

Međulaboratorijsko poređenje mjerenja električnih veličina

Vladimir Milojević, Srđan Čalija
Institut za metrologiju Bosne i Hercegovine
Sarajevo, Bosna i Hercegovina
vladimir.milojevic@met.gov.ba,
srdjan.calija@met.gov.ba

Sadržaj— U radu je opisano međulaboratorijsko poređenje mjerenja električnih veličina (AC napon, DC napon, AC struja, DC struje i DC otpor) u kojem je učestvovala laboratorija za električne veličine Instituta za metrologiju BiH (IMBIH). Ovo međulaboratorijsko poređenje je dio procesa dokazivanja osposobljenosti laboratorija (proficiency testing – PT) predviđen projektom IPA 2011. Poređenje je rađeno između Laboratorije nacionalnog metrološkog instituta Makedonije, kao pilot laboratorije i laboratorija Nacionalnih metroloških instituta iz Albanije, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Kosova, Crne Gore kao i Instituta Nikola Tesla iz Srbije. Za transfer etalon izabran je visokoprecizni digitalni multimetar DMM 8 ½ HP/Agilent 3458A. Ovaj PT je realizovan u skladu sa preporukama EA-2/03 “EAL Interlaboratory Comparison” i BAS EN ISO/IEC 17043:2011. Cilj ovog PT-a je bilo potvrđivanje mjernih i kalibracionih mogućnosti laboratorija učesnica u ovom projektu.

Ključne riječi-interkomparacija; kalibracija; etalon; (intercomparison, calibration, reference standard)

I. UVOD (HEADING 1)

Laboratorije za ispitivanje/kalibraciju mjerila, u skladu sa zahtjevima standarda BAS EN ISO/IEC 17025:2006 moraju imati postupke za praćenje kvaliteta rezultata ispitivanja/kalibracije. Kvalitet se može pratiti uključivanjem laboratorija u programe ispitivanja osposobljenosti (proficiency testing-PT). U skladu s tim učestvovanje u procesu ispitivanja osposobljenosti je obavezna djelatnost propisana normom BAS EN ISO/IEC 17025:2006 u kojoj učesnici svojim rezultatima potvrđuju svoje deklarirane kalibracione/mjerne mogućnosti. Ova aktivnost je takođe uslovljena od strane nacionalnih akreditacionih tijela. Kroz proces međulaboratorijskih poređenja (interkomparacije), laboratorije osiguravaju stalan kvalitet svoga rada. Međulaboratorijska poređenja predstavljaju veoma važno i efikasno sredstvo za dokazivanje osposobljenosti laboratorije. Rezultati međulaboratorijskih poređenja omogućavaju identifikaciju mogućih problema i verifikaciju izmjena postojećih ili uvođenja novih metode.

Svaka laboratorija tek kroz međulaboratorijska poređenja može potvrditi rezultate mjerenja, koja su izvršena u laboratoriji, kao i mjerne nesigurnosti koje se pridružuju rezultatima mjerenja [2]. Mjerne nesigurnosti mogu se najbolje potvrditi poređenjem između laboratorija, koje nemaju iste etalone i pomoćnu opremu koju koriste u procesu kalibracije.

Predmet ovog rada je međulaboratorijsko poređenje u oblasti mjerenja veličina naizmjeničnog (AC) napon, jednosmjernog (DC) napon, naizmjenične (AC) struja, jednosmjerne (DC)

struje i otpornost. Ova interkomparacija je održana u okviru IPA 2011 PT projekta, koji je organizovala LMK laboratorija sa Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Ljubljani. LMK laboratorija je akreditovana kao provajder za testiranje/interkomparaciju u saradnji sa Dutch Accreditation Council (RvA).

Institut za kvalitet i metrologiju Slovenije - SIQ vršio je kalibraciju transfer etalona na početku i kraju procesa merenja. Referentna vrijednost za ovo međulaboratorijsko poređenje obezbjedila je laboratorija SIQ-a koja je i nacionalni nosioc etalona za električne veličine Republike Slovenije.

Svrha ovog međulaboratorijskog poređenja bila je da se uporede rezultati laboratorija učesnica PT-a pri kalibraciji digitalnog multimetara – DMM 8 ½ HP/Agilent 3458A na mjernim tačkama datim u tabeli I. Prema pravilima PT-a učesnici su koristili svoje metode za kalibraciju digitalnog multimetra kako bi dokazali svoje mjerne sposobnost. Sve laboratorije učesnice su imale četiri nedelje za kalibraciju DMM uključujući prevoz do sledeće laboratorije. U ovom međulaboratorijskom poređenju učestvovalo je sedam laboratorija:

- Laboratorija za električne veličine Instituta za metrologiju Bosne i Hercegovine (IMBIH)
- Laboratorija za električne veličine niskih frekvencija Biroa za metrologiju Makedonije (BM-MK)
- Laboratorija za testiranje i etaloniranje Elektrotehnički Institut “Nikola Tesla” Srbija (INT-SR)
- Primarna Laboratorija za elektromagnetne veličine Republika Hrvatska (PEL-HR)
- Laboratorija za električne veličine Biroa za metrologiju Crna Gora (BM-MK)
- General Directorate of Metrology and Calibration (DPM-AL), Tirana, Albanija.
- Laboratory for electrical quantities-The Department of Metrology of Kosovo (EM-KS)

II. METODE MJERENJA I KORIŠĆENA OPREMA

Laboratorija za električne veličine Instituta za metrologiju BiH opremljena je za obavljanje nekoliko izuzetno značajnih aktivnosti kao što su: ostvarivanje, održavanje i diseminaciju vrijednosti osnovnih i izvedenih jedinica električnih veličina u

BiH kao i osiguranje međunarodne sljedivosti. Institut sve referentne etalone za električne veličine kalibrše u renomiranim evropskim nacionalnim metrološkim institutima čime se ostvaruje potpun lanac sljedivosti merenja u BiH do najvišeg metrološkog nivoa. Realizacija svih kalibracionih aktivnosti ostvaruje se u kontrolisanim klimatskim uslovima sa temperaturnim opsegom 23 ± 1 °C i relativnom vlažnošću vazduha 50 ± 10 %.

Kalibracija transfer etalona u ovoj interkomparaciji ostvarena je direktnom ili indirektnom metodom u zavisnosti od veličine i opsega koji je bilo potrebno kalibrirati. Za kalibraciju jednosmjernog i naizmjeničnog napona korištena je metoda direktnog poređenja. Vršeno je direktno poređenje vrijednosti DC i AC napona generisanog preko multifunkcionalnog kalibratora FLUKE 5720A i vrijednosti koje pokazuje ispitni DMM. Korištena mjerna metoda zahtjeva da se za svaku mjernu tačku izvrši 10 mjerenja. Za rezultat kalibracije se uzima srednja vrijednost 10 mjerenja. Proračun greške mjerenja i pridružene mjerne nesigurnosti DMM-a pri mjerenju DC (AC) napona generisanog sa multifunkcionalnog kalibratora uvažavajući pojedine korekcije proračunava se prema matematičkom modelu:

$$E = V_x + \delta V_{resx} + \delta V_{Ax} - (V_S + \delta V_{specS}) \quad (1)$$

gdje je:

- E - Greška DMM-a pri mjerenju DC (AC) napona
- V_x - srednja vrijednost od broja očitavanja DC (AC) napona sa DMM-a
- V_S - referentna vrijednost DC (AC) napona generisana sa multifunkcionalnog kalibratora
- δV_{resx} - korekcija usljed rezolucije DMM-a
- δV_{Ax} - korekcija usljed rasipanja rezultata očitanih sa DMM-a
- δV_{specS} - korekcija uzeta iz specifikacije multifunkcionalnog kalibratora.

TABELA I. MJERNE TAČKE ZA KALIBRACIJU DMM-A

Mjerna veličina	Opseg	Mjerne tačke
DC Napon	100 mV	0 V, 100 mV, -100 mV
	1 V	+1V
	10 V	10 V, 5 V, 0 V, -5 V, -10 V
	100 V	+100 V
	1000 V	+1000 V
AC Napon (sync mode)	100 mV	100 mV 40 Hz; 100 mV 1 kHz
	1 V	1 V 40 Hz; 1 V 1 kHz
	10 V	10 V 40 Hz; 10 V 1 kHz; 10 V 100 kHz
	100 V	100 V 40 Hz; 100 V 1 kHz
	1000 V	700 V 40 Hz; 700 V 1 kHz
DC Struja	1 mA	1 mA; -1mA
	10 mA	+10 mA
	100 mA	+100 mA; -100 mA
	1 A	+1A
AC Struja	1 mA	1 mA 40 Hz; 1 mA 1 kHz
	10 mA	10 mA 40 Hz; 10 mA 1 kHz
	100 mA	100 mA 40 Hz; 100 mA 1 kHz 100 mA 5 kHz
	1 A	1 A 40 Hz; 1 A 1 kHz
DC Otpor	10 Ω	0 Ω and 10 Ω
	100 Ω	100 Ω
	1 kΩ	1 kΩ
	10 kΩ	10 kΩ
	100 kΩ	100 kΩ
	1 MΩ	1 MΩ
	10 MΩ	10 MΩ

Za različit intenzitete DC struje pri kalibraciji transfer DMM-a korištene su dvije metode kalibracije. Za vrijednosti struja do 1A korištena je indirektna metoda kalibracije bazirana na Omovom zakonu. Ova metoda predviđa da se na bazi poznatih vrijednosti etalonskih otpornika Fluke 742A i poznatog napona izmjenjenog etalonskim multimetrom DMM Fluke 8508A/01 proračunaju stvarne (referentne) vrijednosti struje. Proračun referentne vrijednosti struje vršen je na bazi 10 očitavanja za oba polariteta napona na otporniku. Promjena polariteta napona na otporniku vršen je promjenom smjera struje kroz priključke otpornika s ciljem da se eliminišu padovi napona na priključnim kablovima. Efekat promjene otpornosti referentnog otpora usljed uticaja disipacije snage je zanemarljiv iz razloga što su vrijednosti otpora birane tako da se na njima disipira snaga od 10 mW. Kalibracija DMM-a za vrijednost DC struje od 1A vršena je direktnom metodom generisanjem vrijednosti 1A sa multifunkcionalnog kalibratora Fluke 5720A. Proračun greške mjerenja i pridružene mjerne nesigurnosti za obje metode kalibracije DMM-a urađen je na bazi sljedećih matematičkih modela:

Direktna metoda:

$$E = I_x + \delta I_{resx} + \delta I_{Ax} - (I_S + \delta I_{specS}) \quad (2)$$

Indirektna metoda:

$$E = I_x + \delta I_{Ax} + \delta I_{resx} - \left(\frac{(U_+ - U_-)}{2} \cdot (1 + \delta U_{+A} + \delta U_{-A} + \delta U_{resDMM} + \delta U_{specDMM} + \delta U_{le}) \right) \quad (3)$$

- E - greška DMM-a pri mjerenju DC struje
- I_x - srednja vrijednost od 10 vrijednosti DC struje očitane sa DMM-a
- δI_{Ax} - korekcija mjerene struje usljed rasipanja rezultata
- δI_{resx} - korekcija mjerene struje usljed rezolucije mjerila koje se kalibrše
- U_+ , U_- - srednja vrijednost mjerenih napona na etalonskom otporniku R_S ;
- R_S - otpornost etalonskog otpornika
- δU_{+A} - korekcija izmjenjenog napona pozitivnog polariteta usljed rasipanja rezultata
- δU_{-A} - korekcija izmjenjenog napona negativnog polariteta usljed rasipanja rezultata
- δU_{resDMM} - korekcija izmjenjenog napona usljed rezolucije ref. DMM-a
- $\delta U_{specDMM}$ - korekcija izmjenjenog napona uzeta iz specifikacije ref. DMM-a
- δU_{le} - korekcija izmjenjenog napona usljed uticaja opterećenja ref. DMM-a
- δR_{drift} - korekcija otpornosti usljed drifta etalon otpornika od posljednje kalibracije
- δR_{temp} - korekcija otpornosti usljed uticaja promjene temperature na etalon otporniku
- δR_{cal} - korekcija usljed nesigurnosti određivanja vrijednosti otpornosti etalonskog otpornika

Kalibracija predmetnog DMM za vrijednosti naizmjenične (AC) struje iz tabele I ostvaren je preko etalonskih koaksijalnih strujnih šentova proizvodnje SIQ. Korištena metoda za kalibraciju AC struje bazirana je na Omovom zakonu. Na bazi mjenjenog pada AC napona etalonskim DMM-om Fluke 8508A/01 te na bazi poznate otpornosti referentnog strujnog šenta i poznate vrijednosti AC-DC transfera (eng. AC-DC difference) vrši se određivanje referentne vrijednosti AC struje. Prije izvođenja mjerenja AC struje potrebno je odrediti tačnu vrijednost DC otpornosti korištenog strujnog šenta. Pošto je vrijednost δ_{AC-DC} relativno mala reda 2 ppm, za otpornost šenta R_S uzeta je vrijednost DC otpora dok se frekventna zavisnost otpornosti uzima kroz koeficijent δ_{AC-DC} i to kao doprinos kod proračuna mjerne nesigurnosti [3]. Vrijednost otpora korištenog strujnog šenta određuje se tehnikom prenosa vrijednosti (eng. Ratio Technique), na bazi poznatog

etalonskog DC otpora (Fluke 742A) i izmjerenog prenosnog odnosa sa referentnim digitalnim multimetrom DMM Fluke 8508A/01-Ohms ratio mode, prema matematičkom modelu:

$$E = I_x + \delta I_{Ax} + \delta I_{resx} - \frac{U_s \cdot (1 + \delta U_{As} + \delta U_{specS} + \delta U_{resS} + \delta U_{leS})}{R_s \cdot (1 + \delta R_{scal} + \delta_{AC-DC} + \delta R_{temp} + \delta R_{pwc})} \quad (4)$$

Gdje je:

- E - greška DMM-a pri mjerenju AC struje
- I_x -srednja vrijednost od 10 očitavanja struje koje pokazuje ispitno mjerilo
- U_s - srednja vrijednost od 10 očitavanja napona na etalonskom otporniku;
- R_s -otpornost etalonskog šenta
- δU_{As} -korekcija usljed rasipanja rezultata mjerenja izmjerenog AC napona etalon voltmetrom
- δU_{resS} -korekcija izmjerenog napona usljed rezolucije etalon mjerila
- δU_{specS} -korekcija izmjerenog napona usljed specifikacije etalon mjerila
- δU_{leS} -korekcija izmjerenog napona usljed uticaja opterećenja (load effect) etalon mjerila
- δR_{scal} -korekcija otpornosti usljed kalibracije otpornosti etalonskog šenta
- δ_{AC-DC} -korekcija usljed AC-DC razlike strujnog šenta
- δR_{temp} -korekcija usljed promjene temperature okoline
- δR_{pwc} - korekcija usljed disipacije snage na otpornicima šenta

U procesu interkomparacije prilikom kalibracije DMM-a za vrijednost otpornosti iz tabele I korišteni su etalonski otpornici Fluke 734A. Povezivanjem etalonskih otpornika poznatih vrijednosti direktno na priključke ispitnog DMM-a, vršeno je 10 očitavanja te je na bazi stvarne vrijednosti etalonskog otpornika R_s i srednje vrijednosti od broja očitavanja R_x procjenjena greška ispitnog DMM. Matematički model za procijenu greške i pridružene mjerne nesigurnosti je:

$$E = R_x + \delta R_{resx} + \delta R_{Ax} \cdot (R_s + \delta R_{cal} + \delta R_{diff} + \delta R_{temp} + \delta R_{pwc}) \quad (5)$$

Gdje je:

- E - greška DMM-a pri mjerenju DC otpornosti
- R_x -srednja vrijednost od 10 očitavanja vrijednosti otpora sa ispitnog DMM-a
- R_s -vrijednost otpornosti etalonskog otpornika uzeta iz certifikata
- δR_{resx} - korekcija usljed rezolucije ispitnog mjerila
- δR_{Ax} - korekcija usljed rasipanja rezultata mjerenja ispitnog mjerila
- δR_{diff} -korekcija usljed promjene vrijednosti etalonskog otpornika od posljednje kalibracije
- δR_{temp} -korekcija usljed promjene otpornosti etalonskog otpornika usljed promjene temperature
- δR_{cal} -korekcija usljed nesigurnosti određivanja vrijednosti otpornosti etalonskog otpornika
- δR_{pwc} - korekcija usljed disipacije snage na otpornicima šenta

Za svaku mjernu tačku u kojoj je rađena kalibracija ispitnog DMM-a, kvantifikovane su sve komponente mjerne nesigurnosti iz predhodnih matematičkih modela (1-5). Zatim je napravljen budžet svih komponenti mjernih nesigurnost prema [4]. Na kraju su izračunata proširena mjerna nesigurnost, koja su date sa koeficijentom proširenja $k = 2$. Koeficijent proširenja $k = 2$ podrazumjeva da će sa vjerovatnoćom od 95% svi iskazani rezultati mjerenja biti u granicama $\epsilon \pm U$.

II. REZULTATI MEĐULABORATORIJSKOG POREĐENJA

U laboratoriji SIQ Slovenija izvršena je prva kalibracija transfer etalona (DMM Agilent 3458A) prije cirkularnog slanja u laboratorije učesnice interkomparacije. Prema protokolu interkomparacije zamišljeno je da kada se izvrše mjerenja sa transfer etalomom u svim laboratorijama učesnicama interkomparacije, ponovo izvrše mjerenja u SIQ-ovoj laboratoriji. Zamišljeno je da se za referentne vrijednost pojedinih veličina (napon, struja, otpor) uzme srednja vrijednost dva mjerenja iz SIQ-ove laboratorije. Svaka

laboratorija je imala na raspolaganju 4 nedelje da provede proces mjerenja i isporuči transfer etalon drugoj laboratoriji. Kao specifičnost ove interkomparacije važno je napomenuti da se tokom kruženja putujućeg etalona desio kvar na prvenstveno korištenom DMM. U laboratoriji za električne veličine Instituta za metrologiju BiH ustanovljeno je da mjerenje na ovom DMM nije adekvatno, te da interkomparacija sa ovim mjerilom ne može da se nastavi. Prije kvara, mjerenje na prvom DMM-u su izvršile SIQ-ova laboratorija, pilot laboratorija iz Makedonije, te laboratorije iz Hrvatske, Srbije i Crne Gore. Interkomparacija je nastavljena, a kao alternativno rješenje uzet je drugi DMM istog tipa, koji je predhodno kalibrisan takođe u SIQ-ovoj laboratoriji. Obzirom da je kvar na prvom DMM ustanovljen u našoj laboratoriji, interkomparacija sa novim (drugim) DMM je nastavljena mjerenjem naše laboratorije zatim laboratorija iz Kosova, Albanije i Makedonije i završila se kontrolnim mjerenjem SIQ-ove laboratorije.

Kao što je bilo i predviđeno protokolom, referentna vrijednost je proračunata na bazi srednje vrijednosti dva mjerenja SIQ-ove laboratorije. Ovaj način određivanja referentne vrijednosti je bio moguć samo u slučaju mjerenja sa drugim DMM-om, dok za laboratorije koje su izvršile mjerenje na prvom DMM-u to nije slučaj. Kao jedino moguće rješenje za izbor referentne vrijednosti za mjerenja obavljena na prvom DMM-u uzete su iz kalibracionog certifikata vrijednosti mjerenja obavljenih na samom početku interkomparacije od strane SIQ-a. Obzirom da se radi o elektronskom uređaju kao transfer etalonu jeko je teško vršiti procjenu stabilnosti takvog instrumenta kao i ostalih uticaja (npr. temperatura i dr). Zbog ovoga, mjerne nesigurnosti referentnih vrijednosti su definisane uzimajući u obzir iskazane mjerne nesigurnosti iz SIQ-ovih certifikata kao i deklarisan mjerne nesigurnosti iz specifikacije proizvođača DMM Agilent 3458A. Proračun referentnih vrijednosti, kao i vrijednost referentnih mjernih nesigurnosti za DMM1 i DMM2, dati su u izvještaju interkomparacije [1]. Referentne vrijednosti i pridružene mjerne nesigurnosti za pojedine veličine date su u tabelama II -VI. U tabelama je sa ϵ označena greška mjerenja DMM-a, dok je sa U označena proširena mjerna nesigurnost nivoa povjerljivosti 95%.

TABELA II. REFERENTNA VRIJEDNOST JEDNOSMIJERNOG NAPONA

Vrijednost	Opseg	Prvi DMM		Drugi DMM	
		ϵ ($\mu V/V$)	U ($\mu V/V$)	ϵ ($\mu V/V$)	U ($\mu V/V$)
0 mV	100 mV	0.2 μV	0.5 μV	0.0 μV	0.5 μV
100 mV	100 mV	4.0 $\mu V/V$	9.0 $\mu V/V$	-1.0 $\mu V/V$	8.3 $\mu V/V$
-100 mV	100 mV	-4.0 $\mu V/V$	9.0 $\mu V/V$	4.5 $\mu V/V$	8.3 $\mu V/V$
1 V	1 V	0.0 $\mu V/V$	2.7 $\mu V/V$	-0.5 $\mu V/V$	2.6 $\mu V/V$
10 V	10 V	0.2 $\mu V/V$	2.3 $\mu V/V$	0.3 $\mu V/V$	2.2 $\mu V/V$
5 V	10 V	0.2 $\mu V/V$	2.4 $\mu V/V$	-3.8 $\mu V/V$	2.2 $\mu V/V$
0 V	10 V	0.3 μV	1.2 μV	-0.1 μV	1.1 μV
-5 V	10 V	-0.1 $\mu V/V$	2.4 $\mu V/V$	-0.3 $\mu V/V$	2.2 $\mu V/V$
-10 V	10 V	-0.1 $\mu V/V$	2.3 $\mu V/V$	0.4 $\mu V/V$	2.2 $\mu V/V$
100 V	100 V	1.0 $\mu V/V$	3.2 $\mu V/V$	1.0 $\mu V/V$	3.1 $\mu V/V$
1000 V	1000 V	3.0 $\mu V/V$	8.2 $\mu V/V$	2.0 $\mu V/V$	8.1 $\mu V/V$

TABELA III. REFERENTNA VRIJEDNOST JEDNOSMIJERNE STRUJE

Vrijednost	Opseg	Prvi DMM		Drugi DMM	
		ϵ (mA/A)	U ($\mu A/A$)	ϵ (mA/A)	U ($\mu A/A$)
1 mA	1 mA	4.0 $\mu A/A$	16 $\mu A/A$	0.5 $\mu A/A$	14 $\mu A/A$
-1 mA	1 mA	4.0 $\mu A/A$	16 $\mu A/A$	0.0 $\mu A/A$	14 $\mu A/A$
10 mA	10 mA	7.0 $\mu A/A$	16 $\mu A/A$	-1.5 $\mu A/A$	14 $\mu A/A$
100 mA	100 mA	3.0 $\mu A/A$	28 $\mu A/A$	4.0 $\mu A/A$	24 $\mu A/A$
-100 mA	100 mA	1.0 $\mu A/A$	28 $\mu A/A$	5.5 $\mu A/A$	24 $\mu A/A$
1 A	1 A	10 $\mu A/A$	100 $\mu A/A$	20 $\mu A/A$	82 $\mu A/A$

TABELA IV. REFERENTNA VRIJEDNOST NAIZMJENIČNOG NAPONA

Vrijednost	Opseg	Prvi DMM		Drugi DMM		
		ϵ ($\mu\text{V/V}$)	U ($\mu\text{V/V}$)	ϵ ($\mu\text{V/V}$)	U ($\mu\text{V/V}$)	
100 mV	40 Hz	100 mV	0 $\mu\text{V/V}$	75 $\mu\text{V/V}$	-75 $\mu\text{V/V}$	94 $\mu\text{V/V}$
100 mV	1 kHz	100 mV	20 $\mu\text{V/V}$	75 $\mu\text{V/V}$	-30 $\mu\text{V/V}$	62 $\mu\text{V/V}$
1 V	40 Hz	1 V	10 $\mu\text{V/V}$	54 $\mu\text{V/V}$	-25 $\mu\text{V/V}$	50 $\mu\text{V/V}$
1 V	1 kHz	1 V	20 $\mu\text{V/V}$	54 $\mu\text{V/V}$	-15 $\mu\text{V/V}$	50 $\mu\text{V/V}$
10 V	40 Hz	10 V	20 $\mu\text{V/V}$	54 $\mu\text{V/V}$	5.0 $\mu\text{V/V}$	50 $\mu\text{V/V}$
10 V	1 kHz	10 V	30 $\mu\text{V/V}$	54 $\mu\text{V/V}$	-25 $\mu\text{V/V}$	50 $\mu\text{V/V}$
10 V	100 kHz	10 V	-200 $\mu\text{V/V}$	412 $\mu\text{V/V}$	50 $\mu\text{V/V}$	406 $\mu\text{V/V}$
100 V	40 Hz	100 V	30 $\mu\text{V/V}$	117 $\mu\text{V/V}$	5.0 $\mu\text{V/V}$	114 $\mu\text{V/V}$
100 V	1 kHz	100 V	60 $\mu\text{V/V}$	117 $\mu\text{V/V}$	-10 $\mu\text{V/V}$	114 $\mu\text{V/V}$
700 V	40 Hz	1000 V	-29 $\mu\text{V/V}$	222 $\mu\text{V/V}$	7.1 $\mu\text{V/V}$	218 $\mu\text{V/V}$
700 V	1 kHz	1000 V	14 $\mu\text{V/V}$	222 $\mu\text{V/V}$	0.0 $\mu\text{V/V}$	218 $\mu\text{V/V}$

TABELA V. REFERENTNA VRIJEDNOST NAIZMJENIČNE STRUJE

Vrijednost	Opseg	Prvi DMM		Drugi DMM		
		ϵ ($\mu\text{A/A}$)	U ($\mu\text{A/A}$)	ϵ ($\mu\text{A/A}$)	U ($\mu\text{A/A}$)	
1 mA	40 Hz	1 mA	20 $\mu\text{A/A}$	401 $\mu\text{A/A}$	-150 $\mu\text{A/A}$	401 $\mu\text{A/A}$
1 mA	1 kHz	1 mA	130 $\mu\text{A/A}$	252 $\mu\text{A/A}$	-38 $\mu\text{A/A}$	251 $\mu\text{A/A}$
10 mA	40 Hz	10 mA	40 $\mu\text{A/A}$	401 $\mu\text{A/A}$	-140 $\mu\text{A/A}$	401 $\mu\text{A/A}$
10 mA	1 kHz	10 mA	150 $\mu\text{A/A}$	252 $\mu\text{A/A}$	-35 $\mu\text{A/A}$	251 $\mu\text{A/A}$
100 mA	40 Hz	100 mA	90 $\mu\text{A/A}$	401 $\mu\text{A/A}$	-115 $\mu\text{A/A}$	401 $\mu\text{A/A}$
100 mA	1 kHz	100 mA	220 $\mu\text{A/A}$	252 $\mu\text{A/A}$	5.0 $\mu\text{A/A}$	251 $\mu\text{A/A}$
100 mA	5 kHz	100 mA	310 $\mu\text{A/A}$	252 $\mu\text{A/A}$	140 $\mu\text{A/A}$	251 $\mu\text{A/A}$
1 A	40 Hz	1 A	90 $\mu\text{A/A}$	501 $\mu\text{A/A}$	-150 $\mu\text{A/A}$	500 $\mu\text{A/A}$
1 A	1 kHz	1 A	260 $\mu\text{A/A}$	601 $\mu\text{A/A}$	-10 $\mu\text{A/A}$	600 $\mu\text{A/A}$

TABELA VI. REFERENTNA VRIJEDNOST OTPORNOSTI

Vrijednost	Opseg	Prvi DMM		Drugi DMM		
		ϵ (mA/A)	U ($\mu\text{A/A}$)	ϵ (mA/A)	U ($\mu\text{A/A}$)	
0 Ω	10 Ω	10 Ω	0.0 $\mu\Omega$	32 $\mu\Omega$	0.0 $\mu\Omega$	27 $\mu\Omega$
10 Ω	10 Ω	10 Ω	-1.0 $\mu\Omega/\Omega$	10 $\mu\Omega/\Omega$	-1.5 $\mu\Omega/\Omega$	10 $\mu\Omega/\Omega$
100 Ω	100 Ω	100 Ω	-1.0 $\mu\Omega/\Omega$	9 $\mu\Omega/\Omega$	-1.0 $\mu\Omega/\Omega$	9 $\mu\Omega/\Omega$
1 k Ω	1 k Ω	1 k Ω	-1.0 $\mu\Omega/\Omega$	6 $\mu\Omega/\Omega$	1.0 $\mu\Omega/\Omega$	6 $\mu\Omega/\Omega$
10 k Ω	10 k Ω	10 k Ω	1.0 $\mu\Omega/\Omega$	6 $\mu\Omega/\Omega$	3.0 $\mu\Omega/\Omega$	6 $\mu\Omega/\Omega$
100 k Ω	100 k Ω	100 k Ω	-3.0 $\mu\Omega/\Omega$	5 $\mu\Omega/\Omega$	1.5 $\mu\Omega/\Omega$	6 $\mu\Omega/\Omega$
1 M Ω	1 M Ω	1 M Ω	-7.0 $\mu\Omega/\Omega$	18 $\mu\Omega/\Omega$	-5.0 $\mu\Omega/\Omega$	18 $\mu\Omega/\Omega$
10 M Ω	10 M Ω	10 M Ω	-48 $\mu\Omega/\Omega$	30 $\mu\Omega/\Omega$	7.5 $\mu\Omega/\Omega$	30 $\mu\Omega/\Omega$

Rezultati koje je IMBIH-ova laboratorija iskazala u ovoj interkomparaciji su prikazani u sljedećim tabelama.

TABELA VII. IMBIH-OVI REZULTATI ZA JEDNOSMIJERNI NAPON

Vrijednost	Opseg	ϵ ($\mu\text{V/V}$)	U ($\mu\text{V/V}$)
0 mV	100 mV	0.07 $\mu\text{V/V}$	1 $\mu\text{V/V}$
100 mV	100 mV	-11.50 $\mu\text{V/V}$	14 $\mu\text{V/V}$
-100 mV	100 mV	8.10 $\mu\text{V/V}$	14 $\mu\text{V/V}$
1 V	1 V	-2.30 $\mu\text{V/V}$	7.0 $\mu\text{V/V}$
10 V	10 V	-0.60 $\mu\text{V/V}$	5.0 $\mu\text{V/V}$
5 V	10 V	-0.60 $\mu\text{V/V}$	5.0 $\mu\text{V/V}$
0 V	10 V	0.00 $\mu\text{V/V}$	1 $\mu\text{V/V}$
-5 V	10 V	-0.20 $\mu\text{V/V}$	5.0 $\mu\text{V/V}$
-10 V	10 V	-0.30 $\mu\text{V/V}$	5.0 $\mu\text{V/V}$
100 V	100 V	-0.50 $\mu\text{V/V}$	7.0 $\mu\text{V/V}$
1000 V	1000 V	4.90 $\mu\text{V/V}$	8.0 $\mu\text{V/V}$

TABELA VIII. IMBIH-OVI REZULTATI ZA NAIZMJENIČNI NAPON

Vrijednost	Opseg	ϵ ($\mu\text{V/V}$)	U ($\mu\text{V/V}$)	
100 mV	40 Hz	100 mV	-103 $\mu\text{V/V}$	175 $\mu\text{V/V}$
100 mV	1 kHz	100 mV	-147 $\mu\text{V/V}$	175 $\mu\text{V/V}$
1 V	40 Hz	1 V	-9.0 $\mu\text{V/V}$	65 $\mu\text{V/V}$
1 V	1 kHz	1 V	-4.0 $\mu\text{V/V}$	65 $\mu\text{V/V}$
10 V	40 Hz	10 V	-4.0 $\mu\text{V/V}$	60 $\mu\text{V/V}$
10 V	1 kHz	10 V	-44 $\mu\text{V/V}$	60 $\mu\text{V/V}$
10 V	100 kHz	10 V	117 $\mu\text{V/V}$	140 $\mu\text{V/V}$
100 V	40 Hz	100 V	-19 $\mu\text{V/V}$	70 $\mu\text{V/V}$
100 V	1 kHz	100 V	-57 $\mu\text{V/V}$	70 $\mu\text{V/V}$
700 V	40 Hz	1000 V	10 $\mu\text{V/V}$	110 $\mu\text{V/V}$
700 V	1 kHz	1000 V	-50 $\mu\text{V/V}$	110 $\mu\text{V/V}$

TABELA IX. IMBIH-OVI REZULTATI ZA JEDNOSMIJERNU STRUJU

Vrijednost	Opseg	ϵ ($\mu\text{A/A}$)	U ($\mu\text{A/A}$)
1 mA	1 mA	0.0 $\mu\text{A/A}$	8.0 $\mu\text{A/A}$
-1 mA	1 mA	6.0 $\mu\text{A/A}$	8.0 $\mu\text{A/A}$
10 mA	10 mA	-7.0 $\mu\text{A/A}$	8.0 $\mu\text{A/A}$
100 mA	100 mA	8.0 $\mu\text{A/A}$	8.5 $\mu\text{A/A}$
-100 mA	100 mA	20 $\mu\text{A/A}$	8.5 $\mu\text{A/A}$
1 A	1 A	62 $\mu\text{A/A}$	130 $\mu\text{A/A}$

TABELA X. IMBIH-OVI REZULTATI ZA NAIZMJENIČNU STRUJU

Vrijednost	Opseg	ϵ ($\mu\text{A/A}$)	U ($\mu\text{A/A}$)	
1 mA	40 Hz	1 mA	-52 $\mu\text{A/A}$	145 $\mu\text{A/A}$
1 mA	1 kHz	1 mA	-41 $\mu\text{A/A}$	130 $\mu\text{A/A}$
10 mA	40 Hz	10 mA	-38 $\mu\text{A/A}$	130 $\mu\text{A/A}$
10 mA	1 kHz	10 mA	1.0 $\mu\text{A/A}$	115 $\mu\text{A/A}$
100 mA	40 Hz	100 mA	-19 $\mu\text{A/A}$	130 $\mu\text{A/A}$
100 mA	1 kHz	100 mA	21 $\mu\text{A/A}$	110 $\mu\text{A/A}$
100 mA	5 kHz	100 mA	116 $\mu\text{A/A}$	150 $\mu\text{A/A}$
1 A	40 Hz	1 A	-45 $\mu\text{A/A}$	130 $\mu\text{A/A}$
1 A	1 kHz	1 A	50 $\mu\text{A/A}$	115 $\mu\text{A/A}$

TABELA XI. IMBIH-OVI REZULTATI ZA OTPORNOST

Vrijednost	Opseg	ϵ ($\mu\Omega/\Omega$)	U ($\mu\Omega/\Omega$)
10 Ω	0 Ω	0.0 $\mu\Omega/\Omega$	40 $\mu\Omega/\Omega$
10 Ω	10 Ω	4.0 $\mu\Omega/\Omega$	7.0 $\mu\Omega/\Omega$
100 Ω	100 Ω	2.6 $\mu\Omega/\Omega$	8.0 $\mu\Omega/\Omega$
1 k Ω	1 k Ω	3.1 $\mu\Omega/\Omega$	8.0 $\mu\Omega/\Omega$
10 k Ω	10 k Ω	3.4 $\mu\Omega/\Omega$	8.0 $\mu\Omega/\Omega$
100 k Ω	100 k Ω	4.8 $\mu\Omega/\Omega$	8.0 $\mu\Omega/\Omega$
1 M Ω	1 M Ω	4.5 $\mu\Omega/\Omega$	8.0 $\mu\Omega/\Omega$
10 M Ω	10 M Ω	-9.3 $\mu\Omega/\Omega$	8.0 $\mu\Omega/\Omega$

III. ISKAZIVANJE REZULTATA INETRKOMPARIJE PREKO EN BROJA

Jedan od načina za analizu rezultata interkomparacije je En broj. Ovaj broj se računa prema formuli [2]:

$$E_n = \frac{\epsilon_{lab} - \epsilon_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (6)$$

Gdje je:

- ϵ_{lab} - pojedinačni rezultat mjerenja u laboratoriji učesnici interkomparacije,
- ϵ_{ref} - rezultat mjerenja u pilot laboratoriji,
- U_{lab} - proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) mjerenja u laboratoriji učesnici interkomparacije,
- U_{ref} - proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) mjerenja u pilot laboratoriji.

Kriterijum za ocjenu kvaliteta interkomparacije zasnovan na En broju se iskazuje preko izraza:

$$\begin{aligned} |E_n| \leq 1.0 & \text{ rezultati su zadovoljavajući} \\ |E_n| > 1.0 & \text{ rezultati nisu zadovoljavajući} \end{aligned}$$

Rezultati interkomparacije iskazani preko En broja prikazani su u tabelama XII - XVI. Na osnovu ovih rezultata može se uočiti da je kod pojedinih laboratorija, koje su učestvovala u interkomparaciji rezultat mjerenja u pojedinim tačkama je imao En broj veći od 1 ili manji od -1. Ovakvi rezultati su pokazatelji problema koji su bili prisutni tokom mjerenja u pojedinim laboratorijama. U ovim situacijama ovako ostvaren rezultat svakako je potrebno naknadno provjeriti i ako je moguće identifikovati izvore koji su uticali da rezultat bude

nezadovoljavajući. Takođe, važno je napomenuti da se kvalitet rezultata se ne iskazuje na osnovu En broja. Ovaj broj je samo pokazatelj da li je određeni rezultat i pridružena mjerna nesigurnost laboratorije zadovoljavajući ili ne. Svakako glavni pokazatelj kvaliteta iskazanih rezultata su mala greška i mala mjerna nesigurnost. Prema objavljenim rezultatima interkomparacije IMBIH-ovi rezultati u svim ispitnim tačkama ove interkomparacije pokazali su se zadovoljavajući. Naknadnom analizom objavljenih rezultata za pojedine mjerne tačke provedena je dodatna analiza u našoj laboratoriji kako bi ustanovili moguće izvore koje uzrokuju veća odstupanja iskazanih rezultata.

inetrkomparacije samo za pojedine mjerne tačke sa odstupanjima i pridruženim mjernim nesigurnostima.

TABELA XII. REZULTATI INTERKOMPARACIJE ZA JEDNOSMJERNI NAPON

Vrijednost	$ E_n $							
	Lab1	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	IM-BIH	Lab7	Lab8
0 mV	-0.1	0.1	0.7	0.2	-0.1	0.1	0.8	0.2
100 mV	-0.5	0.1	0.4	0.0	-0.2	-0.6	0.7	-1.1
-100 mV	0.6	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	-0.8	-1.7
1 V	0.2	0.2	0.4	0.0	0.2	-0.2	0.3	-2.4
10 V	0.2	0.1	0.4	0.2	0.2	-0.2	0.0	-1.2
5 V	0.2	0.0	0.5	0.2	0.3	0.6	0.5	-0.5
0 V	0.3	0.0	0.5	0.0	0.1	0.0	/	0.1
-5 V	0.4	0.0	0.5	0.1	0.2	0.0	0.6	-0.1
-10 V	0.4	0.0	0.5	0.5	0.2	-0.1	-0.1	-0.4
100 V	0.1	0.0	0.3	0.2	-0.6	-0.2	0.0	-0.5
1000 V	0.2	-0.1	0.3	0.0	0.0	0.3	0.3	0.9

TABELA XIII. REZULTATI INTERKOMPARACIJE ZA DC STRUJU

Vrijednost	$ E_n $							
	Lab1	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	IM-BIH	Lab7	Lab8
1 mA	0.0	0.5	-0.1	0.0	0.6	0.0	0.4	0.0
-1 mA	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	0.9	0.4	0.5	-0.1
10 mA	0.1	0.4	-0.2	0.1	0.4	-0.3	0.4	0.5
100 mA	0.0	0.3	-0.2	0.0	-0.3	0.2	0.1	-0.1
-100 mA	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.3	0.6	0.3	0.0
1 A	0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.4	0.0	-0.8	0.2

TABELA XIV. REZULTATI INTERKOMPARACIJE ZA NAIZMJENIČNI NAPON

Vrijednost		$ E_n $							
		Lab1	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	IM-BIH	Lab7	Lab8
100 mV	40 Hz	0.2	0.1	-0.1	0.0	0.1	-0.1	0.7	0.1
100 mV	1 kHz	0.1	0.9	-0.1	-0.1	0.0	0.2	-0.6	0.5
1 V	40 Hz	0.3	/	0.3	0.1	0.2	0.2	-0.7	0.1
1 V	1 kHz	0.1	/	0.3	0.2	0.5	0.1	0.0	0.1
10 V	40 Hz	0.2	-0.3	0.2	0.0	0.1	-0.1	-0.5	0.0
10 V	1 kHz	-0.1	-0.5	0.1	-0.1	0.2	-0.2	0.1	0.0
10 V	100 kHz	1.9	0.1	0.1	-0.1	1.6	0.2	-1.2	-0.1
100 V	40 Hz	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.5	0.0
100 V	1 kHz	0.0	-0.6	-0.2	-0.3	0.2	-0.4	0.0	0.0
700 V	40 Hz	-0.2	0.5	0.2	0.1	-0.3	0.0	-0.3	/
700 V	1 kHz	-0.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.1	/

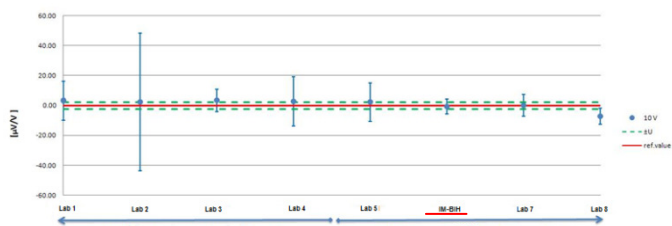
TABELA XV. REZULTATI INTERKOMPARACIJE ZA NAIZMJENIČNU STRUJU

Vrijednost		$ E_n $							
		Lab1	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	IM-BIH	Lab7	Lab8
1 mA	40 Hz	0.1	0.3	-0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0
1 mA	1 kHz	-0.1	0.2	0.0	0.5	-0.1	0.0	-0.1	0.0
10 mA	40 Hz	0.0	0.3	-0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	0.0
10 mA	1 kHz	-0.1	0.2	0.0	0.2	0.1	0.1	0.3	0.0
100 mA	40 Hz	-0.1	0.2	-0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.0
100 mA	1 kHz	-0.2	0.0	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.2
100 mA	5 kHz	-0.2	/	/	0.0	-0.1	-0.1	0.1	/
1 A	40 Hz	-0.1	0.2	-0.1	0.0	0.3	0.2	0.0	-0.1
1 A	1 kHz	-0.2	/	0.0	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1

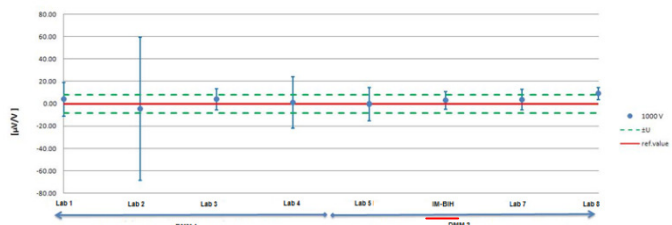
TABELA XVI. REZULTATI INTERKOMPARACIJE ZA DC OTPORNOST

Vrijednost	$ E_n $							
	Lab1	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	IM-BIH	Lab7	Lab8
0 Ω	-0.5	-0.5	0.0	1.0	0.4	0.0	0.8	0.1
10 Ω	0.7	0.3	0.0	0.7	0.2	0.4	0.3	0.2
100 Ω	0.6	0.3	0.1	0.6	0.1	0.3	0.6	0.3
1 k Ω	0.5	1.0	0.2	0.3	-0.1	0.2	0.2	0.7
10 k Ω	0.1	1.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.7	-0.3
100 k Ω	0.1	1.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.5	0.1
1 M Ω	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.5	0.3	0.4
10 M Ω	0.4	0.3	0.6	0.1	-0.6	-0.5	-0.2	/

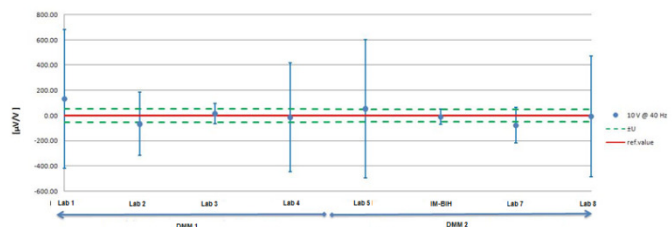
Obzirom da je u ovoj interkomparaciji bilo potrebno izvršiti mjerenje u 45 testnih tačaka, zbog ograničenosti prostora na narednim grafikonima su prikazani rezultati



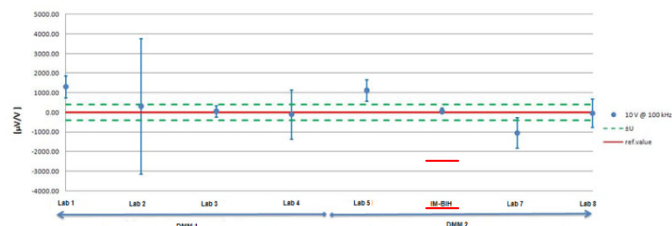
Slika 1. Jednosmjerni napon- mjerna tačka 10 V



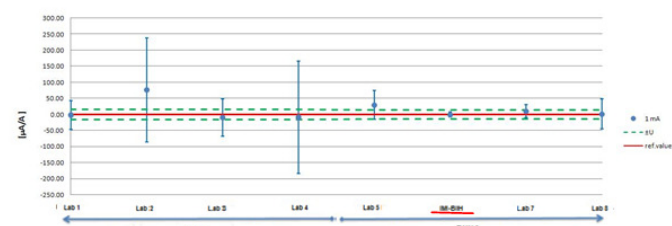
Slika 2. Jednosmjerni napon- mjerna tačka 1000 V



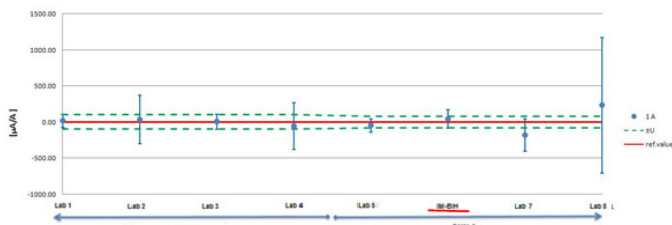
Slika 3. Naizmjenični napon- mjerna tačka 10 V 40 Hz



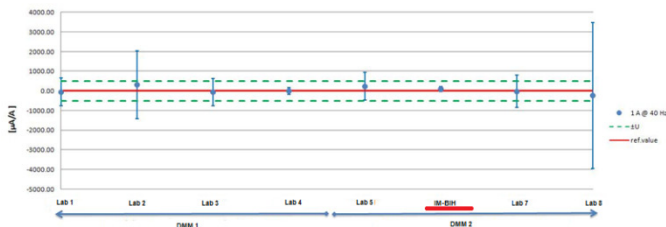
Slika 4. Naizmjenični napon- mjerna tačka 10 V 100 kHz



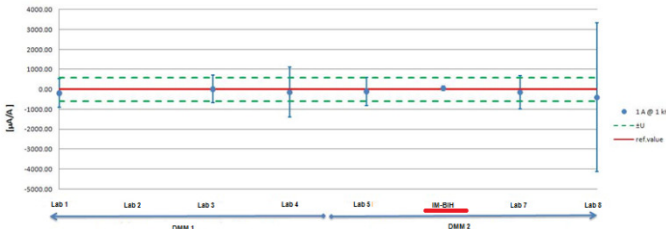
Slika 5. Jednosmjerna struja- mjerna tačka 1 mA



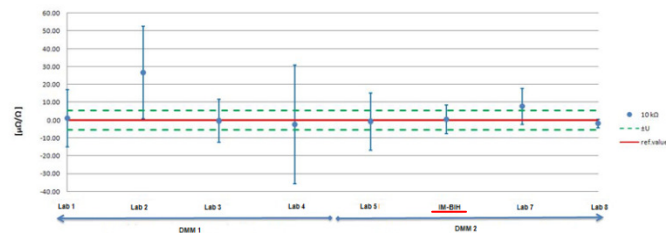
Slika 6. Jednosmjerna struja- mjerna tačka 1 A



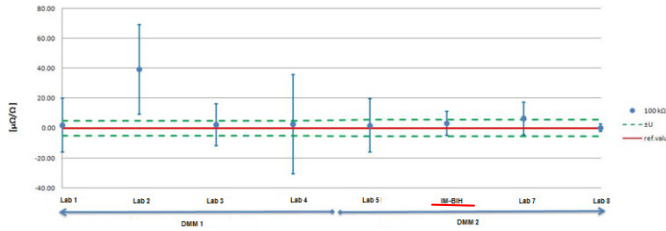
Slika 7. Naizmjenična struja-mjerna tačka 1 A 40 Hz



Slika 8. Naizmjenična struja-mjerna tačka 1 A 1 kHz



Slika 9. Otpornost- mjerna tačka 10 kΩ



Slika 10. Otpornost- mjerna tačka 100 kΩ

IV. ZAKLJUČAK

Učešće u programima međulaboratorijskih poređenja je pouzdan način utvrđivanja kompetentnosti određene laboratorije, zbog čega tijela za akreditaciju i zahtijevaju od akreditovanih laboratorija da obavezno učestvuju u takvim programima. Pri tome, rezultati takvih poređenja omogućuju konkretnoj laboratoriji da kroz njihovu pravilnu analizu dodatno unaprijedi kvalitet svojih usluga bez obzira na to da li su rezultati ocijenjeni kao zadovoljavajući ili nezadovoljavajući.

Ova interkomparacija je prva no kojoj je IMBIH-ova laboratorija za električne veličine učestvovala do sada. Ovo učešće je doprinjelo potvrđivanju naših kalibracionih metoda i razumjevanju procesa interkomparacije uopšte. Takođe ova interkomparacija zbog svoje specifičnosti (kvar na DMM1) je pokazala da organizovanje procesa međulaboratorijsko poređenja nije lak posao. Ovakve situacije nisu česte u procesima međulaboratorijskog poređenja i ako se pojave često rezultuju prekidom čitavog procesa. Ovakva situacija uzrokuje visoke finansijske posljedice i za PT provajdera i za same učesnike interkomparacije. Našim učešćem u ovoj

interkomparaciji potvrdili smo naše kalibracione metode kao i procjene mjernih nesigurnosti, te uvidjeli mogućnosti za njihovo poboljšanje. U međuvremenu u laboratoriji za električne veličine Instituta nabavljeni su etaloni višeg metrološkog nivoa od onih koji su korišteni u ovoj interkomparaciji. Ovo će svakako doprinjeti poboljšanju mjernih mogućnosti laboratorije, što će ubuduće doprinjeti da rezultati za pojedine mjerne tačke iz ove interkomparacije budu iskazani sa manjom mjernom nesigurnošću. Takve mjerne mogućnosti IMBIH planira da potvrdi kroz učešće u međunarodnim interkomparacijama koje su priznate od strane Međunarodnog biroa za tegove i mjere - BIPM.

LITERATURA

- [1] IPA 2011 PROFICIENCY TESTING – PT5 Report-Intercomparison with Calibration of Digital Multimeter, BUREAU OF METROLOGY Republic of Macedonia, Decembar 2013.
- [2] Standard ISO/IEC 17043:2010: Conformity assessment – General requirements
- [3] B. Voljč, M. Lindič, R. Lapuh: Direct measurement of AC current by measuring the voltage drop, IEEE vol. 58, no. 4, page 863-867, April 2009.
- [4] European Co-operation for Accreditation-EA-4/02 M:2013 –“Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration”

ABSTRACT

This paper describes the inter-laboratory comparison in measurements of electrical quantities (eg. AC voltage, DC voltage, AC current, DC current and DC resistance) in which laboratory for electrical quantities of the Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina (IMBIH) participated. This inter-laboratory comparison is part of the process of proving laboratory competence (proficiency testing - PT) supported by project IPA 2011. Comparison have been performed between laboratory from Bureau of Metrology of Republic of Macedonia, as a pilot laboratory and National Metrology laboratories from Albania, Bosnia and Herzegovina, Croatian, Kosovo, Montenegro and the laboratory Nikola Tesla Institute from Serbia. Digital multimeter 8 ½ HP / Agilent 3458 was chosen as traveling standard. This inter-laboratory comparison have been carried out in accordance with the recommendations EA-2/03 "EAL Interlaboratory Comparison" and ISO / IEC 17043:2011. The goal of the comparison was proving calibration capabilities of each laboratorie .

INTER-LABORATORY COMPARISON IN MEASUREMENTS OF ELECTRICAL QUANTITIES

Vladimir Milojević, Srđan Čalija