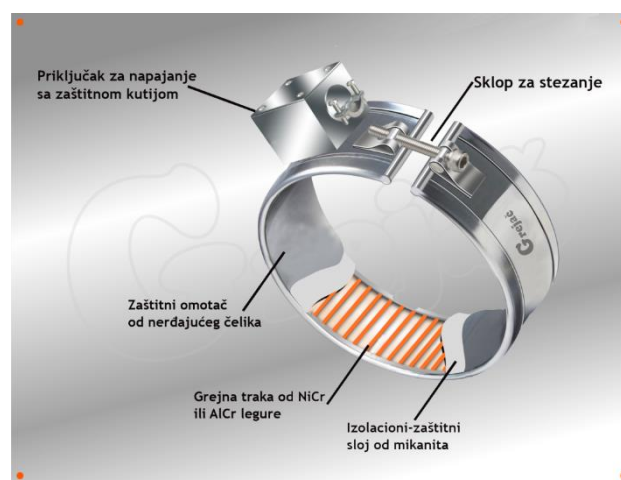
TABELA VI MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 23,4°C DO 31,1°C

VREME	$v_1$ [m/s]	$v_2$ [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	%
23:20	3,970	4,028	0,058	1,43
21:50	2,700	2,710	0,010	0,37
19:10	3,970	4	0,030	0,75
16:20	2,799	2,838	0,038	1,33
13:00	2,430	2,460	0,030	1,21
10:20	1,379	1,379	0	0
06:00	4,559	4,610	0,051	1,10
02:20	7,050	7,130	0,080	1,12

U ovim tabelama obuhvaćene su vrednosti brzine vetra do 5 m/s i preko 5 m/s. Kao što se iz priloženog vidi, merene vrednosti mehaničkog anemometra se često podudaraju sa merenim vrednostima ultrasoničnog anemometra ili odstupaju manje od 1,5% merene vrednosti brzine vetra.

## V ZAKLJUČAK

Kroz analizu prikupljenih podataka o izmerenim brzinama vetra, uočio sam da mehanički anemometar ne ispunjava karakteristike date od strane proizvođača u slučajevima konstantne temperature ispod 0°C (skoro zamrzavanje anemometra). Velike razlike u merenjima predstavljenih uređaja daje indikaciju kontrolnom sistemu vetroturbinе o



Sl. 4. Pojasni grejač [10]

mogućnosti stvaranja leda na elisama vetroturbinе, koje može

biti veoma opasno po okolinu. Ova pojava inicira aktivaciju drugih pod sistema vetroturbinа kao što je zagrevanje elisa vetroturbinе u cilju prevencije formiranja leda na njima. Takođe, potrebno je izvršiti neke modifikacije u sistemu merenja anemometra sa šoljicama, u cilju pružanja tačnijih izmerenih vrednosti brzine vetra.

Jedan od načina bio mogao biti tretiranje mehaničkih delova anemometra premazom ili sprejem protiv zamrzavanja, da se led ne bi hvatao za njih. Drugi način bi mogao biti dodavanje pojasnih grejača oko samog anemometra, koji bi mogao sprečiti smrzavanje osovine i ležajeva.

Sa druge strane, promenom metode za obradu signala koji generiše anemometar sa šoljicama mogla bi se smanjiti merna nesigurnost instrumenta. Umesto klasične metode uzorkovanja koja se koristi u današnjim mernim instrumentima, primenom stohastičke digitalne merne metode ovo bi bilo izvodljivo [8].

## ZAHVALNICA

Zahvaljujem se kompaniji Siemens Gamesa Renewable Energy na pruženoj podršci u stvaranju i razrađivanju ideje za ovaj rad. Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156: 'Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a'.

## LITERATURA

- [1] Opis uređaja ;<https://www.thiesclima.com/pdf/en/Products/Wind-Compact?art=300>
- [2] Opis uređaja <https://www.thiesclima.com/pdf/en/Products/Wind-Ultrasonic-Anemometer?art=145>
- [3] Uputstvo [Instruction for use Ultrasonic anemometer Thies 2D](#)
- [4] S. Pindado, J. Cubas, F. Sorribes-Palmer "TheCupAnemometer,a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute", Madrid, Španija, 12. Novembar 2014.
- [5] S. Pindado, E. Vega, A. Martínez, E. Meseguer, S. Franchini, I. Pérez " Analysis of calibration results from cup and propeller anemometers. Influence on wind turbine Annual Energy Production (AEP) calculations" Wind Energy, januar 2011.

- [6] 40C Anemometer Uncertainty AppNote, 6. Februar 2015.
- [7] T. Lipecki, P. Jaminska-Gadomska, A. Sumore " Influence of Ultrasonic Wind Sensor Position on Measurement Accuracy under Full-Scale Conditions", Lublin, Poljska, 02. Oktobar 2020.
- [8] B. Ličina "Metoda merenja snage i energije vetra zasnovana na merenju na intervalu", doktorska disertacija, Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 12. Jun 2016.
- [9] Slika preuzeta iz kataloga proizvoda kompanije Thies " THIES-catalog-wind-e-9-2014"
- [10] Slika preuzeta sa <https://grejac.com/grejac/pojasni-grejac>

## ABSTRACT

This paper compares the performance of a mechanical anemometer with cups and an ultrasonic anemometer, instruments for measuring wind speed on one of the wind turbines in the Alibunar windfarm. The data used in the analysis were obtained through the SCADA system of the Alibunar windfarm.

### **Comparison wind speed measurements with cup anemometer and ultrasonic anemometer on the wind turbine**

Robert Fajhner, Marjan Urekar, *Member*, IEEE