



ДИРЕКЦИЈА ЗА МЕРЕ И ДРАГОЦЕНЕ МЕТАЛЕ



ЗАВОД ЗА МЕТРОЛОГИЈУ ЦРНЕ ГОРЕ ДРУШТВО МЕТРОЛОГА ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



НОВИ САД

КОНГРЕС МЕТРОЛОГА 2013

ЗБОРНИК РАДОВА

Бор, 16-18(19). октобар 2013. године

ИМПРЕСУМ

Издавач: **Дирекција за мере и драгоцене метале**
Београд, Мике Аласа 14

Приредили: др **Бранислав Танасић**
мр **Зоран Шофранац**
Ана Гајић

Припрема за штампу: **Факултет техничких наука Нови Сад**

Штампа: **Факултет техничких наука Нови Сад**

Тираж: **100 примерака**

ISBN 978-86-7287-040-4

Београд, октобар 2013.

ЕТАЛОНИРАЊЕ И ПРОРАЧУН МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ АНЕМОМЕТАРА У МЕТЕОРОЛОШКОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ РЕПУБЛИЧКОГ ХИДРОМЕТЕОРОЛОШКОГ ЗАВОДА СРБИЈЕ

Бранко Живковић, Предраг Коларж, Братислав Татић

Кључне речи: брзина ветра, анемометар, аеро тунел, мерна несигурност

РЕЗИМЕ

У овом раду се даје опис опреме и инструмената за еталонирање, процедуре еталонирања, прорачун проширене и комбиноване мерне несигурности као и правци даљег развоја анемометрије у акредитованој Метеоролошкој лабораторији РХМЗ. Лабораторија је акредитована за дигиталне и аналогне анемометре у опсегу од 0,5 до 40 m/s. Проширена мерна несигурност еталонирања анемометара износи $U=(0,2+0,04*v)$ m/s. Еталонирања се врше у складу са стандардом ISO 17713-1 као са препорукама Светске Метеоролошке Организације. Поузданост еталонирања је обезбеђена употребом два независна мерна система.

ANEMOMETER CALIBRATION AND EVALUATION OF MEASURING UNCERTAINTY IN THE METEOROLOGICAL LABORATORY OF RHMZ SERBIA

Keywords: wind speed, wind gauge, aero tunnel measurement uncertainty

ABSTRACT

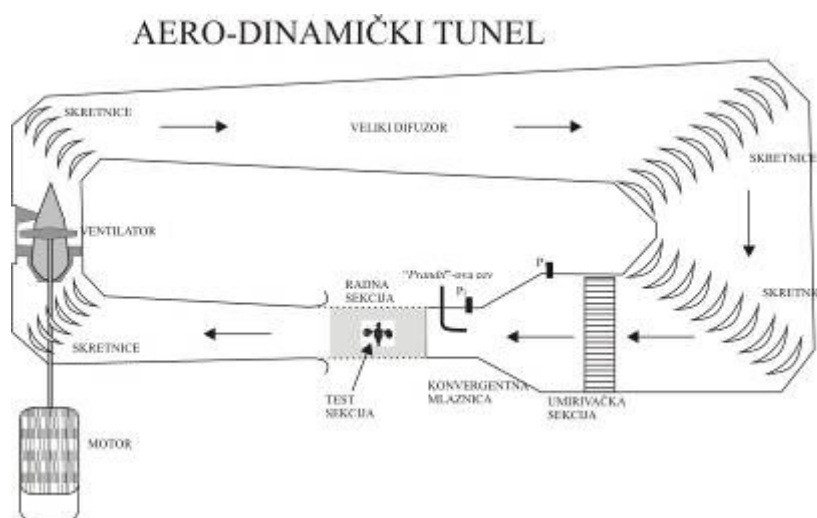
The topic of this paper is the description of the equipment and instruments for calibration, calibration procedures, budget of expanded and combined measuring uncertainty, as well as the direction of the further development of anemometry at the accredited Meteorological Laboratory of the Republic Hydro-meteorological Service (RHMS) of Serbia. Laboratory is accredited for analog and digital anemometers in the range from 0.5 to 40 m/s. The expanded measuring calibration uncertainty of anemometers is $U = (0.2 + 0.04*v)$ m/s. Calibration is performed in accordance with ISO 17713-1 as well as with those of the World Meteorological Organization. The reliability of calibration is ensured by the usage of two independent measurement systems.

УВОД

Метеоролошка лабораторија за еталонирање метеоролошких инструмената налази се у саставу Републичког Хидрометеоролошког Завода (РХМЗ) Србије. Обим акредитације лабораторије за област анемометрије важи за дигиталне и аналогне анемометре, а еталонирање се врши у опсегу од 0,5 до 40 m/s. Еталонирање се врши по Упутству за етлонирање анемометара [1] и Упутству за прорачун мерне несигурности [2]. Проширена мерна несигурност еталонирања анемометара износи $U=(0,2+0,04*V)$ m/s. Еталонирања се врше у складу са стандардом ISO 17713-1 (Meteorology - Wind measurements - Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance).

ОПРЕМА ЗА ЕТАЛОНИРАЊЕ АНЕМОМЕТАРА

Од потребне опреме за еталонирање анемометара Лабораторија поседује: аеро-тунел WT 01/61-VTI са додатном опремом (Слика 1а,б), еталонски диференцијални микро-манометар "ManoAir 500" Schiltknecht Messtechnik AG (Слика 2), две еталониране "Prandtl"-ове сонде (Schiltknecht Messtechnik AG), сензори "ManoAir"-а за читавање услова радне средине (термометар, хигрометар, барометар), контролни инструмент - водени диференцијални микро-манометар Schiltknecht Messtechnik AG (Слика 3) и мултимер са мултиплексером и software-ом (Agilent Technologies) за читавање фреквенце сензора мерила која се еталонирају.



Слика 1а. Схема аеро-тунела.



Слика 1б. Део тунела са тест секцијом.

Аеродинамички тунел у лабораторији је тунел са полуотвореном тест секцијом за подзвучне брзине (Слика 1б) у коме је могуће остварити брзине струјања ваздуха од 0 до $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Тест секција је елипса са полу-осама 0,3 m и 0,4 m. Дужина радног дела тест секције је 1,2 m. Основне карактеристике аеро-тунела су униформност, турбуленција и стабилност унутар тест секције. Оне су предмет периодичне провере и испуњавају стандард ISO 17713-1 [3].



Слика 2 "ManoAir500" дигитални микроманометар.



Слика 3. Водени диференцијални микро-манометар.

ПРИНЦИП МЕРЕЊА

За потребе еталонирања анемометара користе се два фундаментална физичка принципа, *Bernuli*-јев као примарни и *Venturi*-јев, као принцип контролног мерног система. Разлика ова два мерна система са становишта еталонирања је у начину мерења и читавања разлике притисака. Примарни мерни систем (Слика 2, 4). користи дигитализован сигнал са сензора притиска и врши његову корекцију на температуру и релативну влажност што га чини ефикасним по питању брзине еталонирања. Контролни систем мерење разлике притисака врши помоћу воденог манометра који се читава визуелно, а аквизиција података и корекција на температуру и релативну влажност се врши мануелно тако да му је ефикасност мала. Ипак, због једноставности принципа рада он има већу дугорочну стабилност те је идеалан као контролни систем (Слика 3, 4).

Примарни мерни систем

Примарни мерни систем заснован на *Bernuli*-јевом принципу користи "Prandtl" цеви за мерење брзине ветра. Брзина струјања флуида помоћу "Prandtl"-ове цеви је одређена тзв. зауставним притиском (p_t) који представља збир статичког (p_s) и динамичког притиска:

$$p_t = p_s + (\rho V^2 / 2) \rightarrow V^2 = 2(p_t - p_s) / \rho \quad (1)$$

где је ρ густина флуида.

Средња брзина ветра у аеро-тунелу помоћу "Prandtl" ових мерила се рачуна помоћу:

$$\bar{v} = k_f \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{k=1}^n v_k = k_f (1/n) \sum_{k=1}^n \left(\frac{2k_c p_k R T_k}{C_h B_k K_\rho} \right)^{1/2} \quad (2)$$

где је: \bar{v} - средња брзина ветра; k_f - корекциони фактор протока; v_k - очитане вредности брзине ветра са еталонског мерила за k броја читавања; k_c - корекциони фактор притиска који се односи на разлику положаја "Prandtl"-ове цеви и анемометра; p_k - динамички притисак измерен "Prandtl"-овом цеви (Δp); R - гасна константа; T_k - температура у тест секцији; C_h - коефицијент улазног отвора "Prandtl"-ове цеви; B_k - барометарски притисак; k_ρ - корекциони фактор који коригује гуштину ваздуха.

Очитавање и аквизиција података разлике притисака као и параметара средине у тест секцији тунела врши се помоћу инструмента „ManoAir 500” (Schiltknecht Messtechnik AG) и софтвера „Terminal”.

Контролни мерни систем

Принцип *Venturi*-јеве цеви [4] као контролни мерни систем заснован на мерењу статичких притисака у два различита пресека конвергентне млазнице тунела (Слика 1а). Опсег мерења воденог диференцијалног манометра је од 0 – 30 mbar-а са тачношћу очитавања 0,01 mbar. За прорачун брзине ветра у тест секицији користе се следеће формуле:

$$\rho_{atm} = 0,003483 \frac{P_{atm}}{T_{atm}} \quad (3)$$

где је ρ_{atm} - густина ваздуха, P_{atm} - статички притисак у тест секцији, T_{atm} - температура у тест секцији

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_{atm} \frac{V^2}{2} \quad (4)$$

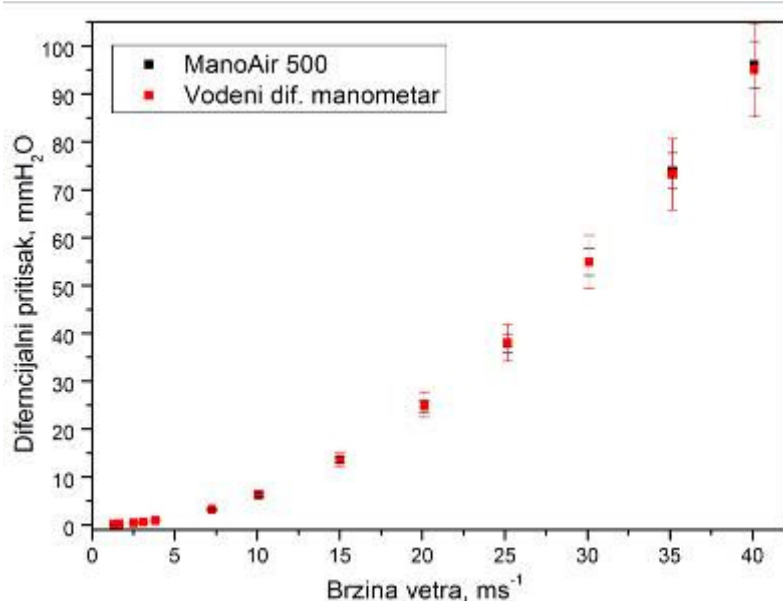
где је Δp - разлика статичких притисака у пресецима p_1 и p_2 (Слика 1а). Динамички притисак (q) у тест секцији је дефинисан као:

$$q = 1,05 \cdot \Delta p \quad (5)$$

Брзина ветра у тест секцији се израчунава по формули:

$$V = \sqrt{2 \frac{q [Pa]}{\rho [kg/m^3]}} = \sqrt{2 \frac{q [mbar] \cdot 100}{0,003483 \frac{p_{atm} [mbar] \cdot 100}{(T_{atm} [^{\circ}C] + 273,15)}}} \quad (6)$$

Брзина ветра се по очитавању параметара израчунава софтверски.



Слика 4. Поређење диференцијалних притисака дигиталног и аналогног микроманометра.

ЕТАЛОНИРАЊЕ АНЕМОМЕТАРА

Еталонирање анемометара се врши у складу са стандардом ISO 17713-1 и по стандарду ISO 17025 [5]. Дефинисане су две процедуре, процедура за пријем мерила (NML.UP.03) и процедура за еталонирање (NML.PC.05).

Одређивање броја и вредности тачака на којима се врши еталонирање

Поступак еталонирања [1, 3] састоји се од одређивања почетног прага брзине (осетљивости) мерила и еталонирања у нелинеарном и линеарном делу рада анемометра. Нелинеарни део рада анемометра се одређује као 6 пута почетни праг брзине (V_0). Ако је измерена почетна брзина анемометра који се еталонира већа од 0,5 m/s онда се тако одређени праг V_0 узима као основа која се умножава са коефицијентима 2, 3, 4, 5 и 6 тј.: $2 \cdot V_0$, $3 \cdot V_0$, $4 \cdot V_0$, $5 \cdot V_0$ и $6 \cdot V_0$. Ако је измерена почетна брзина анемометра који се еталонира мања од 0,5 m/s онда се као V_0 за одређивање тачака еталонирања у нелинеарном делу узима 0,5 m/s и раде се следеће тачке: 1 m/s, 1,5 m/s, 2 m/s, 2,5 m/s и 3 m/s.

Линеарни део рада мерила се одређује као умножак максималне брзине еталонирања (V_{max}): $0,2 \cdot V_{max}$, $0,4 \cdot V_{max}$, $0,6 \cdot V_{max}$, $0,8 \cdot V_{max}$, V_{max} , $0,9 \cdot V_{max}$, $0,7 \cdot V_{max}$, $0,5 \cdot V_{max}$, $0,3 \cdot V_{max}$ и $0,1 \cdot V_{max}$. Ради усаглашавања са WMO [6] као фиксна тачка се узима 5 m/s за све анемометре који се еталонирају.

МЕРНА НЕСИГУРНОСТ ЕТАЛОНИРАЊА АНЕМОМЕТАРА

Процена мерне несигурности анемометра се обавља у три корака:

Корак 1. Одређивање праве кориговане вредности брзине ветра коју показује примарни тј. референтни еталонски мерни систем и припадајуће мерне несигурности;

Корак 2. Одређивање вредности брзине ветра које оствари мерило са припадајућом комбинованом мерном несигурношћу;

Корак 3. Одређивање проширене мерне несигурности.

Мерна несигурност примарног мерног система

Мерна несигурност типа Б се може приказати као [7,8]:

$$u_{c,B}^2(\bar{v}) = c_f^2 u_f^2 + c_t^2 u_t^2 + c_{p,t}^2 u_{p,t}^2 + c_{p,s}^2 u_{p,s}^2 + c_{p,d}^2 u_{p,d}^2 + c_{T,t}^2 u_{T,t}^2 + c_{T,s}^2 u_{T,s}^2 + c_{T,d}^2 u_{T,d}^2 + c_h^2 u_h^2 + c_{B,t}^2 u_{B,t}^2 + c_{B,s}^2 u_{B,s}^2 + c_{B,d}^2 u_{B,d}^2 + c_\rho^2 u_\rho^2 \quad (7)$$

где је c фактор осетљивости чији се доњи индекс односи на исти извоер грешке као и онај са којим се множи.

$u_{c,B}$ – комбинована грешка типа Б;

u_f – стандардна несигурност тунела (блокада тунела), корекциони фактор k_f ;

u_t – стандардна несигурност протока тунела, корекциони фактор k_c ;

$u_{p,t}$ – стандардна несигурност осетљивости давача притиска, корекциони фактор $K_{p,t}$;

$u_{p,s}$ – стандардна несигурност А/Д конверзије појачања сензора притиска, корекциони фактор $K_{p,c}$;

$u_{p,d}$ – стандардна несигурност семпловања података сензора притиска, корекциони фактор $K_{p,d}$;

$u_{T,t}$ – стандардна несигурност давача амбијенталне температуре, корекциони фактор $K_{T,t}$;

$u_{T,s}$ – стандардна несигурност појачања сигнала давача амбијенталне температуре, корекциони фактор $K_{T,s}$;

$u_{T,d}$ - стандардна несигурност A/D конверзије појачања давача амбијенталне температуре, корекциони фактор $K_{T,d}$;

u_h - стандардна несигурност главе "Prandtl"-ове цеви, коефицијент осетљивости C_h ;

$u_{B,t}$ - стандардна несигурност осетљивости барометра, корекциони фактор $K_{B,t}$;

$u_{B,s}$ - стандардна несигурност појачања сигнала барометра, корекциони фактор $K_{B,s}$;

$u_{B,d}$ - стандардна несигурност A/D конверзије појачања сигнала барометра, корекциони фактор $K_{B,d}$;

u_ρ - корекција утицаја влаге на густину ваздуха, релативна влажност ϕ .

У Табели 1 дат је пример прорачуна буџета комбиноване мерне несигурности примарног мерног система на брзини од 10 ms^{-1} .

Табела 1. Приказ буџета мерне несигурности примарног мерног система на брзини од 10 ms^{-1} .

| Величина | Кратак опис | Процент | Стандардна мерна несигурност | Расподела вероватноће | Коеф. осетљивости | Допринос стандардној мерној несигурности (4) * (6) | Квадрат стандардне мерне несигурности |
|---|--------------------------------------|---------|------------------------------|-----------------------|---|--|--|
| X_i | | x_i | $u(x_i)$ | | c_i | $u_i(y)$ | $u_i^2(y)$ |
| k_f | корекциони фактор аеротунела | 1,03 | 0,005 | нормална | $9,76 \text{ ms}^{-1}$ | $0,049 \text{ ms}^{-1}$ | 0,002401 |
| k_c | калибрациони фактор аеротунела | 0,99 | 0,005 | нормална | $5,05 \text{ ms}^{-1}$ | $0,025 \text{ ms}^{-1}$ | 0,000625 |
| $K_{p,t}$ | осетљивост давача притиска | - | 0,204 Pa | троугаона | $c_{p,t}=0,086 \text{ m}^3/\text{Ns}$ | $0,017 \text{ ms}^{-1}$ | 0,008836 |
| $K_{T,t}$ | давач амбијенталне температуре | - | 0,2 °C | троугаона | $0,08 \text{ m}(\text{s}^\circ\text{C})^{-1}$ | $0,0014 \text{ ms}^{-1}$ | 0,000002 |
| C_h | коефицијент главе "Prandtl"-ове цеви | - | 0,00099 | нормална | $-5,05 \text{ ms}^{-1}$ | $-5,005 \text{ ms}^{-1}$ | 0,000025 |
| $K_{B,t}$ | осетљивост барометра | - | 1000Pa | нормална | $-0,00005 \text{ m}\cdot(\text{sPa})^{-1}$ | $-0,05 \text{ ms}^{-1}$ | 0,0025 |
| S_A | статистичка несигурност семпловања | - | $0,053 \text{ ms}^{-1}$ | нормална | 1 | $0,053 \text{ ms}^{-1}$ | 0,002809 |
| k_ρ | корекција влаге или густине | - | $0,016 \text{ ms}^{-1}$ | нормална | 0,027 | $0,00042 \text{ ms}^{-1}$ | 0,0000017 |
| Буџет комбиноване мерне несигурности референтног мерила u_v | | | | | $\sqrt{\sum u_i^2}$ | | 0,128 ms^{-1} |

Проширена мерна несигурност мерила које се еталонира

Прорачун мерне несигурности еталонираних анемометара [7,8] обухвата мерне несигурности:

- референтног мерног система за еталонирање анемометара који обухвата све метеоролошке параметре (наведене у формули 2);
- параметре везане за карактеристике тунела;
- параметре сваког типа анемометра који се деле по типу индикатора и принципу рада;
- параметре везане за статистичку обраду података и линеарну регресију.

Проширена мерна несигурност мерила (Слика 5) које се еталонира (U_{CAL}) се добија помоћу:

$$U_{CAL} = \sqrt{u_v^2 + u_{iut}^2 + u_{lr}^2} \quad (8)$$

где је: u_v - комбинована мерна несигурност референтног мерила; u_{iut} - мерна несигурност мерила које се еталонира; u_{lr} - мерна несигурност линеарне регресије (Слика 5).

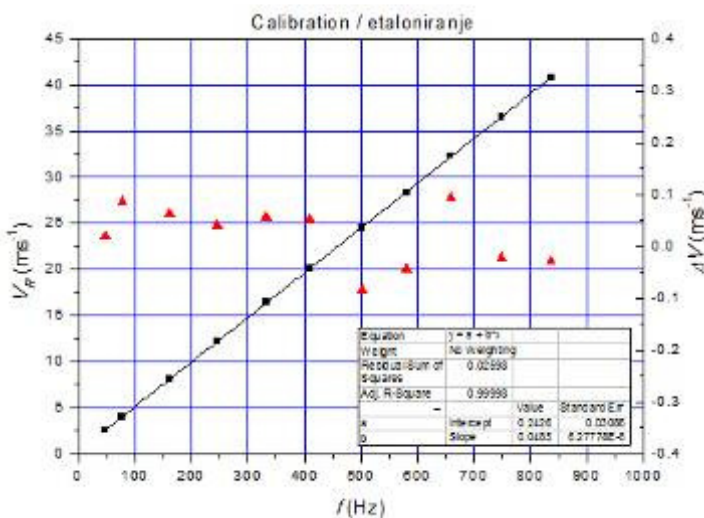
Мерна несигурност мерила које се еталонира се добија помоћу:

$$U_{iut} = \sqrt{B_{iut}^2 + (t \cdot S_{iut})^2} \quad (9)$$

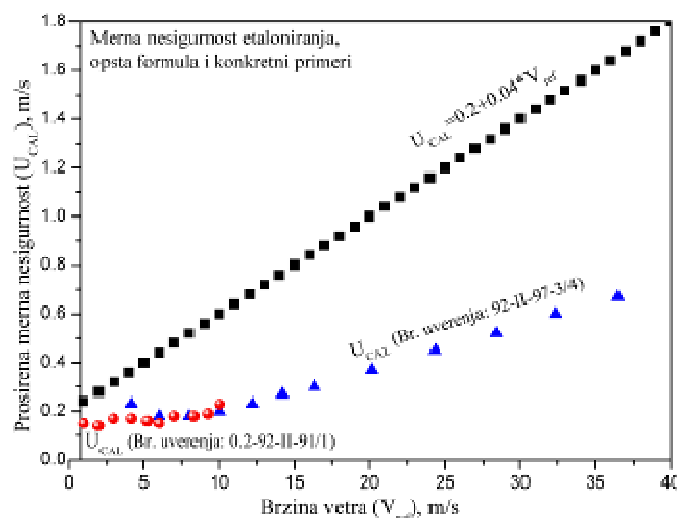
B_{iut} - везано је за најмању значајну цифру код дигиталних анемометара;

S_{iut} - статистичка несигурност читавања излазног сигнала еталонираног анемометра, везана за стандардну девијацију излазног сигнала у току читавања тј. аквизиције;

t - фактор обухвата, $t=1.96$ за 95% интервала поверења излазног сигнала анемометра у току читавања података.



Слика 5. Линеарна регресија са мерном несигурношћу линеарне регресије.



Слика 6. Графички приказ декларисане мерне несигурности и резултата еталонирања мерила.

Мерна несигурност линеарне регресије (u_{lr}) се добија помоћу:

$$u_{lr} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (10)$$

u_a - мерна несигурност коефицијента линеарне регресије, u_b - мерна несигурност офсета (одсечка на у-оси). Величине a и b се одређују методом линеарне регресије (видети Упутство за еталонирање анемометара). За линеарну везу константа a се назива офсет (померај) нуле и изражава у ms^{-1} док је константа b коефицијент регресије који одређује нагиб регресионе праве. У пракси се ови коефицијенти као и њихове мерне несигурности (u_a и u_b) добијају коришћењем линеарног фита графика фреквенце ротације анемометра и брзине ветра у тунелу коришћењем софтверског пакета „Origin“ или „Microsoft Office“.

Следи да је укупна проширена мерна несигурност (Слика 6, плави и црвени график):

$$U_{CAL} = \sqrt{u_v^2 + B_{iut}^2 + (t \cdot S_{IUT})^2 + (u_a^2 + u_b^2)} \quad (11)$$

За потребе прорачуна мерне несигурности анемометри се деле по врсти индикатора и по начину рада на: аналогне, дигиталне и анемографе. Обрада мерне несигурности за све наведене врсте анемометара се врши у програмском пакету „Excel” по аутоматизованој процедури.

ЗАКЉУЧАК

Еталонирање и прорачун мерне несигурности анемометара су у складу са захтевима ISO 17025 као и са захтевима Светске Метеоролошке организације (Guide to Meteorological Instruments and methods of Observation, WMO No. 8). Поузданост еталонирања обезбеђена је постојањем два независна мерна система. Обзиром да се потреба за овом облашћу са развојем привреде повећава потешно је континуирано побољшавати квалитет еталонирања у смислу смањивања мерне несигурности. То је могуће остварити увођењем савремених анемометријских уређаја попут ултрасоничних и ласер-доплер анемометара као референтних система. Метеоролошка лабораторија РХМЗа има потенцијале да у будућности добије статус именоване лабораторије за област анемометрије као и да постане регионални центар за анемометрију.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Упутство за еталонирање анемометара, NML UE.05, Интерни документ Метеоролошке лабораторије РХМЗ Србије, 2013.
- [2] Упутство за прорачун мерне несигурности, NML.UE.15, Интерни документ Метеоролошке лабораторије РХМЗ Србије, 2013.
- [3] ISO 17713-1-Meteorology - Wind measurements-Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance;
- [4] Low speed wind tunnel testing at wind tunnel T-32, Military Technical Institute of Yugoslav Army.
- [5] ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005.
- [6] WMO Guide to Meteorological instruments and methods of observation WMO-No. 8 (Seventh edition), 2008.
- [7] MEASNET Cup Anemometer Calibration Procedure, Version 1, 1997.
- [8] ECN-C-05-066 European ACCUWIND Research Project; Uncertainties in Cup Anemometer Calibrations (Type A and Type B uncertainties) P. J. Eecen and M. De Noord, 2005.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

006.91(082)(0.034.2)

КОНГРЕС метролога (2013 ; Бор)
Зборник радова [Електронски извор] /
Конгрес метролога 2013, Бор, 16-18(19).
октобар 2013. године ; [приредили Бранислав
Танасић, Зоран Шофранац, Ана Гајић]. -
Београд : Дирекција за мере и драгоцене
метале, 2013 (Нови Сад : Факултет техничких
наука). - 1 USB флеш меморија ; 2 x 2 x 6 cm

Системски захтеви: Нису наведени. - Насл.
са насловне стране документа. - Тираж 100. -
Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-7287-040-4

а) Метрологија - Зборници
COBISS.SR-ID 201852684