

DIREKCIJA ZA MERE I DRAGOCENE METALE U MEĐUNARODNOM POREĐENJU ETALONIRANJA ETALONSKIH TERMOPAROVA

Slavica Simić, Vladan Stepanović, Svetlana Stanisavljević

Ključne reči: mogućnost merenja i etaloniranja, termopar, metod fiksnih tačke

KRATAK SADRŽAJ

U radu je prikazana evaluacija rezultata etaloniranja termopara za metodu fiksnih tačka nacionalne metrološke institucije u Republici Srbiji, Direkcije za mere i dragocene metale - DMDM na međunarodnom poređenju. Organizacija poređenja, sama merenja i analiza rezultata učešća 19 zemalja iz regiona Evrope i Egipat dokumentovana su u finalnom izveštaju međunarodnog poređenja EURAMET.T-S3.

U DMDM svake godine etaloniraju se razni tipovi etalonskih termoparova (Au-Pt, S, R tip) skoro svih akreditovanih laboratorija u oblasti termometrije i onih koji se koriste u pojedinim industrijama. Unapređenjem merne mogućnosti kao rezultat ovog poređenja osnov je za unapređenje i mernih mogućnosti ne samo u akreditovanim laboratorijama, nego i u industriji.

DIRECTORATE OF MEASURES AND PRECIOUS METALS IN INTERCOMPARISON OF STANDARD THERMOCOUPLE CALIBRATION

Slavica Simić, Vladan Stepanović, Svetlana Stanisavljević

Keywords: calibration measurement capabilities, thermocouple, fixed point methods

ABSTRACT

This paper presents the evaluation of the results of thermocouple calibration for the fixed point method in the national metrological institution in the Republic of Serbia – Directorate of measures and precious metals-DMDM. The organization of the comparison, measurements and the analysis of results are documented in the final report of the international comparison EURAMET.T-S3 between 19 countries in Europe region.

In DMDM various types of standard thermocouples (Au-Pt, Pt-Pd, S and R type) of almost all accredited laboratories in the scope of field of thermometry and industry are calibrated every year. The improvement of measurement capabilities in this part is the basis for the improvements of measurement capabilities not only in accredited laboratories, but also measurement capabilities in industry level.

UVOD

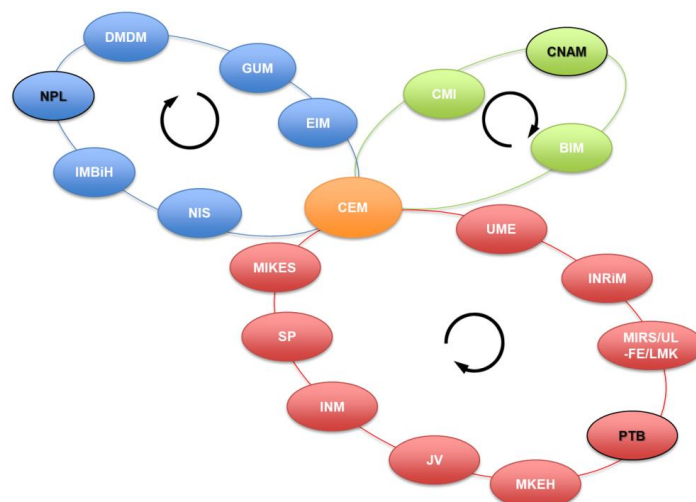
Međunarodno poređenje započeto je 2013. godine na godišnjem sastanku Tehničkog komiteta za termometriju TC-T u okvirima rada regionalne metrološke organizacije RMO EURAMET i bazi podataka registrovano kao projekat *EURAMET Project N° 1268 – Etaloniranje termoparova u opsegu temperatura od temperature očvršćavanja cinka (419.527 °C) do temperature topljenja eutektične tačke paladijuma Pd-C(1492 °C)*. Nakon sedam godina, 2020. rezultati poređenja nakon evaluacije na najvećem nivou tehničke ekspertize objavljen je izveštaj u KCDB BIPM bazi poređenja kao EURAMET.T-S3 dopunsko poređenje, a i u časopisu Metrologija, Volume 57, Number 1A. Ovaj rad sadržaće pregled rezultata i evaluaciju rezultata učešća DMDM u odnosu na postojeće mogućnosti merenja i etaloniranja CMC. Rezultati drugih zemalja nisu predmet ovog rada.

ORGANIZACIJA POREĐENJA I POZICIJA DMDM

Poređenje EURAMET.T-S3 organizovano je u 3 nezavisna kruga u kojima je učestvovalo 19 zemalja. Koordinator poređenja je bila Dolores del Campo, do skora kontakt osoba iz oblasti termometrije ispred španskog nacionalnog instituta, CEM i predsedavajuća Tehničkog komiteta-T. CEM kao pilot i link laboratorija učestvovala je u sva tri kruga (crveni, plavi i zeleni), dok je DMDM bila deo plavog kruga, zajedno sa drugim nacionalnim metrološkim institucijama iz Engleske (NPL - kopilot), Poljske, Grčke, Egipata i Bosne i Hercegovine. Ostale zemlje učesnice pripale su crvenom krugu (PTB-kopilot) i zelenom krugu (LNE-CNAM- kopilot). Realizacija poređenja predstavljena je na slici 1, [1].

Sama realizacija merenja u DMDM na etaloniranju dva Pt-Pd termopara, oznaka NPL/TS3/01 (do 1500 °C) i NPL/TS3/02 (do 1100 °C), odvijala se u periodu od februara do marta 2014. godine. Etaloniranje oba termopara sprovedeno je metodom fikskih tačaka mereći elektromotornu silu (emf) na temperaturi očvršćavanja cinka (419.527 °C), temperaturi očvršćavanja aluminijuma (660.323 °C), temperaturi očvršćavanja srebra (961.78 °C) i temperaturi očvršćavanja bakra (1084.62 °C) prvo od najveće temperature do najmanje, dok je hladni kraj oba termopara ržana na tački leda.

Pre samog postupka etaloniranja u DMDM sproveden je test određivanja nehomogenosti termopara uranjanjem i izranjanjem u i iz jame fiksne tačke srebra u trenutku realizovane tačke očvršćavanja. Takođe prema usvojenom protokolu poređenja DMDM nije sprovodila dodatna žarenja, odnosno izlaganja temperaturama koje nisu deo same procedure merenja.



Slika 1. Šema realizacije poređenja EURAMET poređenja u etaloniranju termoparova najviše klase tačnosti- termoparova od čistih metala

1. REALIZACIJA MERENJA U DMDM

Metoda direktnog merenja na temperaturi očvršćavanja fiksnih tačaka prema Međunarodnoj temperaturnoj skali ITS-90 je metoda etaloniranja koja se koristi u većini nacionalnih metroloških institucija radi obezbeđenja sledivosti rezultata merenja najvišeg mogućeg nivoa, ne samo za ovaj tip



FP ITS-90	TP Hg	MP Ga	FP In	FP Sn	FP Zn	FP Al	FP Ag
$U(k=2)$, mK	1	0.8	2.4	2.2	2.7	3.7	11

Slika 2. Direktna metoda merenja na temperaturi fiksnih tačaka koristeći nacionalne etalone u DMDM

senzora već za etalone temperature i merenja temperature uopšte [2]. Za realizaciju ove metode, neophodno je postojanje fiksnih tačaka čistih ili eutektičkih metala, interpolacionih etalona i uspostavljen optimalni postupak tehnike grejanja i hlađenja do realizacije i detekcije faznog prelaza očvršćavanja čistih metala ili faznog prelaza topljenja u slučaju eutektičnih fiksnih tačaka. Razvijena metoda etaloniranja termopara u DMDM podrazumeva korišćenje zatvorenih fiksnih ćelija čistih metala od In, Sn, Zn, Al, Ag i Cu. Pomenuti nacionalni etaloni sa ostalima sa Ga, Hg i TPW čine srpsku temperaturnu skalu po ugledu na Međunarodnu temperaturnu skalu ITS-90. Primenjena metoda podrazumeva specifičnu jedinstvenu proceduru grejanja i hlađenja u specifičnim višezonskim pećima, vodeći računa na podhlađenje svakog metala u ćeliji.

Detektovanje platoa očvršćavanja sprovedeno je merenjem sa interpolacijskim etalonima skale. U DMDM se kao interpolacioni etaloni koriste i SPRT i HT-SPRT i Au-Pt zavisino od temperature koja se realizuje i targetovne merne nesignosti za potrebe etaloniranja. Vreme trajanja platoa je od 3 h do 5 h, a sama etaloniranja sprovedena su prema dobroj laboratorijskoj praksi na platou svake tačke u trenucima kada se imalo od 40% do 60% platoa. Monitoring platoa rađen je interpolacionim etalomom i mernim mostom F16. Monitoring generisane elektromotorne sile etaloniranog termopara uzorka poređenja sa hladnim kraje na temperaturi tačke leda rađen je nanovoltmetrom HP34420A na tri nezavisne realizacije temperaturnog platoa. Iskorišćeni led od demineralizovane vode realizovan u DMDM laboratoriji i prethodno je ispitivanjem ustanovljeno da njegova temperatura iznosi $-0,001\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,002\text{ }^{\circ}\text{C}$ u postojećim uslovima čuvanja i održavanja u laboratoriji DMDM. Sama merenja elektromotorne sile i procena merne nesigurnosti u postupku etaloniranja zasnovana su na tehničkom koncenzusu na najvišem tehničkom nivou datom u protokolu poređenja, uključujući i odgovarajuće EURAMET vodič za sprovođenje etaloniranja ove vrste senzora. Nanovoltmetar HP34420A je etaloniran u DMDM u Laboratoriji za jednosmerni napon, obezbeđujući sledivost rezultat merenja u domenu jednosmernog napona.

Tabela 1. Evaluacija rezultata DMDM za uzorak NPL/TS3/01 na poređenju na osnovu

FP	tref ($^{\circ}\text{C}$)	emf (μV)	y (μV)	u(y) (μV)	y- \bar{y} (μV)	$u(y- \bar{y})$ (μV)	di	k
Zn	419.527	2986.56	2986.56	0.64	1.22	1.33	0.92	1
Al	660.323	5816.69	5816.69	1.13	2.44	2.11	1.16	2
Ag	961.78	10859.44	10859.44	2.05	-1.04	2.89	0.36	1
Cu	1084.62	13329.14	13329.14	2.59	-1.01	2.59	0.39	1

Tabela 2. Evaluacija rezultata DMDM za uzorak NPL TS3/02 L na poređenju

FP	tref ($^{\circ}\text{C}$)	emf (μV)	y (μV)	u(y) (μV)	y- \bar{y} (μV)	$u(y- \bar{y})$ (μV)	di	k
Zn	419.527	2987.47	2987.47	0.38	0.19	0.36	0.52	1
Al	660.323	5817.56	5817.56	0.49	0.86	0.61	1.40	2
Ag	961.78	10863.02	10863.02	0.77	-0.15	0.72	0.21	1
Cu	1084.62	13333.87	13333.87	1.14	-0.19	1.09	0.17	1

Automatsko prikupljanje podataka na svakih 5 s sprovedeno je putem sopstvenog razvijenog softvera koristeći LabView. Nakon očitavanja elektromotorne sile svakog pojedinačnog termopara ponovo bi se u jamu ćelije uvodio interpolacioni etalon i SPRT i HT-SPRT i Au-Pt kako bi se potvrdilo da se i dalje nalazimo u temperaturnom platou određene reference. Rezultati dobijeni u DMDM dati su za oba termopara u Tabeli 1 i Tabeli 2 u prvih pet kolona. Svaki rezultat ispraćen je sa procenom merne nesigurnost čiji je primer dat na temperaturi fiksne tačke srebra 961,78 °C u Tabeli 3, [1,4].

Budžet merne nesigurnosti sastoji se od komponenata koje potiču od postavljene metode merenja u DMDM i to:

- 1) standardna devijacija merenja termoparom koji se etalonira,
- 2) merna nesigurnost realizacije temperature fiksne tačke i interpolacionog etalona za detekciju,
- 3) dugogodišnji drift u realizaciji temperature fiksne tačke,
- 4) merna nesigurnost zbog postojanja toplotnog fluksa duž termopara u ćeliji na određenoj temperaturi,
- 6) merna nesigurnost u merenju elektromotorne sile na osnovu sertifikata etaloniranja nanovoltmetra,
- 7) merna nesigurnost koju unosi rezolucija nanovoltmetra,
- 8) drift nanovoltmetra,
- 9) uticaj ambijentalnih parametara (temperatura, pritisak) na kablove, kao i parazitne elektromotorne sile u mernom lancu,
- 10) merna nesigurnost realizacije hladnog kraja – tačka nule/mini trojna tačka vode,
- 11) merna nesigurnost kao posledica konačne nehomogenosti provodnika od čistih metala u konstrukciji termoparova.

Tabela 3. Primer budžeta merne nesigurnosti DMDM na temperaturi fiksne tačke Ag, 961,78 °C za uzorak 2

Veličina	Procena, mV	Standardna nesigurnost, mV	Raspodela verovatnoće	Koeficijent osetljivosti	Doprinos komponenti, mV	Stepen slobode
1. $U_s(t_F)$	10.86357	0.000052	normalna	1	0.000052	299
2. dt_F	0	0.0055	normalna	0.01919 mV/°C	0.000105545	∞
3. dt_{DF}	0	0.002309401	pravougaona	0.01919 mV/°C	4.43174E-05	∞
4. dt_{HF}	0	0.000204804	pravougaona	0.01919 mV/°C	3.93019E-06	∞
5. C_{FX}	0.01919 mV/°C				0	
6. dU_{X1}	-0.0004799	0.00007	normalna	1	0.00007	∞
7. dU_{X2}	0	2.88675E-05	pravougaona	1	2.88675E-05	∞
8. dU_{X3}	0	0.000484974	pravougaona	1	0.000484974	∞
9. dU_{X4}	-6.3E-05	0.0003	pravougaona	1	0.0003	∞
10. dt_{OX}	-0.0000053	0.002	normalna	0.0053	0.0000106	∞
11. C_{OX}	0.0053 mV/°C				0	
12. dU_{Hom}	0	0.00086/1.73	pravougaona	1	0.000502295	∞
$U_{scorr}(t_F)$	10.86302				0.00077406	14681024.65
				U_c (k=1)/ °C	0.0403	
				Proširena merna nesigurnost U (k=2)/ °C	0.081	

Poređenje dobijenih rezultata na odgovarajućim tačkama i pratećih mernih nesigurnosti date su u delu 3.

2. ISPITIVANJE NEHOMOGENOSTI TERMOMPAROVA U DMDM

Sama nehomogenost uzoraka određivana je metodom merenja elektromotorne sile uvlačenjem i izvlačenjem iz jame ćelije pri realizaciji temperature fiksne tačke srebra. Merenje je rađeno na svaki centimetar do maksimalno 12 cm dužine termopara.

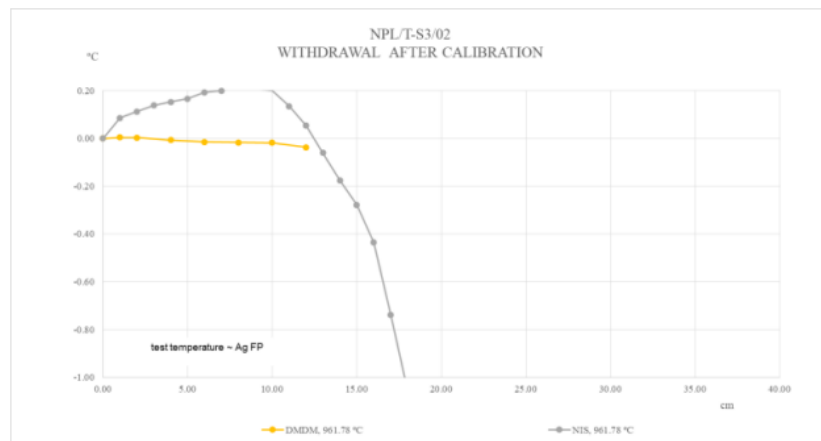
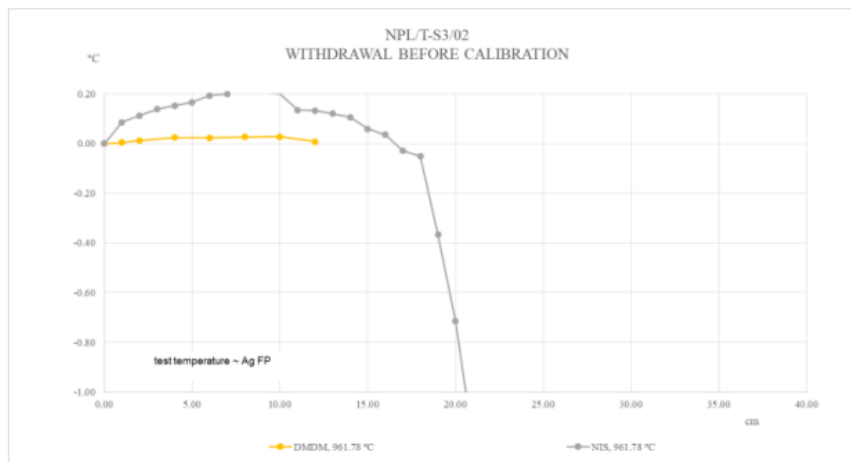
Rezultati merenja nehomogenosti drugog uzorka na poređenju u DMDM (NPL/T-S3/02) dati su u Tabeli 3 kao dobar reprezent merne mogućnosti nehomogenosti. Pri proceni nehomogenosti provodnika uzoraka u DMDM se koristi maksimalna promena elektromotorne sile na 10 cm pri uronu i izronu na

temperaturi fiksne tačke srebra 961,78 °C, pre i posle etaloniranja u celom opsegu, dok je veličina merne nesigurnosti zbog konačne nehomogenosti uračunata kao pravougaona raspodela te procene i data kao jedna od komponenti u budžetu merne nesigurnosti etaloniranja. Maksimalno izmerena nehomogenost u DMDM za prvi uzorak je 67 mK, dok je za drugi izmeren 45 mK, što je dosta dobra nehomogenost imajući u vidu da je ovo značajni udeo u ukupnoj mernoj nesigurnosti etaloniranja.

Naime, i u plavom krugu oba termometra pokazala su dobru nehomogenost samih elektroda tako da je za prvi uzorak detektovano maksimalno 78 mK (NPL/TS3/01) kao najgori slučaj od svih učesnica plavog kruga, dok je za drugi termopar koji je inače etaloniran do maksimalne temperature FPCu izmereno maksimalno 50 mK (NPL/T-S3/02) kao najgori slučaj kod svih učesnica, [1].

Tabela 4. Profil nehomogenosti uzorka NPL TS3/02 L određen u DMDM na poređenju

NPL/T-S3/02_1100 C				
cm	Pre etaloniranja		Posle etaloniranja	
	Δt , °C izvlačenja	Δt , °C uvlačenje	Δt , °C izvlačenja	Δt , °C uvlačenje
0	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.009	0.004	-0.019	0.004
2	-0.023	0.012	-0.035	0.003
4	0.001	0.024	-0.023	-0.007
6	-0.008	0.023	-0.045	-0.015
8	0.013	0.027	-0.035	-0.017
10	0.015	0.028	-0.034	-0.018
12	0.009	0.008	-0.036	-0.037



Slika 6. Grafički prikaz nehomogenosti uzorka NPL TS3/02 L u fiksnoj tački srebra u plavom krugu – pri izvlačenju pre i posle etaloniranja

3. REFERENTNE VRENDOSTI POREĐENJA I PRATEĆA MERNA NESIGUNOST REFERENTNE VRENDOSTI SVAKOG UZORKA

Za pojedinačnu evaluaciju rezultata merenja svake učesnice pa i DMDM, dogovoreno je da se za referentnu vrednost etaloniranja uzme srednja težinska vrednost svih učesnica na svakoj temperaturi merenja i za svaki termopar transfer etalon koji je bio predmet etaloniranja. Ovo je podrazumevalo da se uračuna kompletna matrica kovarijansi koja uključuje korelaciju između NMI odnosno merenja koja su dobijena metodom fiksnih tačaka i ona metodom poređenja, kao i da se isprati uticaj jednog NMI na drugi imajući u vidu da mnogi mali NMI vuku sledivost od onih koji imaju realizovanu skalu ITS-90.

Ako se pretpostavi da je svaki od učesnika poslao n merenih vrednosti (y_i) može se formirati matrica $y = (y_1 \dots y_n)^T$ rezultata. Zatim se metodom najmanjih kvadrata može dobiti očekivana vrednost za svakog učesnika poređenja $\hat{y} = (\hat{y}_1 \dots \hat{y}_n)^T$ koja se može izračunati koristeći sledeći matematički model: $E(y) = \hat{y} = X \cdot a$ (1) gde je X matrica poređenja koja je poznata i koja ima nultu nesigurnost. Parametar a je za svaku laboratoriju nepoznat i određuje se iz n merenih rezultata interpolacijom i normiranjem na temperature etaloniranja i upoređivanjem sa svakim poslatim rezultatom za svaku laboratoriju i transfer uzorak [3]. Više detalja o poređenju može se naći na sajtu BIPM u bazi ključnih i dopunskih poređenja, ili u radu [1].

Tako dobijene referentne vrednosti na poređenju za plavi krug su date u Tabeli 5.

Tabela 5. Referentne vrednosti uzoraka na poređenju- plavi krug

	NPL TS3/01		NPL TS3/02 L	
	E_{ref} (μV)	$u(E_{ref})$ (μV)	E_{ref} (μV)	$u(E_{ref})$ (μV)
FP Zn	2985.34	0.54	2987.28	0.20
FP Al	5814.24	0.82	5816.70	0.28
FP Ag	10860.48	1.02	10863.17	0.38
Fp Cu	13330.16	0,59	13334.05	0.51

U određivanje mernih nesigurnosti tako dobijene referentne vrednosti na svakoj temperaturi fiksne tačke i za svaki termometar ušle su pored pojedinačnih komponenti etaloniranja kod koordinatora, još i dve komponente:

- totalni drift svakog uzoraka ponaosob za period trajanja svih merenja na poređenju,
- doprinos nesigurnosti zbog ekstrapolacije prilikom određivanja vrednosti emf za temperaturu fiksnih tačaka iz merenja na bliskim temperaturama fiksnih tačaka za one NMI koji su koristili metodu poređenja.

Doprinos pod a) je ukupni drift dva uzorka termopara određena su od strane CEM laboratorije kao razlika inicijalnog i finalnog poređenja svakog uzorka ponaosob. Procena merne nesigurnosti konačnog drifta računata je kao pravougaona raspodela i za plavi krug drift na temperaturama koje su od interesa za DMDM laboratoriju, driftovi i merne nesigurnosti zbog postojanja tog konačnog drifta prikazani su u Tabeli 6 i Tabeli 7. Procene drifta i prateće merne nesigurnosti zbog konačnog drifta su izuzetno male, uzorci su bili stabilni pa se i rezultati poređenja imaju veliku težinu, odnosno dobro reprezentuju merne mogućnosti učesnika.

Doprinos pod b) nije predmet analize obog rada jer DMDM ima svoju skalu i nije koristila metodu poređenja.

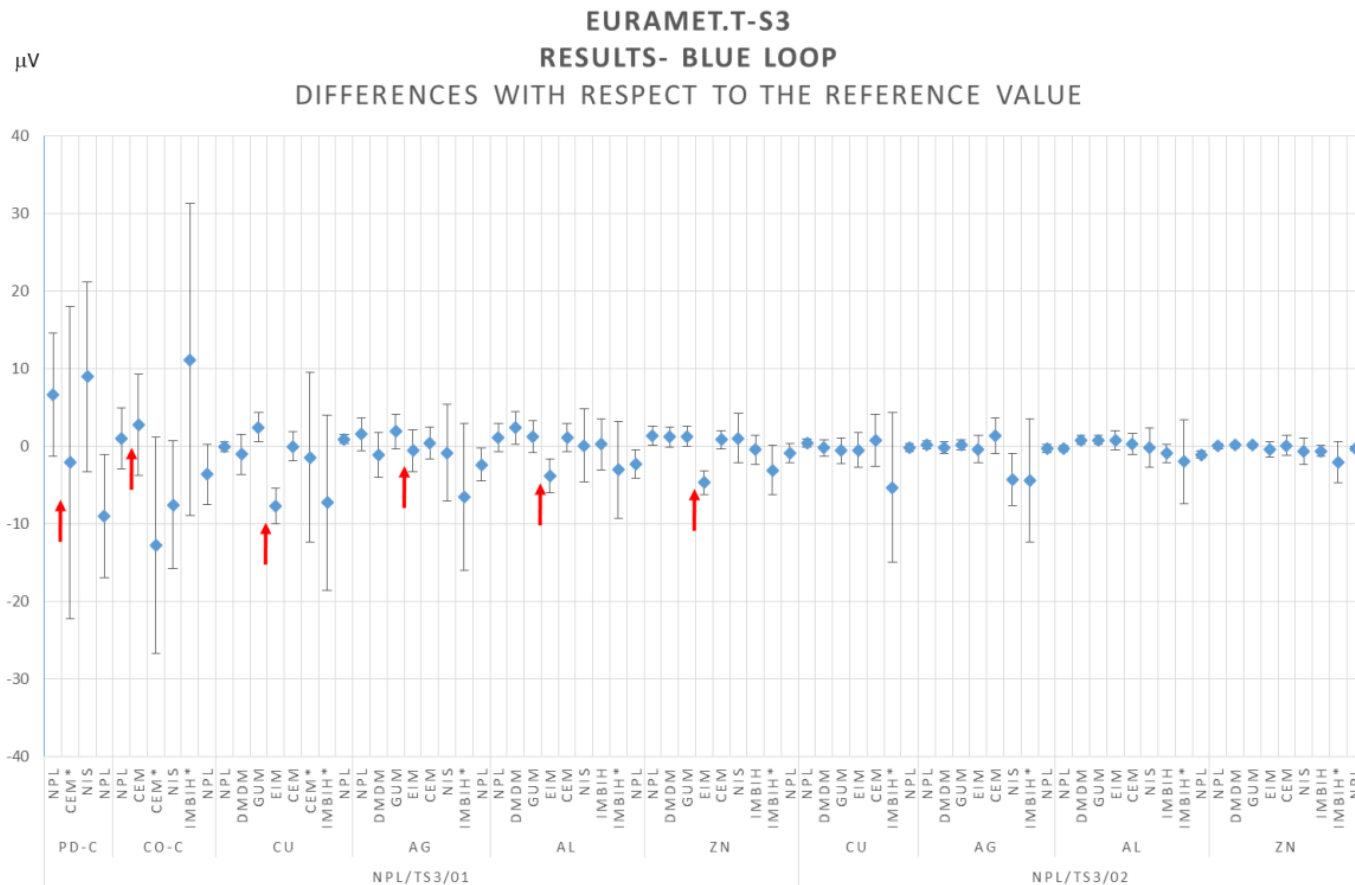
Tabela 6. Konačni drift uzoraka poređenja i procena merne nesigurnosti drifta uzoraka poređenja-plavi krug

	NPL TS3/01		NPL TS3/02 L	
	$E_i - E_f$ (μV)	$(E_i - E_f)/\sqrt{3}$ (μV)	$E_i - E_f$ (μV)	$(E_i - E_f)/\sqrt{3}$ (μV)
FP Zn	2.22	1.28	0.31	0.18
FP Al	3.40	1.96	0.79	0.46
FP Ag	3.94	2.28	0.45	0.26
Fp Cu	-0,98	0.56	0.65	0.37

4. ANALIZA UČEŠĆA DMDM U MEĐUNARODNOM POREĐENJU ETALONIRANJA TERMOPAROVA

Svi poslani rezultati u prethodno dogovorenim formularima saopšteni su za svaku zemlju učesnicu, i za DMDM, u formi tabele u kojoj se vidi laboratorija, referentna temperatura poređenja normirana u odnosu na fiksnu tačku, vrednost emf kada je dugačija od očekivane na fiksnoj tački temperature, y vrednost koja se dobija interpolacijom na dogovorenu vrednost, $u(y)$ nesigunost saopštena od stane učesnika, $y - \hat{y}$ razlika u odnosu na očekivanu vrednost u okvirima jednog kruga i merna nesigunost te razlika za odgovarajući krug računajući sve relevantne merne nesigunosti koje pripadaju određenom krugu i di normalizovanom odstupanju.

Analiza rezultata poređenja sprovedena je preko parametara di normalizovanog odstupanja DMDM i pratećih nesigurnosti dobijenih u DMDM i uvećanih za mernu nesigunost drifta uzorka u vremenu trajanja projekta na svakoj tački poređenja. U poređenju rezultata dobijenih u DMDM u odnosu na saopštenu srednju težinsku referentnu vrednost za svaki uzorak pojedinačno na svakoj temperauri poređenja rezultati su generalno veoma dobri. U Табелли 1 и Табелли 2, u koloni gde je normalizovano odstupanje di , analizu rezultata možemo sprovesti upoređivanjem vrednosti definisane razlike di i procenjene merne nesigunosti za DMDM koja uključuje i mernu nesigunost drifta uzoraka. U skoro svim slučajevima za oba termopara na svim upotrebljenim fiksnim tačkama u DMDM definisana razlika di je ispod jedinice za prijavljenu mernu nesigunost za faktor obuhvata $k=1$. Može se reći da su ovi rezultati prihvatljivi, ali i dosta dobri. Dok je za etaloniranje termopara na temperutari fiksne tačke Al u ćeliji nacionalnog etalona posmatrana razlika je u rasponu $1 < d < 2$ i što je prihvatljivo za prijavljenu proširenu mernu nesigunost, odnosno faktor prekrivanja $k=2$. Za ove rezultate može se reći da su prihvatljivi. Naime vidi se na Slici 5 da DMDM na svim mernim tačkama seče vrednost usvojenu kao referentnu na svim tačkama poređenja [1].



Slika 5. Grafički prikaz evaluacije rezultata DMDM i plavom krugu poređenja

Primenjeni kriterijum evaluacije za DMDM je u skladu sa dogovorenim od strane svih NMI učesnika i koji je jednako primenjen na sve učesnike, kao provera među jednakima, a sa ciljem potvrđivanja merne mogućnosti.

Na osnovu ovih rezultata na ovom poređenju i sprovedene analize možemo zaključiti da je potvrđena merna mogućnost sa mernim nesigurnostima manjim od onih koje su objavljene u samom CMC. Odnosno moguće je u narednom periodu unaprediti ovaj servis u obezbeđenju sledivosti za korisnike u privredi Republike Srbije.

ZAKLJUČAK

Međunarodno poređenje EURAMET.T-S3 etaloniranja termoprova metodom fiksnih tačaka, od predloga do finalnog izveštaja, sprovedeno je u periodu od 2013-2020. godine. Ukupno 19 zemalja učestvovalo je na poređenju među kojima je i Republika Srbija – DMDM. Poređenje je sprovedeno u skladu sa svim dogovorenim pravilima i dobrom laboratorijskom praksom zasnovanom na principima realizacije Međunarodne temperaurne skale ITS-90.

Na osnovu sprovedene analize rezultata merenja DMDM je potvrdila mogućnosti merenja i etaloniranja - CMC, a ima osnove i za poboljšanje pojedinih servisa u KCDB bazi BIPM. Ovo unapredjenje obezbeđenja sledivosti u etaloniranju senzora temperature koji su široko u upotrebi u akreditovanim laboratorijama i industriji (Au-Pt, Pd-Pt, S, R tip) direktno utiče i na privredu Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] *EURAMET Project N° 1268 Calibration of thermocouples from 419,527 °C (freezing point of Zn) up to 1492 °C (melting point of the Pd-C eutectic), by the temperature fixed point and comparison methods*, Metrologija, Volume 57, Number 1A, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/57/1A/03006>
- [2] International Temperature Scale ITS-90, H.Preston-Thomas, Metrologija 27, 3-10 1990
- [3] Nielsen L, Evaluation of measurements by the method of least squares https://www1.bipm.org/utis/common/pdf/JCGM/nielsen_final.pdf
- [4] BIPM, IEC, ISO, *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, first edition*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, September 2008.

Autori:

- 1) Slavica Simić, rukovodilac Grupe za termometriju
- 2) Vladan Stepanović, metrolog u Grupi za termometriju
- 3) Svetlana Stanisavljević, metrolog u Grupi za termometriju

Direkcija za mere i dragocene metale