

Analiza in ovrednotenje rezultatov medlaboratorijskih primerjav na področju meritev temperature v okviru Svetovne meteorološke organizacije (WMO)

Gaber Begeš

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: gaber.beges@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek obravnava načrtovanje, potek in preliminarne rezultate globalne medlaboratorijske primerjave (ILC) na področju meritev temperature, ki poteka pod okriljem Svetovne meteorološke organizacije (WMO). ILC temelji na metodologiji, razviti v okviru projekta METEOMET, ki je prvič sistematično povezal meteorološke in metrološke laboratorije. V članku so analizirani podatki meritev iz več regij WMO, pri čemer se avtor osredotoča zgolj na temperaturo, čeprav je primerjava zajemala tudi vlažnost in tlak. Analiza in ovrednotenje meritev temelji na oceni vrednosti En , ki je merilo uspešnosti posameznega laboratorija v okviru primerjave. Večina laboratorijev je dosegla zadovoljive rezultate ($En \leq 1$), posamezni primeri odstopanj pa kažejo na potrebo po izboljšavah pri uporabi opreme, nastavitve programske opreme in kalibracijskih postopkov. Še zlasti izstopata regiji RA I in RA III. Prispevek potrjuje pomen enotnega pristopa k izvajanju ILC ter nujnost ustrezne izvedbe meritev in interpretacije rezultatov v laboratorijih kot orodje za nadgradnjo sistemov kakovosti in usposobljenosti meteoroloških laboratorijev po svetu. Poenotena usposobljenost je tako zagotovilo za ustrezne meteorološke in klimatske analize stanja in napovedi.

Ključne besede: ILC, temperatura, medlaboratorijska primerjava, ISO/IEC 17043, WMO

Interlaboratory Comparisons (ILC) for Temperature Measurements within the Framework of the World Meteorological Organization (WMO)

This paper presents the ongoing global interlaboratory comparison (ILC) for temperature measurement organized by the World Meteorological Organization (WMO), planned and coordinated by LMK. The ILC follows a protocol developed under the METEOMET project, which promotes cooperation between meteorological and metrological laboratories. Only temperature results are discussed, although the ILC also covers humidity and pressure. The analysis uses the En number to assess the participating laboratories' proficiency. Most laboratories demonstrated acceptable results ($|En| \leq 1$), but deviations in RA I and RA III suggest methodological or technical issues. The ILC has proven to be a valuable tool for assessing measurement competence and identifying improvement opportunities in laboratory practices.

Keywords: ILC, temperature, interlaboratory comparison, ISO/IEC 17043, WMO

1 UVOD

Zagotavljanje kakovosti meritev v meteoroloških laboratorijih je ključno za zanesljivo spremljanje podnebnih sprememb in vremenskih pojavov. Merjenja, ki jih izvajajo Nacionalne meteorološke in hidrološke

službe (NMHS), so osnova za kritične odločitve na področjih varstva okolja, varnosti in gospodarstva. Temelj zaupanja meritvam je njihova sledljivost do mednarodnih standardov, kot to zahteva mednarodni standard ISO/IEC 17025, ki določa splošne zahteve za usposobljenost preizkuševalnih in kalibracijskih laboratorijev. Eden pomembnejših mehanizmov za preverjanje in potrjevanje usposobljenosti laboratorijev so medlaboratorijske primerjave (ILC), ki so definirane v standardu ISO/IEC 17043. Te primerjave omogočajo objektivno oceno kakovosti laboratorijskih rezultatov ter identifikacijo in odpravljanje morebitnih napak pri postopkih merjenja in kalibracije. Ovrednotenje rezultatov je statistično zahtevno, zato smo se zgledovali po dobrih praksah, v katerih je sodeloval tudi LMK. [1–4] Celotna aktivnost globalnih medlaboratorijskih primerjav (ILC) v tem prispevku izvira iz evropskega projekta METEOMET, v okviru katerega je LMK razvil protokol in postopek za izvedbo primerjav osnovnih meteoroloških veličin. Svetovna meteorološka organizacija (WMO) je rezultate tega projekta prepoznala kot ključne za zagotavljanje globalne sledljivosti in jih podprla kot nujno potrebne za izvedbo ILC na globalni ravni pod koordinatstvom Laboratorija za metrologijo in kakovost (LMK) na Fakulteti za elektrotehniko. V tem kontekstu ima Svetovna

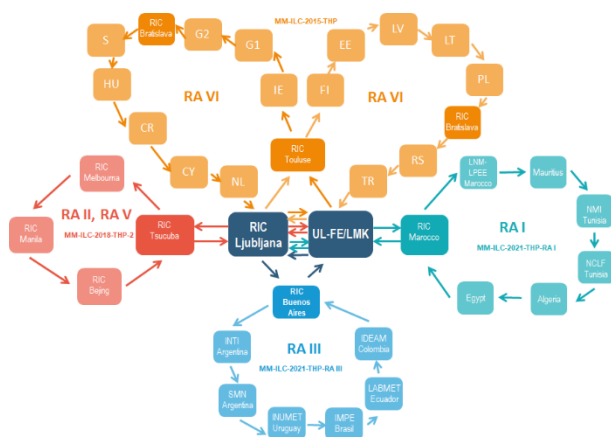
Prejet: 7. maj, 2025

Odobren: 28. maj, 2025



Avtorske pravice: © 2025
Creative Commons Attribution 4.0
International License

meteorološka organizacija (WMO) ključno vlogo pri globalnem usklajevanju meritev osnovnih meteoroloških veličin, kot so temperatura, relativna vlaga in tlak. S pomočjo regionalnih asociacij (RA) izvajamo globalno usklajene interlaboratorijske primerjave, ki omogočajo medsebojno primerljivost in sledljivost meritev. V okviru tega članka obravnavam rezultate medlaboratorijskih primerjav na področju merjenja temperature, kot prikazuje slika 1, izvedenih v različnih regijah WMO (RA I, RA II, RA III, RA V in RA VI), s posebnim poudarkom na izzivih in ugotovitvah, ki lahko prispevajo k izboljšanju kakovosti meritev v prihodnje.



Slika 1: Struktura izvedbe globalne ILC.

2 IZVEDBA ILC

Medlaboratorijske primerjave so bile izvedene skladno s protokolom in metodologijo, ki sta bila razvita v okviru evropskega projekta METEOMET. Protokol izvedbe ILC določa vse potrebne korake, vključno s kalibracijo opreme, postopki izvedbe meritev, transportom opreme med laboratoriji in načinom poročanja rezultatov. Natančen opis teh korakov je dostopen v poročilih IOM št. 128 [5] in 134 [6].

2.1 Uporabljena merilna oprema

Pri izvedbi primerjav sposobnosti kalibracije merilnikov temperature v okviru regij WMO so sodelovali nacionalni kalibracijski laboratoriji in nacionalni meteorološki in hidrološki laboratoriji NMHS. Uporabljena oprema za področje temperature sta bila dva termometra Pt100 z možnostjo štirižičnega merjenja upornosti ELPRO serijska številka 395090316 in 395100316, v nadaljevanju senzor 09 in 10. Prek priključnega modula sta bila vsak posebej priključena na merilnik s prikazovalnikom Agilent/HP 34420A. Podrobnosti prikazuje tabela 1. Ta kombinacija omogoča izredno natančno merjenje temperature z zmanjšanim vplivom upornosti povezovalnih vodnikov. Umerjanje se je izvajalo v smislu indikacijskega instrumenta, torej senzor skupaj z merilnikom oziroma prikazovalnikom. Za pretvorbo izmerjene upornosti v temperaturo je bil v instrumentu uporabljen koeficient 385, skladno s

standardom IEC 60751, ki definira razmerje med upornostjo in temperaturo.

Tabela 1: Podatki o merilni opremi

Podrobnosti merilne opreme

Merjena veličina	temperatura
Merilni instrument	Hewlett Packard 34420A, MY42002060
Temperaturni senzor	ELPRO 2210 4700/X, PT100 395090316, 395100316
Merilne točke	(-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40) °C
Točnost	0,05 °C pri 20 °C
Negotovost	0,03 °C
Merilna globina potopitve	150 mm

V postopku ILC je podroben opis ravnanja z opremo tako v smislu varnega transporta kot tudi uporabe merilne opreme. Sam postopek kalibracije je vsak laboratorij izvedel po lastnih navodilih, način uporabe opreme pa je bil natančno določen. Da bi se izognili morebitnim nevednostim ali nevedski uporabi merilnika, je bil sistem kalibriran kot indikacijski merilnik temperature. To pomeni, da je uporabnik povezal senzor z merilnikom prek priključnega bloka, vključil merilni instrument, izbral funkcijo merjenja temperature in odčitaval prikazano temperaturo na prikazovalniku. Merilnik lahko deluje pri evropski standardni napajalni napetosti 230 V oz. 50 Hz ali pri ameriški standardni napetosti 110 V oz. 60 Hz.

Na sliki 2 sta senzor, priključen na povezovalno ploščo, in merilni instrument/prikazovalnik.



Slika 2: Termometer Elpro 2210 in prikazovalnik HP 34420A.

2.2 Matematična analiza rezultatov

Za ocenjevanje uspešnosti laboratorijev je bilo skladno s standardom ISO/IEC 17043 uporabljeno število E_n , definirano kot

$$E_n = \frac{x_{\text{lab}} - x_{\text{ref}}}{\sqrt{u_{\text{lab}}^2 + u_{\text{ref}}^2}} \quad (1)$$

kjer je:

x_{lab} – rezultat meritve laboratorija,

x_{ref} – referenčna vrednost,

U_{lab} – razširjena negotovost laboratorijske meritve,

U_{ref} – razširjena negotovost referenčne vrednosti.

Merilo za oceno učinkovitosti temelji na kriteriju, ki je definiran v standardu:

$$\begin{aligned} |E_n| \leq 1 &\rightarrow \text{zadovoljivo} \\ |E_n| > 1 &\rightarrow \text{nezadovoljivo} \end{aligned}$$

Izračun referenčne vrednosti (x_{ref}) in z njo povezana negotovost temeljita na uteženi sredini vrednosti podatkov referenčnih laboratorijev posamezne primerjave, kot sledi:

$$x_{\text{ref}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{lab},i}}{u^2(x_{\text{lab},i})}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_{\text{lab},i})}} \quad (2)$$

$$u^2(x_{\text{ref}}) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_{\text{lab},i})}} \right) + \left(\frac{\max_j |x_{\text{lab},j,1} - x_{\text{lab},j,2}|}{2\sqrt{3}} \right)^2 \quad (3)$$

kjer so:

x_{ref} – referenčna vrednost,

$x_{\text{lab},i}$ – izmerjena vrednost referenčnega laboratorija,

$u(x_{\text{lab},i})$ – razširjena negotovost laboratorijske meritve,

$u(x_{\text{ref}})$ – razširjena negotovost referenčne vrednosti,

$x_{\text{lab},j,1}$ – izmerjena vrednost pri začetni kalibraciji referenčnega laboratorija,

$x_{\text{lab},j,2}$ – izmerjena vrednost pri končni kalibraciji referenčnega laboratorija.

Vsak referenčni laboratorij je izvedel meritve na začetku ILC in po končani ILC. S tem se je dodatno ugotavljalo, ali je prišlo do morebitne spremembe kazanja oziroma tako imenovanega lezenja senzorjev.

2.2.1 Pretvorba upornosti v temperaturo

Za pretvorbo upornosti, izmerjene s štirižično (4-wire) metodo za sondo Pt100, v temperaturo, običajno uporabljamo standard IEC 60751, ki definira razmerje med upornostjo in temperaturo za platinaste uporovne senzorje. Gre za štirižično merjenje, ki izniči vpliv upornosti povezovalnih vodnikov, zato je izmerjena vrednost zelo natančna in jo uporabimo neposredno. Pri pretvorbi je treba upoštevati standardno enačbo in koeficiente enačbe. Obstajata tako imenovani standardni nastavitvi 385 in 391, ki sta odvisni od čistosti uporabljenega materiala za uporovni senzor Pt100. Senzorji, ki smo jih uporabljali pri meritvah, imajo specifičan koeficient 385. Pri pretvorbi izmerjene upornosti v temperaturo je treba upoštevati primerno enačbo (4) in konstante glede na to, v katerem temperaturnem območju se meri; v enačbi uporabimo konstanti A in B (0 °C do 850 °C), konstanto C pa kadar gre za temperature od -200 °C do 0 °C. Izračun se izvede numerično ali z razpoložljivim spletnim orodjem.

$$R_t = R_0[1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3] \quad (4)$$

kjer je:

$$R_0 = 100 \, \Omega \quad (\text{pri } 0 \, ^\circ\text{C})$$

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \, ^\circ\text{C}^{-4} \quad (\text{uporablja se le pod } 0 \, ^\circ\text{C})$$

Kadar gre za preračun temperature iz upornosti po koeficientu 391, pa veljajo konstante:

$$A = 3,9692 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$$

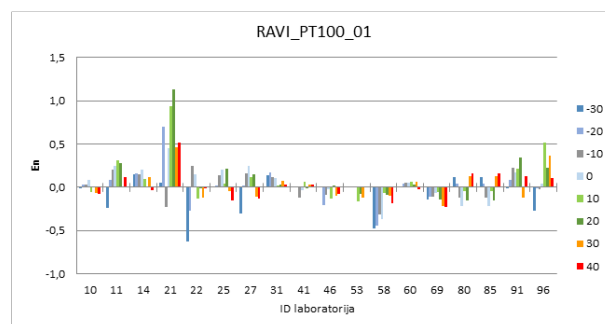
$$B = -5,8495 \cdot 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,330 \cdot 10^{-12} \, ^\circ\text{C}^{-4} \quad (\text{uporablja se le pod } 0 \, ^\circ\text{C}).$$

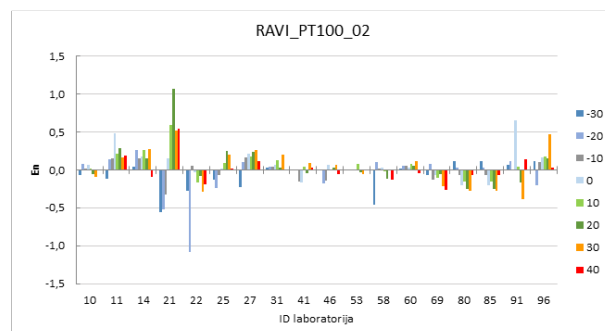
3 REZULTATI IN ANALIZA

3.1 Pregled rezultatov meritev temperature ILC

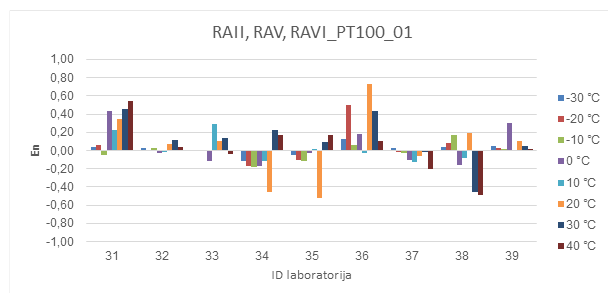
Rezultati medlaboratorijskih primerjav na področju meritev temperature iz regij RA VI [1], RA II, V in VI [2], RA I ter RA III so pokazali visoko stopnjo skladnosti večine laboratorijev. Podrobne rezultate prikazujejo slike 3–10, ki kot merilo predstavljajo E_n število. V posamezni ILC smo uporabili dva termometra, termometer z oznako PT100_01 in termometer z oznako PT100_02, sodelovali pa so lahko laboratoriji različnih regij WMO ali pa laboratoriji samo ene regije. Na prvih štirih slikah so laboratoriji po dogovoru s samega začetka ILC označeni s števkami (anonimno).



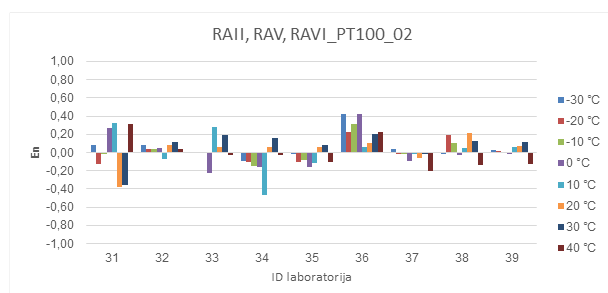
Slika 3: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAVI, termometer PT100_01.



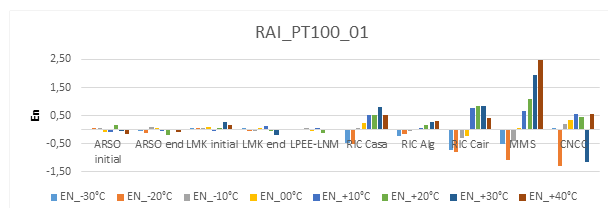
Slika 4: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAVI, termometer PT100_02.



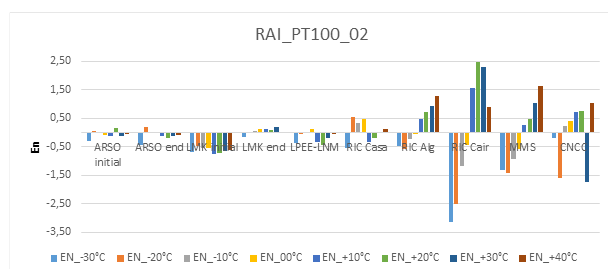
Slika 5: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAII, RAV, RAVI, termometer PT100_01.



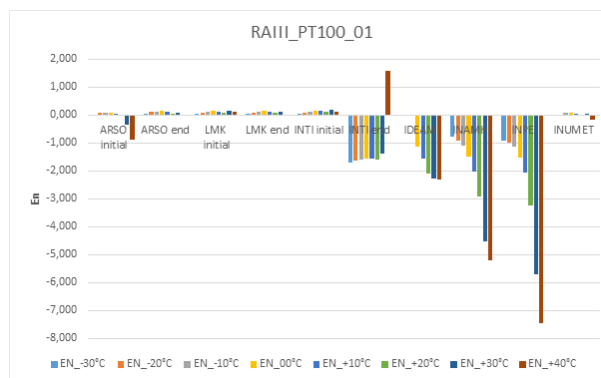
Slika 6: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAII, RAV, RAI, termometer PT100_02.



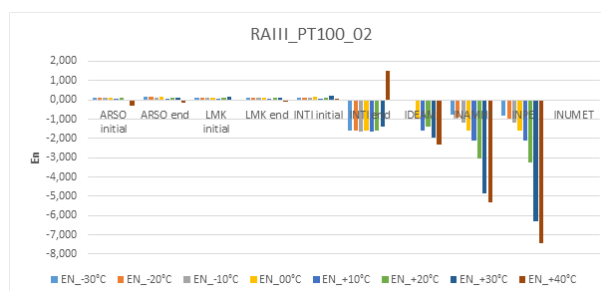
Slika 7: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAI, termometer PT100_01.



Slika 8: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAI, termometer PT100_02.



Slika 9: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAIII, termometer PT100_01.

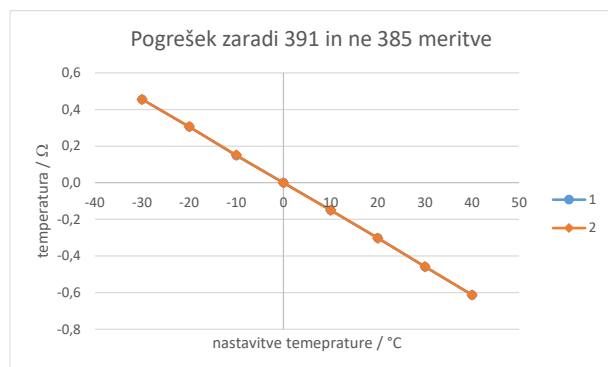


Slika 10: Rezultati uspešnosti laboratorijev v regiji RAIII, termometer PT100_02.

Večina laboratorijev je dosegla zadovoljive rezultate ($|En| \leq 1$), kar kaže na visoko raven kakovosti in sledljivosti meritev. Kljub temu pa so bile v nekaterih laboratorijih zaznane določene nepravilnosti in odstopanja ($|En| > 1$). V regiji RAVI je en laboratorij izstopal glede na število En. V regiji RAII in RAV ni bilo odstopanj. V regiji RAI je odstopalo pet laboratorijev. Izstopajoče težave smo zabeležili predvsem v regiji RA III, kjer je več laboratorijev izkazalo visoko vrednost števila En, kar kaže na potencialne sistemske napake pri merilnih postopkih. Podrobnejše analize so pokazale razlike v pristopih meritev, kot so upoštevanje standarda 385 namesto 391, različni načini meritev (2 W in 4 W), uporaba različnih medijev (klimatska komora proti kalibracijski kopeli) ter potencialni vplivi motenj EMC in napajalnih napetosti. Posamezna problematika je podrobneje prikazana v nadaljevanju.

3.2 Problematika koeficientov 385 in 391

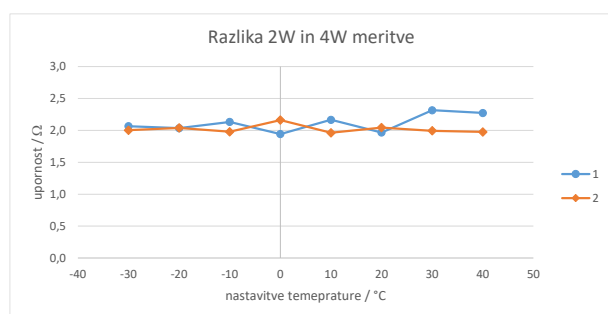
Za preračun upornosti uporovnih termometrov v temperaturo se uporablja standard 385 ali 391, to pa je odvisno od specifikacije proizvajalca glede na izdelavo termometra. Nekateri laboratoriji so kljub drugačnim navodilom v protokolu ILC ponastavljali nastavitve v merilniku HP 34420A. Posledično je zaradi spremenjenega standarda s 385 na 391 v nastavitvah lahko prišlo do napake, ki je prikazana na sliki 11.



Slika 11: Napaka termometra PT100_01 in PT100_02 pri meritvah po standardu 391.

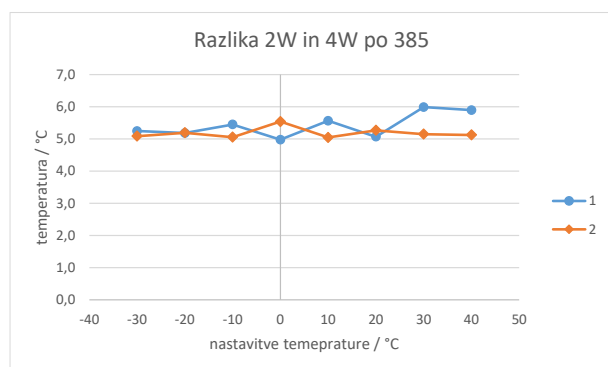
3.3 Problematika meritev 2W in 4W

Kljub jasnim navodilom v protokolu ILC so nekateri sodelujoči laboratoriji meritve izvajali na poseben način. Nekateri so odčitavali upornost na zaslonu prikazovalnika, drugi so izvajali meritve prek komunikacije RS232, tretji pa z uporabo komercialne programske opreme. Skupna težava vseh je bila, da so pri tem namesto štirizložno (4 W) lahko merili na drugačen način, običajno dvožložno (2 W) upornost. To pa prinaša konkretno razliko v rezultatu. Na sliki 12 je prikaz odstopanja, če merimo na način 2 W ali 4 W.



Slika 12: Napaka termometra PT100_01 in PT100_02 pri meritvah 2 W in 4 W.

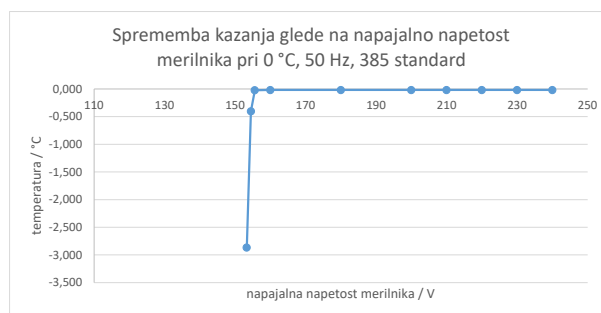
Razliko v izmerjeni upornosti na način 2 W in 4 W lahko pretvorimo v temperaturo in jo prikazemo na sliki 13.



Slika 13: Napaka termometra PT100_01 in PT100_02 pri meritvah 2 W in 4 W.

3.4 Problematika vpliva napajalne napetosti merilnika

Pri ugotavljanju možnih razlogov za odstopanje rezultatov več laboratorijev v regiji RAIII smo zaznali tudi uporabo merilnega inštrumentarija pri različnih napajalnih napetostih. V regiji je namreč standardna napetost 110 V oz. 60 Hz. Teoretično naj to ne bi vplivalo na rezultat, vendar smo kljub temu simulirali spremenjeno napajanje merilnika HP 34420A. Pri konstantni frekvenci 50 Hz smo po korakih zmanjševali napajalno napetost od 240 V do 148 V tam, kjer smo zaznali resno spremembo v kazanju instrumenta. Na sliki 14 je prikazan potek izmerjene temperature v odvisnosti od napajalne napetosti merilnika. Rezultati kažejo, da se sprememba zazna pri 160 V, pri 154 V je že v rangu 0,5 °C, potem pa se merjena temperatura skokovito spremeni.



Slika 14: Napaka termometra PT100_01 in PT100_02 pri meritvah 2 W in 4 W.

4 DISKUSIJA

Največja odstopanja so se pokazala v WMO-regiji RA III. Po vrstnem redu laboratorijev, ki ne dosejajo zahtev za En, je prvi za medij, kjer so kalibrirali termometre, uporabil klimatsko komoro; drugi so merili v kalibracijskih kopelih. Meritev so izvajali avtomatsko prek RS 232, in to s konfiguracijo ukaza: MEASure:TEMPerature? (2 W). Merilni instrument je bil napajan na 220 V oz. 50 Hz. Drugi laboratorij je za umerjanje uporabil tekočinsko kopel. Meritev so izvedli po navodilih za izvedbo, in sicer z odčitavanjem rezultatov temperature iz prikazovalnika merilnika, pri čemer pa ne navajajo, ali z nastavitvijo 385 ali 391. Napajalna napetost instrumenta je bila 220 V oz. 50 Hz. Podatki senzorja 2 niso bili sporočeni. Tretji laboratorij je izvajal meritve v kalibracijski kopeli. Meritve so izvajali prek RS 232 s konfiguracijo ukaza MEASure:TEMPerature? FRTD (4 W). Napajalna napetost instrumenta je bila 220 V oz. 50 Hz. Izvedli so tudi predhodne meritve v točki ledišča, kjer je referenčni termometer kazal 0,0014 °C, senzor Elpro09 = 0,5277 °C in Elpro10 = 0,4776 °C, kar je neobičajno odstopanje in kaže na zunanji vpliv, lahko tudi vpliv EMC. Četrti laboratorij je uporabil kalibracijsko kopel in odčitaval

temperaturo neposredno z zaslona. Napajalna napetost merilnika je bila 110 V oz. 60 Hz. Peti laboratorij je kalibracijo izvajal v klimatski komori. Meritve so izvajali prek RS 232, uporabili so komercialno programsko opremo proizvajalca Keysight Trial License za BV9001B-TRL. Napajalna napetost merilnika je bila 110 V oz. 60 Hz.

Iz rezultatov lahko sklepamo, da je velika verjetnost, da so nekateri laboratoriji merili pri nastavljenem koeficientu 385, drugi pa pri 391. Ni pa mogoče jasno ugotoviti, kaj je nastavitev spremenilo. Lahko jo je spremenila uporaba komercialne programske opreme, vendar laboratoriji tega niso preverili.

Pri pridobivanju podatkov prek RS 232 ali GPIB lahko pride do dodatnih težav, če se ne uporabi ustreznih navodil [7]. Na strani 165 v [7] je pojasnilo, kako mora biti videti ukaz za štirizično merjenje temperature. Ukaz MEASure:TEMPerature? na primer odčita samo temperaturo zadnje nastavljene sonde. Ukaz mora biti MEASure:TEMPerature? FRTD, ki jasno označuje štirizilni RTD. Pri tem gre za LowPower režim delovanja.

Analiza rezultatov potrjuje pomembnost konsistentne uporabe protokola ILC in tehničnih nastavitev opreme, uporabljene v ILC. Ugotovili smo, da so se nekatera odstopanja pojavila tudi v laboratorijih, ki so sicer izvajali meritve v ustreznih medijih, a niso upoštevali popolne enotnosti metod. Pri tem izstopa razlika med laboratoriji, ki so uporabili avtomatizirane postopke zajema podatkov prek RS232/GPIB, in tistimi, ki so rezultate ročno odčitavali – kar postavlja vprašanje o obnovljivosti in sledljivosti avtomatiziranih merilnih nizov.

Ugotovili smo tudi, da se lahko določenim napakam izognemo le s sistematično validacijo nastavitev programske opreme, zlasti če ta omogoča dinamično spreminjanje koeficientov ali internega pretvornika (npr. 385 ↔ 391). To postane ključno pri uporabi generične programske opreme, kjer uporabnik nima vedno popolnega nadzora nad parametri.

In ne nazadnje, razlike v napajalni napetosti in posledični vplivi na stabilnost prikazovalnika kažejo na potrebo po razširjenih internih testih instrumentov pred začetkom ILC. Vse to potrjuje, da ILC ni le preizkus primerljivosti rezultatov, ampak dragocen instrument za izboljšanje celotnega sistema kakovosti v laboratorijih. Naloga posameznega laboratorija pa bo seveda, da po končni ILC preveri svojo usposobljenost, ki jo izkazuje število *En*, in analizira, kaj pri njegovih postopkih, opremi, osebju in okolju lahko povzroča potencialno odstopanje od preostalih.

5 ZAKLJUČEK

Globalna medlaboratorijska primerjava (ILC) na področju merjenja temperature, ki poteka v okviru WMO, še ni v celoti zaključena. V tem prispevku so predstavljeni preliminarni rezultati, ki pa že omogočajo prve vpoglede v merilno usposobljenost laboratorijev v

posameznih regijah. Končna analiza, zlasti za regiji RA I in RA III, bo mogoča šele po potrditvi vseh rezultatov sodelujočih laboratorijev.

Osrednja ideja ILC izhaja iz projekta METEOMET, kjer je bila prvič celovito zasnovana povezava med meteorološkimi in metrološkimi laboratoriji. Ta pristop se je izkazal kot ključnega pomena za zagotavljanje sledljivosti meritev v vseh regijah WMO. Čeprav je ILC zajemal tudi vlažnost in tlak, se ta članek osredotoča izključno na temperaturo, kjer je bilo mogoče jasno izkazati uspešnost laboratorijev prek vrednosti *En*.

Rezultati kažejo, da večina laboratorijev deluje znotraj dopustnih mej. Hkrati pa je ILC orodje za samooceno: vsak laboratorij mora svoje rezultate analizirati in – če je $En > 1$ – sprožiti ustrezne izboljšave v sistemu kakovosti. S tem ILC presega funkcijo preverjanja in postaja katalizator za trajno izboljševanje kompetenc v meteorološki meroslovni skupnosti.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se vsem sodelujočim laboratorijem v analizi ILC in posameznim izvajalcem meritev.

LITERATURA

- [1] D. Hudoklin et al. Novel approach to reducing uncertainty of drift estimate in international comparisons of relative humidity scales. *Metrologia*. 2023, vol. 60, no. 5, str. 1–12.
- [2] D. Hudoklin, Zanesljivost impedenčnih vlagomerov: medlaboratorijska primerjava evropskih nacionalnih etalonov vlažnosti, *Elektrotehniški vestnik*, 91(4), str. 151–156, 2024.
- [3] D. Hudoklin et al. EURAMET 1382: Comparison of the realisations of the dew-point temperature in the range from -40 °C to 20 °C, EURAMET, 2016.
- [4] R. Deschermeier et al., Comparison in humidity (dew-point temperature high range) dew point temperature +30 °C to 95 °C, *Metrologia*, 61(1A), 03008, 2024.
- [5] J. Bojkovski, J. Dmnovšek, D. Grošelj and G. Beges, Interlaboratory Comparison in the Field of Temperature, Humidity and Pressure in the WMO Regional Association VI (MM-ILC-2015-THP), Instruments and Observing Methods Report No. 128, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018.
- [6] K. Nakashima, F. Barcenas, I. Dollery, D. Grošelj, A. Merlone, X. Nan, J. Bojkovski and G. Beges, Interlaboratory Comparison in the Field of Temperature, Humidity and Pressure in the WMO Regional Associations II, V and VI (MM-ILC-2018-THP-2), Instruments and Observing Methods Report No. 134, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2021.
- [7] Keysight Technologies, 34420A Nano Volt/Micro Ohm Meter User's Guide, 7th ed., May 2023. Dostopno na spletu: <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-01535/user-manuals/9018-01535.pdf> (6.5.2025)

Gaber Begeš je leta 2009 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Deluje na področju merjenja in tehniške kakovosti. V okviru raziskovalnega dela v laboratoriju se ukvarja z avtomatizacijo merilnih procesov, implementacijo sistemov kakovosti v realno življenje in s preskušanjem varnosti električnih proizvodov ter sodeluje pri vzdrževanju akreditacije na področju preskušanja in kalibracijske dejavnosti v Laboratoriju za metrologijo in kakovost na Fakulteti za elektrotehniko. Aktiven je pri medlaboratorijskih primerjavah na različnih področjih. Pomemben del raziskovalnega dela posveča okoljskim merilnikom v smislu ovrednotenja točnosti in merilne negotovosti.