

## MERAČ BRZINE VETRA

Slobodan Škundrić, Srboљub Vukovojac, Nidžo Miladinović, Srđan Milosavljević  
*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"; Beograd*

**Sadržaj:** U radu je prikazano jedno originalno rešenje uređaja za merenje brzine vetra. Osobnost ovog uređaja je u tome, što se merenje brzine vetra bazira na merenju komponentata mehaničke sile pomoću selektivnih mernih pretvarača sile, na bazi tenzometarskih traka. Osnovne prednosti ovakvog rešenja ogledaju se u činjenici da uređaj nema kinematskih sklopova, a omogućava potpuno merenje vektora brzine vetra u ravni, tj. modula, pravca i smeru.

**Ključne reči:** Merač brzine vetra, merni pretvarači sile, tenzometarske trake.

### 1. UVOD

Rad elektroenergetskih postrojenja na otvorenom prostoru izložen je često nepovoljnim atmosferskim uticajima: kiši, snegu, ledu, vetru. Udari vetra promenljivog intenziteta, pravca i smeru mogu biti uzrok prekida rada nekih postrojenja, a u nekim slučajevima i težih oštećenja i havarija u postrojenju. To se posebno odnosi na rad bagera, odlagača i kopača na površinskim kopovima rudnika i termoelektrana. Ove mašine po pravilu moraju biti snabdevene meračima brzine vetra. Rad ovih mašina dozvoljen je u uslovima kada intenzitet brzine vetra ne prelazi vrednost od 15 m/s. Uređaji za merenje brzine vetra treba da signališu takva stanja, a da kod brzina vetra preko 20 m/s automatski onemoguće dalji rad ovih mašina.

Vetar, kao manifestaciju kretanja vazдушnih masa karakteriše intenzitet brzine, pravac i smer. Merenje brzine kretanja gasova može se ostvariti na zaista mnogo načina. Navešće se samo neki od mernih principa koji se u praksi našli širu primenu:

- Merenje brzine kretanja vazduha pomoću Pitoove cevi zasniva se na merenju razlike pritisaka nastalih kao posledica kretanja vazduha (Bernulijev zakon kretanja fluida).
- Turbinski merači brzine vazduha pretvaraju pravolinijsko kretanje vazduha u kružno okretanje turbine povezujući intenzitet brzine vetra sa kružnom brzinom rotora turbine, odnosno brojem okretaja u jedinici vremena.
- Rad aneometarskih merača brzine kretanja vazduha bazira se na fizičkim procesima koji električno zagrevanje otpornog vlakna aneometra, njegovu temperaturu i vrednost otpora povezuju sa brzinom kretanja vazduha i hlađenja aneometra, odnosno odvođenja inicirane toplotne energije strujanjem vazduha.

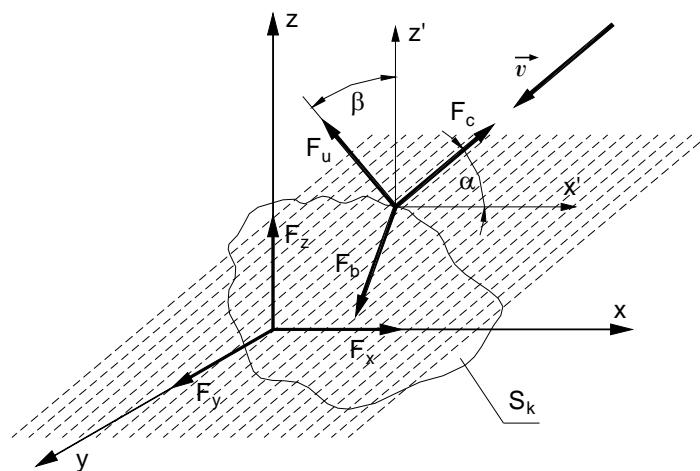
Svaki od navedenih mernih principa ima određene prednosti, ali i evidentna ograničenja i nedostatke. Tako su merila sa Pitoovim cevima pogodna za merenje velikih brzina vazduha, dok se pri manjim brzinama dobijaju i vrlo male razlike pritisaka koje nije lako tačno meriti. Kod turbinskih merača, brzina vetra se svodi na merenje broja okretaja što je zaista pogodno, ali kao i sva kinematska merila imaju probleme vezane za promenljivo

mehaničko trenje u ležištima rotora tokom eksploatacije, posebno u teškim ambijentnim uslovima. Aneometarski merači imaju mogućnost merenja ne samo modula brzine, već i pravca i smera, ali su dosta osetljivi na mehaničke vibracije, udare, kao i nečistoće u vazduhu.

Savremena rešenja merenja brzine vetra koriste prednosti koje pružaju elektronske i informatičke tehnologije, posebno u pogledu obrade i prenosa merne informacije. U ovom radu prikazano je jedno takvo rešenje merenja brzine vetra, bazirano na merenju vektora mehaničke sile pomoću mernih pretvarača sa tenzometarskim trakama .

## 2. PRINCIP RADA

Poznato da se snaga vetra manifestuje u vidu mehaničkih sila i momenata koji se generišu na određenoj fizičkoj prepreci postavljenoj u struji vetra. Ove sile i momenti su uzroci mogućih havarija građevinskih konstrukcija i mašina, pa je zbog toga i potrebno merenje brzine vetra. Između brzine strujanja vetra  $V$  i generisane mehaničke sile  $F$  i momenata  $M$ , koji se javljaju na prepreci karakteristične površine  $S_k$  (slika 1), postoji fizička zavisnost opisana jednačinama od (1) do (6). Sile i momenti dati su u odnosu na koordinatni sistem vezan za vektor brzine, tako da se pravac čeonne sile  $F_c$  poklapa sa vektorom brzine, ali ista ima suprotan smer.



Sl.1. Kruto telo u struji vetra

$$F_c = C_c \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_k \quad \text{čeonna sila} \quad (1)$$

$$F_b = C_b \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_k \quad \text{bočna sila} \quad (2)$$

$$F_u = C_u \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_k \quad \text{sila uzgona} \quad (3)$$

$$M_v = k_v \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_k \cdot l_k \quad \text{moment valjanja} \quad (4)$$

$$M_s = k_s \cdot p_d \cdot S_k \cdot l_k \quad \text{moment skretanja} \quad (5)$$

$$M_p = k_p \cdot p_d \cdot S_k \cdot l_k \quad \text{moment propinjanja} \quad (6)$$

gde su:

$F_i$  - generisane mehaničke sile,

$M_i$  - generisani momenti,

$C_i$  - dinamički koeficijenti sile,

$k_i$  - dinamički koeficijenti momenta,

$p_d = \frac{1}{2} \rho_v V^2$  - dinamički pritisak,

$\rho_v$  - gustina vazduha,

$V$  - brzina vazduha,

$S_k$  - karakteristična površina mehaničke prepreke u struji vetra,

$l_k$  - karakteristični krak momenta.

Komponente sile i momenata date u odnosu na koordinatni sistem vezan za vektor brzine vetra iskazane jednačinama ( 1, 2,...6), mogu se transformisati na koordinatni sistem sistem (x,y,z) vezan za nepokretnu mehaničku prepreku prema jednačinama:

$$F_x = C_x \cdot p_d \cdot S_k \quad \text{podužna sila} \quad (7)$$

$$F_y = C_y \cdot p_d \cdot S_k \quad \text{upravna sila} \quad (8)$$

$$F_z = C_z \cdot p_d \cdot S_k \quad \text{porečna sila} \quad (9)$$

$$M_x = k_x \cdot p_d \cdot S_k \cdot l_k \quad \text{podužni moment} \quad (10)$$

$$M_y = k_y \cdot p_d \cdot S_k \cdot l_k \quad \text{upravni moment} \quad (11)$$

$$M_z = k_z \cdot p_d \cdot S_k \cdot l_k \quad \text{poprečni moment} \quad (12)$$

Relacije između dinamičkih koeficijenata u jednačinama za sile i momente u brzinskom koordinatnom sistemu i istih u koordinatnom sistemu vezanom za nepokretno telo su:

$$C_x = C_c \cdot \cos(x,c) + C_b \cdot \cos(x,b) + C_u \cdot \cos(x,u) \quad (7)$$

$$C_y = C_c \cdot \cos(y,c) + C_b \cdot \cos(y,b) + C_u \cdot \cos(y,u) \quad (8)$$

$$C_z = C_c \cdot \cos(z,c) + C_b \cdot \cos(z,b) + C_u \cdot \cos(z,u) \quad (9)$$

$$k_x = k_c \cdot \cos(x,c) + k_b \cdot \cos(x,b) + k_u \cdot \cos(x,u) \quad (10)$$

$$k_y = k_c \cdot \cos(y,c) + k_b \cdot \cos(y,b) + k_u \cdot \cos(y,u) \quad (11)$$

$$kz = k_c \cdot \cos(z, c) + k_b \cdot \cos(z, b) + k_u \cdot \cos(z, u) \quad (12)$$

Uzajamni položaj ova dva ortogonalna koordinatna sistema ne određuje devet uglova kako bi se moglo zaključiti iz jednačina, već samo dva; tz. napadni ugao  $\alpha$  i ugao klizanja  $\beta$  (slika 1).

Ako se izvrše određena pojednostavljenja, tako da se posmatra samo brzina strujanja vetra u horizontalnoj ravni, tada se prostorni koordinatni sistem redukuje na koordinatni sistem u ravni, odnosno na x,y sistem. U tom slučaju je za vezu između koordinatnih sistema veznih za brzinu i telo dovoljan samo jedan ugao  $\varphi$ . Kod mehaničkih prepreka simetričnih u odnosu na čeonu pravac vetra, ne postoje bočne sile ( $C_b=0$ ), pa se problem merenja vektora brzine vetra dodatno pojednostavljuje. Merenjem dve ortogonalne sile u nepokretnoj ravni:  $F_x$ ,  $F_y$  može se odrediti vektor brzine i napadni ugao  $\varphi$  prema jednačinama:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot F_R}{C_c \cdot \rho_v \cdot S_k}} \quad (13)$$

$$\varphi = \arctg \frac{F_y}{F_x} \quad (14)$$

gde je  $F_R$  rezultantna sila koja se izračunava prema jednačini (15) na bazi merenih komponenti sile:  $F_x$  i  $F_y$ .

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (15)$$

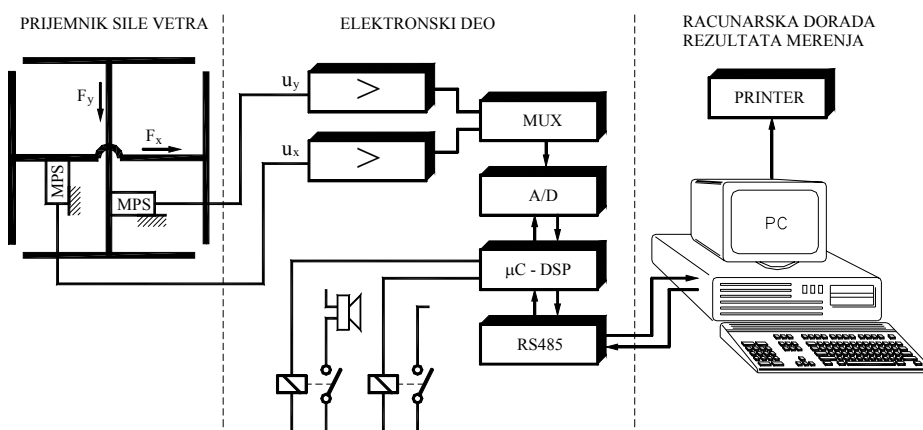
Sa teorijskog aspekta, prema jednačinama (13, 14 i 15), merenje vektora brzine, odnosno modula, pravca i smera brzine vetra moguće je na bazi merenja komponenti mehaničke sile, koje vetar generiše na mehaničkoj prepreci (prijemnik opterećenja) poznate površine i oblika. U realizaciji ovakvog koncepta merenja brzine vetra nudi se više mogućnosti, kako u pogledu oblika prijemnika opterećenja, tipova mernih pretvarača sile u električni signal, tako i u primenjenoj elektronici za obradu mernih signala.

U aerodinamičkom smislu najčistiji model prijemnika sile vetra je telo u obliku lopte, koje se mehanički kruto poveže sa višekomponentnim pretvaračem sile. Višekomponentni merni pretvarači sile su u osnovi selektivni merni senzori koji reaguju samo na jednu određenu vrstu opterećenja (na primer na aksijalnu ili radijalnu silu ili na određeni momenat) [1]. Međutim, ovakvi merni pretvarači nisu komercijalno dostupni, već se projektuju i izrađuju uglavnom strogo namenski, prema pojedinačnim zahtevima, što bitno određuje njihovu cenu. Druga mogućnost je primena visoko selektivnih mernih pretvarača sile, platformskog tipa sa tenzometarskim mernim trakama [2]. Ovi merni pretvarači sile razvijni su za potrebe preciznog merenja mase i našli su vrlo široku komercijalnu primenu. Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" već više od dvadeset godina radi na razvoju i primeni ovih mernih pretvarača, pa se i kod razvoja i realizacije merača vetra na odlagalištu uglja u TE "Nikola Tesla" opredelio za takvu koncepciju.

### 3. OPIS REALIZOVANOG MERAČA BRZINE VETRA

Strukturna blok šema realizovanog merača brzine data je na slici 2. Sa slike 2 može se uočiti da merač brzine ima više funkcionalnih blokova:

- prijemnik sile vetra u vidu dva para paralelnih ploča, koji obrazuju omotač kocke,
- dva merna pretvarača sile platformskog tipa koji transformišu dve ortogonalne komponente sile vetra u određene električne signale,
- elektronski dvokanalni uređaj za analognu i digitalnu obradu mernih signala generisanih na mernim pretvaračima sile,
- interfejs 485 za serijsku vezu elektronskog dela sa PC radi prenosa digitalnih signala i njihove dalje i računarske obrade po namenski razvijenom softveru.,
- PC za računarsku obradu digitalnih signala po matematičkom modelu iskazanom jednačinama (13, 14, 15), izračunavanju modula, pravca i ugla vektora brzine i prezentaciju ovih rezultata merenja na ekranu monitora u numeričkom i grafičkom obliku.



Sl.2. Strukturna blok šema merača brzine vetra

Prijemnik sile vetra u osnovi čine ravne aluminijumske ploče, kvadratnog oblika, dimenzija 200 mm x 200 mm. Aerodinamički čeonni koeficijent  $C_c$  za ravne ploče iznosi 1.28. Jedan par paralelnih ploča (x osa), međusobno mehanički povezanih i geografski orijentisanih u pravcu sever-jug, prima i prenosi silu vetra na merni pretvarač sile platformskog tipa koji transformišu ovu komponentu sile u korespondentni električni signal. Drugi par istovetnih paralelnih ploča, postavljenih pod  $90^\circ$  u odnosu na prethodni, na opisani način prima i meri drugu ortogonalnu komponentu sile ( $F_y$ ), koja odgovara pravcu istok - zapad. Na slici 3a prikazan je spoljni, a na slici 3b unutrašnji izgled prijemnika sile vetra. Realizovano rešenje omogućava merenje modula i pravca brzine vetra u horizontalnoj ravni. Omotač kocke koga obrazuju ravne ploče (prijemnici opterećenja), zatvoren je sa gornje strane jednom dodatnom neaktivnom pločom, mehaničkim poklopcem (nadstrešnicom), koja štiti prijemnik vetra od atmosferskih padavina. Sami merni pretvarači

sile su iz istih razloga dodatno zaštićeni, tako što su oklopljeni sa elastičnim gumenim omotačem. Donja ploča prijemnika opterećenja je konstrukciono noseća ploča, na koju su postavljeni i montirani svi elementi prijemnika opterećenja, a takođe služi i za njegovo učvršćenje na mestu merenja brzine vetra.



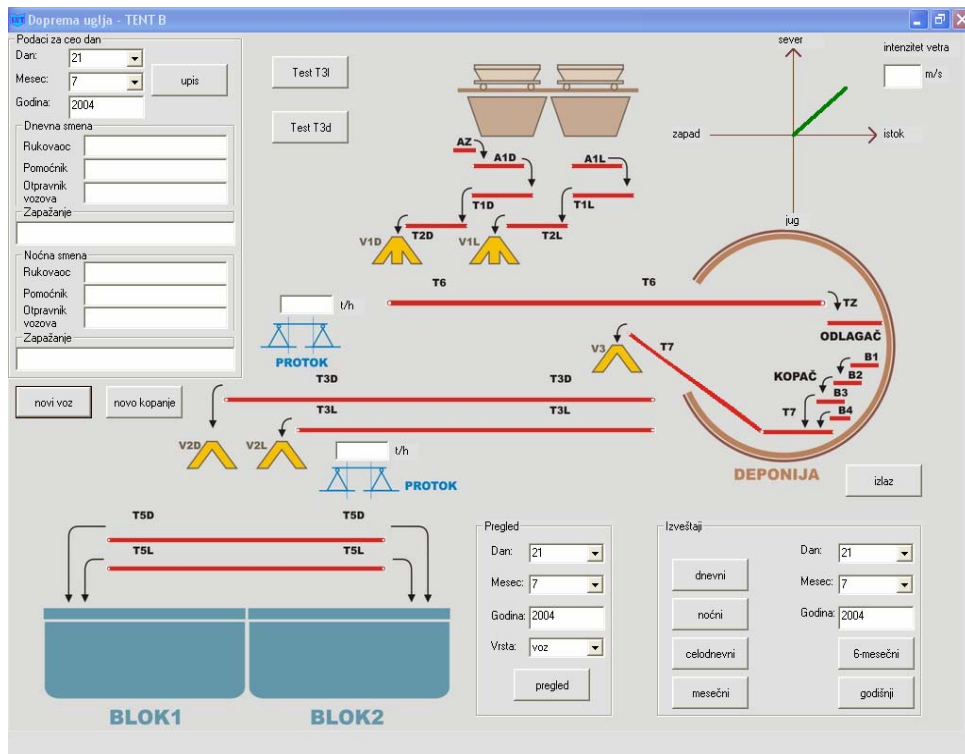
*Sl.3a. Spoljni izgled prijemnika opterećenja*



*Sl.3b. Unutrašnji izgled prijemnika opterećenja*

Merni pretvarači sile, platformskog tipa predstavljaju poseban tip mernih pretvarača sile, koji se odlikuje visokom selektivnošću merene sile. To podrazumeva da je uticaj parazitnih sila i momenata kod ovih pretvarača oslabljen preko hiljadu puta [3]. U konkretnom slučaju pod parazitnim silama i momentima podrazumevaju se svi momenti i sve sile koje odstupaju od osnovog pravca merene sile. Takvi merni pretvarači omogućavaju precizno merenje određene orijentisane sile unutar neke površine nezavisno od njene napadne tačke. Platformski merni pretvarači razvijeni su uglavnom na bazi tenzometaskih traka (strain gage), jer su ove elektrooptorne trake već svojim rasporedom i oblikom jedan od elemenata selektivnosti merenja mehaničke sile. Drugi elemenat je Vitstonov neuravnoteženi most, odnosno broj i raspored tenzometarskih traka u granama mosta. Elastični elemenat mernog pretvarača, koji pretvara mehaničku merenu silu (naprezanje) u elastičnu deformaciju je takođe u funkciji selektivnog merenja sile. Merne pretvarače platformskog tipa odlikuju pored visoke selektivnosti merenja sile i odlične metrološke karakteristike: pre svega tačnost merenja, pouzdanost i trajnost rada u promenljivim ambijentnim uslovima. Zbog toga su ovi merni pretvarači sile našli široku primenu kod elektronskih vaga [4]. Ovi merni pretvarači spadaju u grupu pasivnih mernih pretvarača pa je za njihov rad potrebno napajanje električnom energijom, najčešće jednosmernim naponom od 5 V do 12 V. Pri nazivnoj (nominalnoj) merenoj sili ostvaruje se merni signal reda desetak mV pa je pre pretvaranja ovih signala u digitalni oblik potrebno da se isti u analognom obliku pripreme za A/D konverziju, odnosno da se pojačaju, filtriraju, balansiraju i dr.

Obradu mernih signala sa oba merna pretvarača sile preuzima elektronski deo uređaja za merenje brzine vetra. Ovaj deo uređaja prostorno je dislociran od prijemnika opterećenja za više od 20 m. Ova udaljenost može biti u principu i nekoliko stotina metara, ali se napajanje mernih pretvarača u tom slučaju ostvaruje pomoću četiri žice (par sense krajeva). Prijemnik sile vetra postavljen je na krovu najviše zgrade u blizini odlagališta uglja, a elektronski deo i PC u komandnoj sali rukovaoca dopreme uglja.



Sl. 4. Sinopsis šema sistema za dopremu uglja

Hardver elektronskog dela uređaja realizovan je sa savremenim elektronskim komponentama visokog stepena integracije, što celo elektronsko rešenje uređaja svodi praktično na tri elektronska čipa. Primenjeni su: 16-bitni A/D konvertor sa  $\Sigma\Delta$ -modulacijom, tip CS 5522, koji u strukturi sadrži programabilni diferencijalni pretpojačavač i serijski izlaz za vezu sa mikrokontrolerom, 8-bitni mikrokontroler tip AT 89C 4051-12 i adapter za serijsku komunikaciju MAX 232. Za primenjeni mikrokontroler razvijen je namenski program, koji omogućava odgovarajuću obradu mernih signala sa oba merna pretvarača sile. Osnovne funkcije mikrokontrolera prema ovom razvijenom programu su: inicijalizacija, sinhronizacija, transformacija, usrednjavanje, kalibracija i serijski prenos rezultata merenja. Rezultati merenja komponenti sile vetra, nakon ove analogne i digitalne obrade dostavljaju se PC serijskom vezom 485 svake tri sekunde, po definisanom komunikacijskom protokolu.

PC standardne konfiguracije vrši dalju računsku obradu primljenih rezultata merenja, po navedenom matematičkom modelu. Kao konačan rezultat ove matematičke obrade dobija se **modulo i** pravac brzine vetra. Ovi rezultati se prikazuju na ekranu monitora PC kao deo šireg monitoringa dopreme uglja blokovima termoelektre. U ovaj monitoring uključeno je takođe i praćenje rada odlagača i bagera kopača, stanje i rad transportnih traka, merenje brzine transportnih traka, trenutnog protoka i mase dopremljenog uglja preko dve vage na

traci. Na slici 4 prikazana je sinopsis šema stanja transportnih traka prikazana na ekranu monitora PC.

Komunikacija PC i elektronskog uređaja je dvosmerna pa ukoliko rezultati merenja brzine vetra pokazuju brzine iznad 15 m/s računar zvučno signalizuje i vizuelno upozorava rukovodila dopreme uglja na ozbiljnost situacije, a kod brzina iznad 20 m/s daje komandu elektronskom uređaju da automatski isključi rad odlagača ili bagera.

#### **4. REZULTATI ISPITIVANJA**

Realizovani uređaj je funkcionalno ispitan u laboratorijskim uslovima, pomoću ventilatora promenljive brzine okretanja, koji je simulirao strujanje vetra. Ispitivanja su potvrdila ispravnost i prednosti primenjene koncepcije merenja brzine vetra. Ista se ogleda u ostvarenom rešenju bez kinematskih delova, što ovaj uređaj čini pouzdanim i robusnim u eksploataciji. Druga, ali i ne manja prednost proizilazi iz činjenice da se brzina vetra meri na bazi merenja mehaničke sile zbog koje se i kontroliše brzina vetra, jer je ista uzrok opasnosti i havarija mehaničkih konstrukcija. Sprovedena teorijska razmatranja u radu pokazuju da za datu mehaničku prepreku postoji čvrsta korelacija između ove dve fizičke veličine uz pretpostavku o nepromenljivosti svih drugih parametara. Međutim, gustina vazduha se ipak malo menja zavisno od pritiska, vlažnosti i temperature vazduha, pa se ovakvim načinom merenjem dobijaju vrednosti brzina vetra koje su relevantnije za razmatrani problem.

Ispitivanje metroloških karakteristika, pre svega tačnosti merenja i uticajnih veličina sprovedeno je pomoću tegova poznate mase. Postavljanjem ovih tegova na površinu prijemnika opterećenja moglo se vrlo precizno (sa greškom manjom od 0.1%) izvršiti kalibracija mernih kanala, provera linearnosti, histerezisa i selektivnosti merenja sile. Izvršena ispitivanja uticaja temperature na varijaciju nule i tačnosti merenja pokazala su da nula i tačnost instrumenta vrlo malo variraju, tačnije manje od 0,05% /10°C u celom opsegu radne temperature od -20 °C do 50 °C.

Pored ovih laboratorijskih ispitivanja merač brzine vetra proveren je u Institutu za fiziku u Beogradu koja raspolaže aerotunelom u kome se vrši ispitivanje i kalibracija aneometara. Rezultati merenja u aerotunelu i rezultati merenja pomoću tegova nisu se razlikovali za više od  $\pm 1\%$ .

#### **5. ZAKLJUČAK**

Savremena rešenja merenja brzine vetra koriste prednosti koje pružaju elektronske i informatičke tehnologije, posebno u pogledu obrade i prenosa merne informacije. U ovom radu prikazano je merenje brzine vetra, bazirano na merenju vektora mehaničke sile pomoću mernih pretvarača sa tenzometarskim trakama. Osnovna prednost realizovanog rešenja je u samom principu merenja ortogonalnih komponenti sile vetra pomoću selektivnih mernih pretvarača sile na bazi tenzometarskih traka. Sprovedena funkcionalna i metrološka ispitivanja u laboratoriji, potvrdila su projektovane karakteristike ovog instrumenta. Merač brzine vetra razvijen je za potrebe Elektroprivrede Srbije i nalazi se već dve godine u neprekidnoj primeni u TE "Nikola Tesla" u Obrenovcu., tako da je ovaj uređaj proveren i u realnim uslovima eksploatacije.



## LITERATURA

- [1] D.Kovačević, S.Škundrić, S.Vukovojac, "Višekomponentni merni pretvarači sile". *Zbornik radova Instituta "Nikola Tesla"* Vol.10, Beograd, 1993.
- [2] S. Škundrić, D.Kovačević, "The Strain Gauge Based Load Cell with Bolted Spring Assembly". *Proceedings of 12th International Conference on Mass and Force*, IMEKO,TC3, Szeged, 1990.
- [3] S. Škundrić, D. Kovačević, "Metode i postupci otklanjanja i smanjenja mehaničkih uticaja kod merenja mehaničke sile". *Zbornik radova JUKEM -a*, Beograd, 1986.
- [4] S. Škundrić, D.Kovačević *Elektromehaničke vage - merenje mase mernim pretvaračima sile sa tenzometarskim trakama*, SMEIT- Srbije, Beograd, 1995.

**Abstract:** In the paper one novel solution for measuring wind velocity is presented. The principal characteristic of this solution is that wind velocity is measured by measuring force components by appropriate strain gauge based platform type load cells. The basic advantage of the proposed solution is the lack of kinematic parts and the ability to measure full speed vector in plane.

**Key words:** *Wind velocity –vector instrument, load cell, strain gage.*

## WIND VELOCITY–VECTOR INSTRUMENT

Slobodan Škundrić, Srboљjub Vukovojac, Nidžo Miladinović, Srđan Milosavljević