

MEĐULABORATORIJSKO POREĐENJE U ETALONIRANJU OTPORNIH TERMOMETARA ZA VAZDUH

Slavica Simić, Svetlana Stanisavljević, Vladan Stepanović

Ključne reči: otporni termometri, vazdušno okruženje, rezultati etaloniranja, dobra praksa

KRATAK SADRŽAJ

U radu su dati rezultati etaloniranja otpornih termometara unutar kontrolisanih vazdušnih sredina u okviru međunarodnog poređenja EURAMET Projekat 1459 – ATM - Air Temperature Metrology. Cilj istraživačkog projekta u periodu od 2019. godine do 2023. godine bio je uspostavljanje dobre laboratorijske prakse na osnovu sakupljenih rezultata merenja iz različitih metoda etaloniranja termometara namenjenih za merenje temperature vazduha. Ukupno 24 termometara različitih proizvođača i konstrukcija je etalonirano u 26 zemalja. Takođe, rad daje i pregled uticajnih faktora za ovaj specifični slučaj etaloniranja, tipične rezultate u merenju samozagrevanja termometra u vodi i vazduhu, kao i osnovne komponente budžeta merne nesigurnosti u vazdušnim sredinama i tipične vrednosti merne nesigurnosti za etaloniranja u vazdušnim sredinama za vreme kalibracije.

INTERLABORATORY COMPARISON ON CALIBRATION OF RESISTANCE THERMOMETERS IN AIR

Keywords: resistance thermometers, air environment, results of calibration, good practice

ABSTRACT

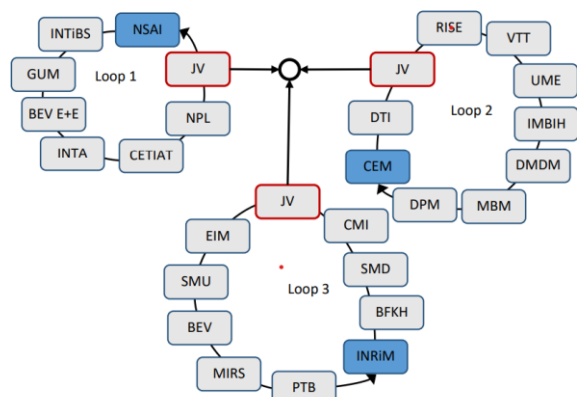
The paper presents the results of calibration of resistance thermometers within controlled air environment within the framework of the international research comparison project EURAMET 1459 – ATM – Air Temperature Metrology. The goal of the research project in the period from 2019 to 2023 was to establish good laboratory practice based on the results collected by different calibration methods. Total of 24 thermometers different manufacturers have been calibrated in 26 countries. Also, the paper provides an overview of the influencing factors for this specific case of calibration, typical results in measuring the self-heating of thermometers in water and air, as well as components of the uncertainty budget and typical values of measurement uncertainty in air environment during calibration.

UVOD

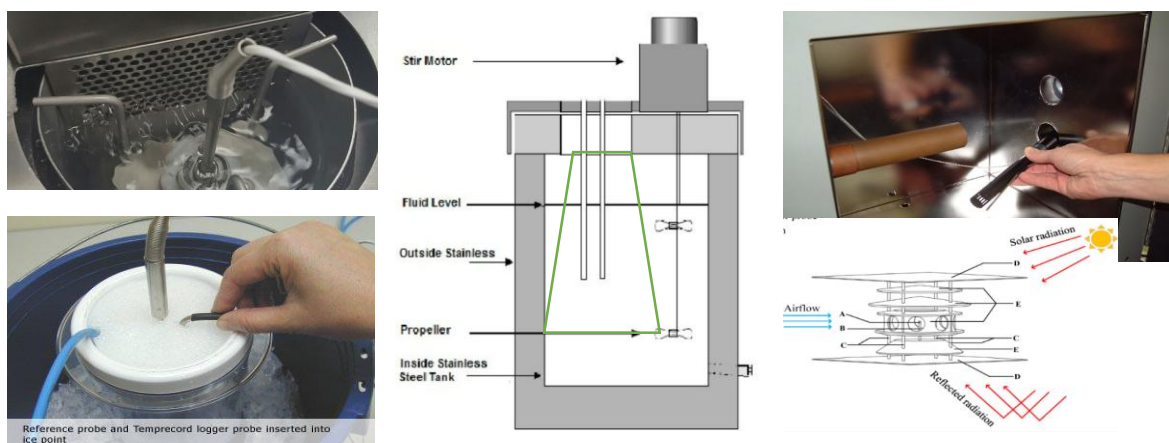
Merenje temperature vazduha ima veliki značaj u praćenju klimatskih promena i globalnog zagrevanja, u poljoprivredi, zdravlju i bezbednosti ljudi i drugih populacija. Naime, merenje temperature vazduha senzorima koji su etalonirani raznim metodama daje različite rezultate sa rasipanjem koje treba razjasniti. Etaloniranje ovih senzora sa što manjom mernom nesigurnosti u vazduhu je izazov koji je prepoznat u EURAMET 1459. Projekat je realizovan u periodu od 2019. godine do 2023. godine [1,2]. U poređenju je učestvovala DMDM, Srbija zajedno sa ostalim metrološkim institucijama najvišeg nivoa, kao pridruženi učesnik ovog interesantnog projekta. Sva merenja su realizovana sa ciljem da se objasni i bolje razume uticaj spoljnih faktora na prenos toplote tokom mernja temperature vazduha, kao što su brzina strujanja vazduha, zračenje senzora, relativna vlažnost i drugi uticaji. Slično istraživanje sprovedeno je i tokom poredjenja na projektu EURAMET 1061 dajući smernice da postoji zavisnost od dimenzije senzora, zračenja i brzine strujanja vazduha [3,4].

1. OSNOVNE INFORMACIJE O POREĐENJU

Međunarodno poređenje različitih senzora temperature za vazduh sprovedeno je organizaciono kao latica poređenje sa tri kruga/latice koje su imale zajedničku tačku pilota poređenja u nacionalnom institutu za metrologiju u Norveškoj, JV. Određena su i tri dodatna kopilota poređenja NSAI, Republika Irska, CEM, Španija i INRIM, Italija u svakom od krugova. U JV etalonirani su svi senzori (ukupno 24) i to je obezbedilo zajedničku tačku povezivanje svih rezultata etaloniranja ostalih institucija učesnica. Prva dva kruga/latice etalonirale su po 8 termometara različitih dizajna senzora kao sa slike 2, različitim metodama etaloniranja, osim kruga 3 gde su učesnici etalonirali ukupno 7 iz razloga neočekivano velikog drifta kod senzora [2].



Slika 1. Organizacija poređenja EURAMET 1459



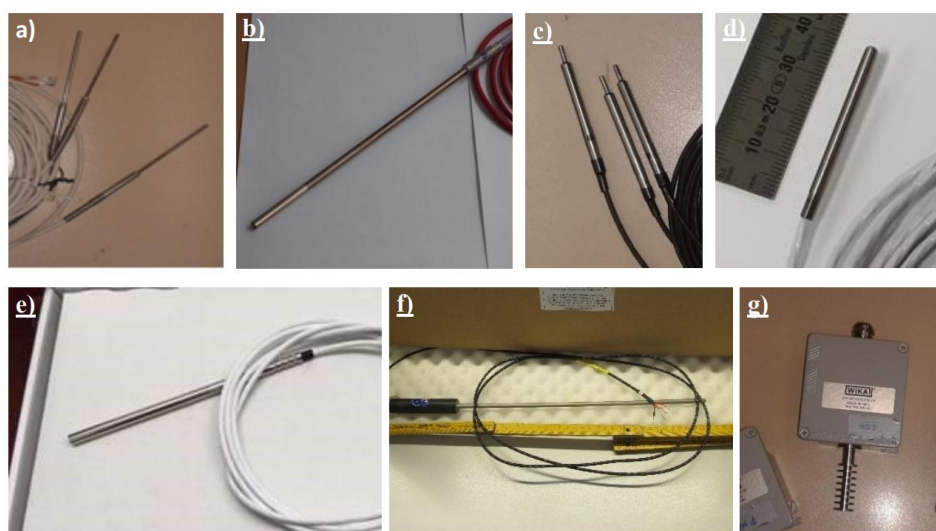
Slika 2. Metode etaloniranja u etaloniranju senzora za merenje temperature vazduha

Na poredjenju korišćena je razna oprema i najčešće metoda poređenja sa etalonskim platinskim otpornim termometrom čija je karakteristika zavisnosti otpornosti od temperature izvedena etaloniranjem metodom fiksnih tačaka na osnovu Međunarodne temperature skale ITS-90. Samo poređenje realizovano je u temperaturnim uređajima za reprodukovanje temperature sa različitim sredinama (tečnost ili vazduh). Sagledavajući tehnike etaloniranja svih zemalja učesnica ovog poređenja, može se reći da je većina koristila temperaturne komore i to danas dostupne komore proizvođača Votsch, Weiss, Kambic, Thunder Scientific, Heraeus, CTS, različitih zapremina prostora od 3 L do 1000 L. Pojedine laboratorije koristile su i temperaturna kupatila sa vodom ili etanolom kao medijum maksimalne dubine urona sa i bez dodatnih komora i najmanjih vrednosti temperaturne stabilnosti i nehomogenosti, odnosno ona kupatila koja u temperaturnom opsegu od interesa ovog poređenja unose najmanju mernu nesigurnost sredine.

Merenje električne otpornosti senzora temperature za vazduh bilo je najboljeg mogućeg nivoa za svaku laboratoriju učesnicu, pa i DMDM. Za merenje električne otpornosti svakog od senzora temperature u DMDM korišćen je otporni most ASL F16 i merna struja 1 mA. Takođe, komore koje su korišćene za etaloniranje senzora temperature u DMDM su Votsch i Thunder Scientific, korisne zapremine 250 L i 30 L, respektivno, i temperaturna kupatila sa vodom i etanolom najmanjih mernih nesigurnosti i uticaja na senzore koji se etaloniraju.

2. ARTEFAKTI POREĐENJA

Svi senzori u jednom od tri kompleta za poređenje su Pt 100 otporni termometri koji se najčešće sreću za merenje temperature vazduha u laboratorijama najvišeg novoa. U tri kompleta, za tri kruga poređenja korišćeno je ukupno 24 termometara, i to ukupno 8 različitih modela i 6 proizvođača. Detalje o učesnicima, pojedinačnim rezultatima i drugim informacijama možete naći u [2]. Većina senzora, izuzev WIKA TR60 Special, je geometrije koja staje u ćeliju za trojnu tačku vode i može se etalonirati metodama najveće tačnosti. DMDM i ostale učesnice etalonirale su maksimalno 8 senzora za merenje temperature vazduha.



Slika 3. Različiti dizajni termometara za merenje temperature vazduha na poređenju

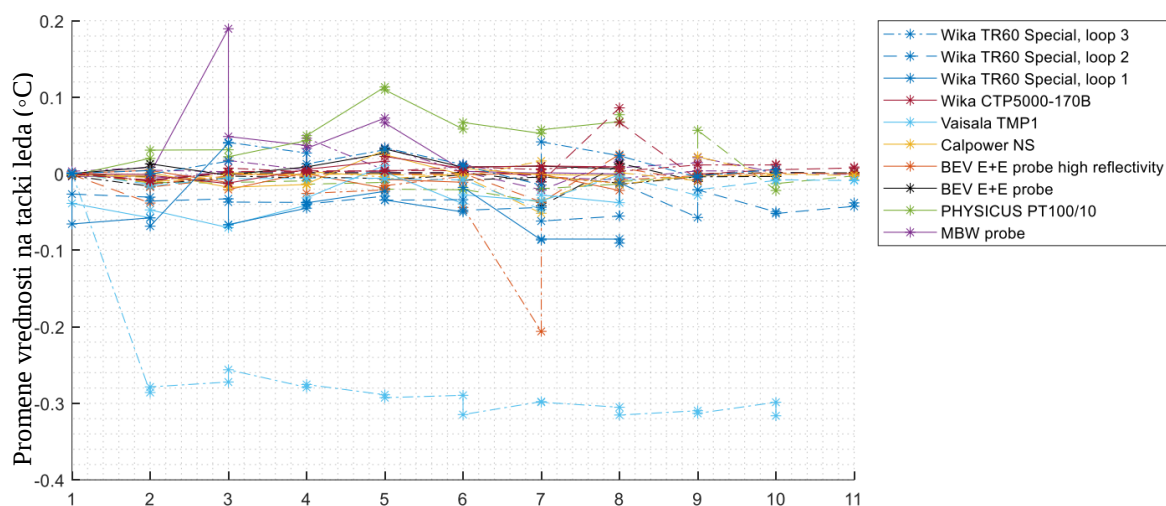
Specifičnosti senzora na poređenju su sledeće:

BEV E+E (Ø 6, L230 mm) 3 kom. BEV E+E HR (Ø 6, L230 mm) 3 kom. Calpower NS (Ø 3, L80 mm) 3 kom. MBW (Ø 3, L40 mm) 3 kom.	PHYSICUS PT100/10 (Ø 5, L117 mm) 3 kom. VAISALA TMP1 (Ø 6, L130 mm) 3 kom. WIKA CTP5000-170B (Ø 6, L350 mm) 3 kom. WIKA TR60 Special (Ø 8, L44 mm) 1 kom, (Ø 20, L62 mm) 2 kom.
---	--

3. STABILNOST SENZORA TEMPERATURE

Tokom realizacije poređenja, kod 24 učesnika realizovana su merenja svih senzora na temperaturi tačke leda, 0,1 °C, pre i posle poređenja. Prikaz rezultata merenja u tački leda dat je na slici 4 gde se vidi da postoje nekoliko primera veoma neočekivanog pomeraja senzora od 0,1 °C. Ovo se može tumačiti kao gruba greška bilo kog porekla, iz merenja i/ili prenosa rezultata etaloniranja, koju je zaista bilo nemoguće proveriti nakon završetka svih merenja.

Maksimalna promena na temperaturi tačke leda dobijna je za senzor Vaisala TMP1 u vrednosti od -0,23 °C nakon izlaganja ovog senzora na temperaturu od -40 °C [1].



Slika 4. Stabilnost senzora temperature na poređenju

4. SAMOZAGREVANJE SENZORA TEMPERATURE

Samozagrevanje senzora temperature dobijeno je merenjem električne otpornosti senzora temperature za vazduh kada kroz njega prolaze različite vrednosti električne struje [5,6]. Najčešće je samozagrevanje kod učesnika određivano korišćenjem struja od 1 mA i 1,41 mA. Laboratorije učesnice koristile su dve vrednosti struje, a neke su koristile i tri vrednosti struje za bolje određivanje veličine samozagrevanja i same nulte otpornosti senzora nakon korekcije samozagrevanja. Tipične vrednosti date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Samozagrevanje senzora

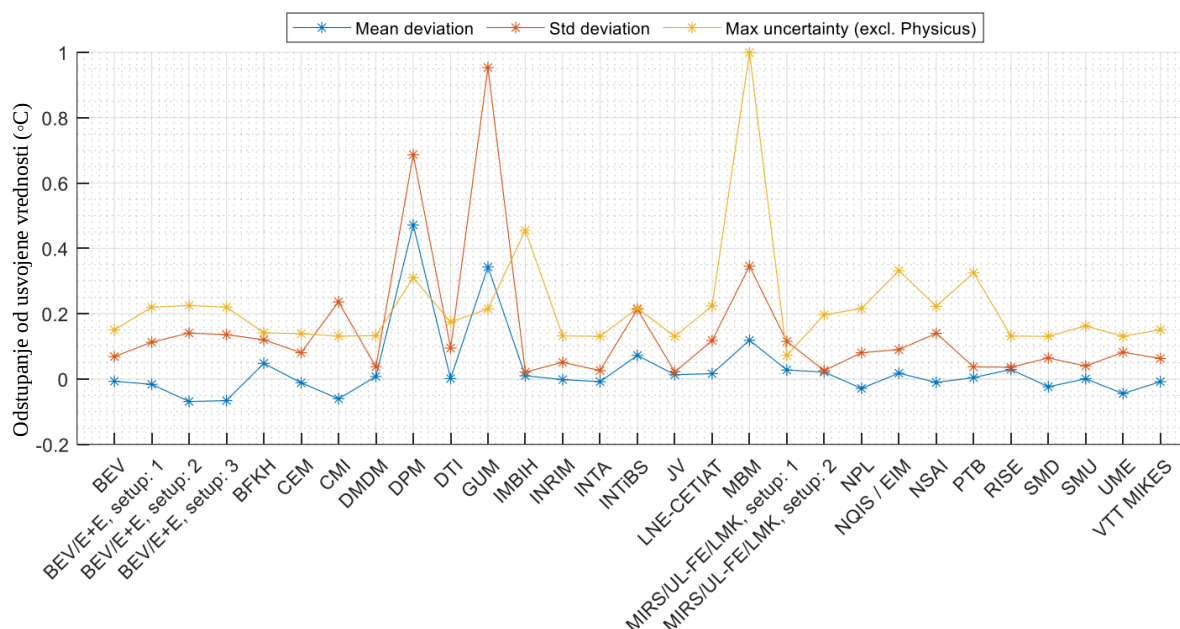
Tip senzora	Vazduh, mK	Voda, mK	Tip senzora	Vazduh, mK	Voda, mK
E+E sezor v. refl.	6	2	Calpower NS	13	4
E+E senzor	6	2	MBW	19	6
PHYSICUS PT100/10	7	2	VAISALA TMP1	18	11
WIKI CTP5000-170B	8	4	WIKI TR60 Special	23	17

Na osnovu merenja u DMDM najveće samozagrevanje od 24 mK u vazduhu i 18 mK u vodi dobijeno je za senzor WIKI TR60 Specijal, izrađen u obliku zavojnice u cilju boljeg termičkog kontakta senzora i medijuma. Takođe kod ovakvog dizajna, dimenzija senzora je prilično velika što sa druge strane smanjuje termički kontakt sa vazduhom neposredno oko senzorskog elementa. Najmanje merene vrednosti samozagrevanja u DMDM imaju E+E senzori, od 7 mK u vazduhu i 2 mK u vodi za oba tipa.

Najveća razlika vrednosti samozagrevanja u vazduhu i vodi kao medijumu dobijena je za senzore MBW proizvođača i ta razlika iznosi 13 mK. Zapravo kod ostalih senzora razlika dva samozagrevanja u vazduhu i u vodi je manja. Tipične vrednosti samozagrevanja u sredinama dobijenih na projektu su date u tabeli 1.

5. REZULTATI POREĐENJA

Nakon približno 6500 obrađenih podataka i konsenzusom usvojenih referentnih vrednosti (svaki senzor na svakoj temperaturi), dobijeni rezultati poređenja mogu se predstaviti na slici 5. prateći rezultat svake laboratorije učesnice preko srednje vrednosti - plava linija, standardne devijacije - crvena linija i maksimalne merne nesigurnosti - žuta linija, za sve senzore osim senzora PHYSICUS PT100/10 koji nije funkcionisao do kraja poređenja [1,2].



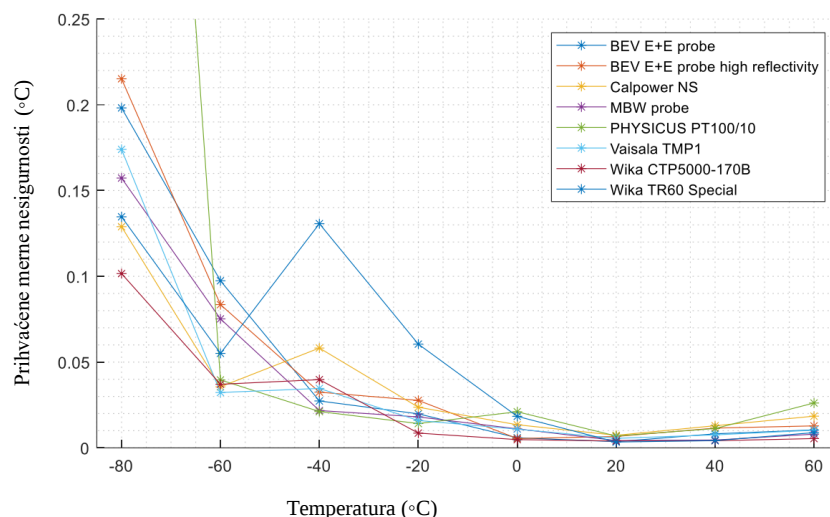
Slika 5. Rezultati poređenja

Plava linija na slici 5 pokazuje koliko se svaki učesnik poređenja nalazi daleko od uvojene konsenzusom tačne vrednosti za sve tačke prijavljenih vrednosti. Preko crvene i žute linije može se videti rasipanje vrednosti. Crvena linija pokazuje standardnu devijaciju vrednosti od usvojenih tačnih vrednosti. Male vrednosti crvene linije ukazuju da je učesnik u poređenju dosledno repordukuje performanse za ceo temperaturnih opseg, od tačke do tačke za sve senzore različitog dizajna.

6. MERNÁ NESIGUNOST

U proceni merne nesigurnosti u postupku etaloniranja senzora temperature za vazduh u temperaturnim komorama korišćene su standardne GUM metode procena nesigurnosti. U vazduhu kao medijumu za etaloniranje uračunavaju se komponente koje su uobičajene za metodu etaloniranja u komorama i to one koje potiču od korišćenog etalona (etalononaža, drift, rezolucija, rasipanje rezultata tokom merenja, samozagrevanje etalona) komponente koje potiču od uređaja za merenje otpornosti (etalonaža, drift, rezolucija), zatim komponente koje potiču od korišćene temperaturne sredine (zagrevanje refleksije zračenjem, hladjenje cirkulacijom vazduha, vremenska stabilnost, prostorna neuniformnost, dinamička temperatura, vlažnost vazduha, pritisak, odvođenje toplote i drugo) i komponente koje potiču od samog senzora (histerezis, ponovljivost etaloniranja, nelinearnost, i drugo) i naravno druge komponente. Svi senzori i minimum 1 m kabla svakog od senzora bio je smešten u komoru kod većine učesnika, tako da je komponenta protoka toplote zapravo zanemarljivo mala. Naime, treba reći da ni jedan učesnik u proračun merne nesigurnosti nije uključio nelinearnost senzora, histerezis, ponovljivost etaloniranja, kao i sam uticaj relativne vlažnosti. Razlog tome je inače veliki broj rezultata etaloniranja, na poređenju oko 480 rezultata po svakom od 26 različitih učesnika.

Tipične vrednosti mernih nesigurnosti učesnika poređenja u etaloniranju senzora temperature za vazduh za svaku vrstu senzora ponaosob može se predstaviti krivama slici 6.



Slika 6. Tipične vrednosti mernih nesigurnosti u metodama etaloniranja senzora temperature za vazduh

7. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenog poređenja u etaloniranju senzora za merenje temperature vazduha dobija se:

- Merna nesiugnost koja zavisi od temperature, i to najmanja vrednost od 20 mK dobijena je za temperature od 0 °C do 20 °C, a najveća od 200 mK za temperaturu -80 °C.
- Glavni doprinos merne nesigurnosti je uniformnost komore i ona varira od učesnika do učesnika od 1 mK do 185 mK; manje vrednosti su posledica korišćenja raznih dodataka u komorama, naročito manjih komora ili blokova ili drugih uređaja za dodatnu stabilizaciju/uniformnost temperature.
- Uticaj protoka vazduha neophodno je meriti kod komora sa ventilacijom; uticaj protoka vazduha procenjen je na 20 mK na osnovu merenja u jednoj laboratoriji učesnici.
- Maksimalni uticaj protoka toplote procenjen je na 10 mK, a kroz kablove senzora i do 25 mK.

Za smanjenje vrednosti mernih nesigurnosti na nivo dobijen u poređenju treba primeniti dodatnu satabilizaciju/uniformnost temperaturnog polja i validovati tako dobijene temperaturne sredine na stabilnost i uniformnost u novom korisnom prostoru.

LITERATURA

- [1] Å. A. F. Olsen, Data from interlaboratory comparison of air thermometer calibrations, ATM ILC, 2019-2021, Zenodo, 2023, DOI: 10.5281/zenodo. 8409783.
- [2] Åge Andreas Falnes Olsen, Dubhaltach MacLochlainn, Carmen García Izquierdo, Denis Smorgon, Regina Deschermeier, Carolyn Eckerleben, Florian Bubser, Michal Voldán, Magnus Holmsten, Peter Pavlasek, Milan Ioan Maniur, Seda Oğuz Aytekin, Paul Carroll, Stephanie Bell, Iska Kolaveri, Christina Hofstätter-Mohler, Jan Nielsen, Peter Rothmund, Reidun Anita Bergerud, Miruna Dobre, Debby Van Den Berghe, Jovan Bojkovski, Patrick Raab, Helmut Mitter, Tanja Vukićević, Alexandra Kowal, Justyna Dobosz, Semir Cohodarevic, Richard Högström, Emese Turzó-András, Eric Georgin, Rafał Jarosz, Slavica Simic, Evmorfia Kokkini, Javier de Lucas Veguillas 19.09.2023 Justervesene, Report from interlaboratory comparison of air thermometer calibration procedures EURAMET project 1459
- [3] M. Heinonen, M. Anagnostou, J. Bartolo, S. Bell, R. Benyon, R. A. Bergerud, J. Bojkovski, N. Böse, C. Dinu, D. Smorgon, K. Flakiewicz, M. J. Martin, S. Nedialkov, M. B. Nielsen, S. Oğuz Aytekin, J. Otych, M. Pedersen, M. Rujan, N. Testa, E. Turzó-András, M. Vilbaste og M. White, Comparison of Air Temperature Calibrations, International Journal of Thermophysics, vol. 35, p. 1251 – 1272, 2014.
- [4] M. de Podesta, S. Bell og R. Underwood, Air temperature sensors: dependence of radiative errors on sensor diameter in precision metrology and meteorology, Metrologia, vol. 55, p. 229 – 244, February 2018.
- [5] Evaluation of the self-heating effect in a group of thermometers used in meteorological and climate applications, Meteorol Appl, vol. 26, p. 117–129, January 2019.
- [6] Vladan Stepanović, Slavica Simić, Svetlana Staqnisljević, Efekat samozagrevanja platinskih otpornih termometara kao reference u mernim sistemima, Kongres metrologa 2019, Šabac