

ETALONIRANJE MERNE APARATURE ZA ISPITIVANJE TAČNOSTI MERNIH TRANSFORMATORA

D. Naumović-Vuković, S. Škundrić

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

Sadržaj: *Kod etaloniranja aparature za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora koja obuhvata referentni etalon transformator, uređaj za merenje amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora, izvor referentne struje i referentno opterećenje, etaloniranje uređaja za određivanje greške predstavlja ozbiljan metrološki problem. U radu je opisana nova merna metoda jednovremenog uporednog etaloniranja aparature za ispitivanje tačnosti mernih transformatora kojom se ovaj problem rešava. Metoda je eksperimentalno proverena, i u radu je data analiza dobijenih rezultati kao i proračun merne nesigurnosti.*

Ključne reči: *metoda kompenzovanog strujnog komparatora, diferencijalna metoda, merna nesigurnost*

1. UVOD

Ispitivanje tačnosti strujnih transformatora podrazumeva jednu složenu i specifičnu mernu aparaturu koja se sastoji od više različitih mernih uređaja bez obzira na primenjenu mernu metodu. Kod diferencijalne merne metode to su: etalon strujni transformator, uređaj za merenje amplitudne i fazne greške transformatora, referentno opterećenje, regulisani izvor primarnih struja kao i sistem za merenje referentne struje. Kod metode kompenzovanog strujnog komparatora struktura merne aparature je vrlo slična, samo što kompenzovani strujni komparator integriše ulogu etalon strujnog transformatora i izvora primarnih struja. Etaloniranje ovakve merne aparature do sada se svodilo na etaloniranje pojedinačnih mernih uređaja. Etaloniranje etalon strujnog transformatora obavlja se sa referentnom mernom aparaturom za ispitivanje tačnosti čija je merna nesigurnost najmanje tri do pet puta manja od deklariranih grešaka ispitivanog etalona. Etaloniranje referentnog opterećenja danas nije posebno težak zadatak s obzirom da su razvijeni merni uređaji koji omogućavaju direktno merenje aktivne i reaktivne snage, odnosno merenje impedanse i $\cos\varphi$ referentnog opterećenja.

Najozbiljniji problem predstavlja svakako etaloniranje samog uređaja za merenje amplitudne i fazne greške. U principu, etaloniranje nekog mernog uređaja može se obaviti direktnom i indirektnom mernom metodom. Direktna merna metoda podrazumeva generisanje tačne vrednosti odgovarajuće merene veličine i merenje iste sa ispitivanim uređajem. Uporedna metoda takođe podrazumeva generisanje merene veličine, ali se ista meri i sa ispitivanim i sa referentnim (tačnim) uređajem, a izmerene vrednosti se upoređuju. To podrazumeva ili jednovremenost merenja ili nepromenljivost merene veličine tokom etaloniranja. Kada je reč o uređajima za merenje amplitudne i fazne greške strujnih transformatora problemi su složeni i višestruki i kod direktne i kod indirektno merne metode.

Direktna metoda podrazumeva generisanje tačnih vrednosti amplitudne i fazne greške određenog strujnog transformatora. Amplitudna i fazna greška strujnog mernog transformatora definisane su njegovim konstruktivnim i tehnološkim parametrima (materijalom, oblikom i dimenzijama magnetnog kola, brojem amper-zavojaka, dužinom i presekom žice, geometrijom primarnog i sekundarnog namotaja), ali i eksploatacionim parametrima (sekundarnim opterećenjem, odnosom merene struje prema naznačenoj, učestanošću, izobličenjem i oblikom merene primarne struje, kao i radnom temperaturom). Na konkretnom strujnom transformatoru moguće je vrlo precizno menjati vrednost amplitudne greške korekcijom broja navojaka sekundarnog ili primarnog namotaja. Međutim ostaje problem varijacije fazne greške strujnog transformatora. Postoje takođe elektronski uređaji za generisanje amplitudne i fazne greške tzv. kalibratori kompleksne greške, ali su isti razvijeni samo za određena specifična rešenja mernih uređaja i aparatura za ispitivanje tačnosti mernih transformatora [1].

Indirektna, uporedna, merna metoda zasniva se na poređenju rezultata merenja amplitudne i fazne greške nekog strujnog transformatora sa ispitivanim i referentnim mernim uređajem. Obezbeđenje uslova nepromenljivosti merene veličine u intervalu etaloniranja ne može se ostvariti u apsolutnom smislu iz više razloga. Interval etaloniranja je relativno veliki i može biti od desetak minuta do par sati. Izvesno je da u tom periodu postoje određena odstupanja u eksploatacionim parametrima ispitivanog transformatora, kako u pogledu ispitnog opterećenja tako i u pogledu ispitne struje i mrežne učestanosti. Uticaj temperature ma koliko da je mali, unosi takođe određenu mernu nesigurnost u takvo jedno uporedno etaloniranje. Takođe je teško obezbediti potpuno iste uslove ispitivanja u smislu spoljašnjih uticaja stranih elektromagnetnih polja.

Rešenje navedenih problema bilo bi u jednovremenom merenju amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora sa ispitivanom i sa referentnom mernom aparaturom, pod uslovom da je to moguće ostvariti. Pri tome treba imati u vidu da postoji više različitih mernih metoda i još više različitih rešenja mernih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora.

U Laboratoriji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ etaloniranje strujnih transformatora je zasnovano na metodi kompenzovanog strujnog komparatora [2], a mernu aparaturu čine još i mikroprocesorski uređaj za direktno merenje amplitudne i fazne greške, i ispitne sekundarne struje [3], referentno opterećenje, kao i regulisani izvor sekundarne struje.

Najveći broj mernih aparatura za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora u Srbiji, ali i u bivšoj Jugoslaviji, zasnovan je na metodi kompenzovanog strujnog komparatora. Sve one su identične strukture što je i razumljivo, jer su realizovane i isporučene od strane Instituta. Međutim, u zemlji i neposrednom okruženju postoji i nekoliko mernih aparatura zasnovanih na diferencijalnoj mernoj metodi i uređajima za merenje amplitudne i fazne greške. Posebnu pažnju autori su poklonili savremenom uređaju tip 2767 renomiranog proizvođača „Tetex“. Poslednjih godina napravljeno je nekoliko komparativnih merenja sa uređajima „Tetex“ i Instituta „Nikola Tesla“ [4]. U okviru tih komparacija istražena je mogućnost uporednog jednovremenog etaloniranja strujnog etalon transformatora sa dve različite merene metode i dva potpuno različita merna uređaja za merenje amplitudne i fazne greške. Istraživanja su pokazala da je to ne samo moguće, nego da takav pristup donosi i niz prednosti, posebno ako se radi o interkomparaciji etalon strujnih transformatora [5]. Koliko je autorima poznato, na

čine je etalon transformator sa elektronskom kompenzacijom greške, tip 4764 i uređaj za merenje amplitudne i fazne greške tip 2767. Etalon transformator tip 4764 ima deklarisanu amplitudnu grešku ± 10 ppm i faznu grešku $\pm 0,05'$ (14,5 ppm). Mikroprocesorski uređaj tip 2767 meri amplitudnu grešku bolje od $\pm 0,5$ % od očitane vrednosti i ± 10 ppm i ± 1 digit, odnosno faznu grešku bolje od $\pm 0,5$ % od očitane vrednosti i $\pm 0,034'$ (10 ppm) i ± 1 digit.

Obe merne aparature napajaju se iz istog strujnog izvora. Strujni transformator T_x je opterećen sa jednim konstantnim internim opterećenjem koje potiče od spojnih veza i mernih elemenata obe aparature, i sa eksternim referentnim opterećenjem Z_o . Opterećenje Z_o je promenljivo i ima određen uticaj na greške ispitivanog strujnog transformatora koje se mere jednovremeno sa obe merne aparature.

Ceo postupak etaloniranja ispitivane merne aparature se sastoji u tome što se mere amplitudna i fazna greška strujnog transformatora T_x i sa ispitivanom i sa referentnom mernom aparaturom pod istim uslovima, a za različite vrednosti opterećenja. Dobijeni rezultati se zatim međusobno porede. Razlike u rezultatima merenja treba da su u granicama zbira deklariranih (procenjenih) grešaka obe merne aparature.

Kako su oba uređaja koncipirana na bazi mikroprocesora, obrada merenih signala dobijenih različitim metodama obavlja se u samim uređajima. Uređaji su povezani sa PC, i to uređaj INST-2A serijskom vezom RS232, a uređaj 2767 paralelnom vezom IEEE 488. Vođenje samog procesa merenja, prikaz rezultata merenja i njihova finalna obrada vrši se odgovarajućim softverom prilagođenim za ovu specifičnu jednovremenu uporednu mernu metodu.

Eksperimentalna provera izložene merne metode jednovremenog merenja grešaka transformacije ispitivanog strujnog transformatora sa dve merne aparature, realizovana je u Laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ u periodu novembar-decembar 2007. godine. Tokom ovih merenja u laboratoriji su bili obezbeđeni sledeći uslovi ispitivanja: temperatura ambijenta od 19°C do 22°C ; relativna vlažnost vazduha od 30 % do 35 %; atmosferski pritisak od 95 kPa do 105 kPa; učestanost mrežnog napona $50\text{ Hz} \pm 1\text{ Hz}$; distorzija mrežnog napona manja od 5 %. Etaloniranje je obavljeno sa strujnim transformatorom naznačenog prenosnog odnosa transformacije 25A/5A i pri vrednostima tereta 2,5 VA, $\cos\varphi = 1$ i pri 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$.

U tabeli 1. prikazani su rezultati merenja kada je transformator T_x posebno ispitivan po metodi kompenzovanog strujnog komparatora (u tabeli označeno sa KSK) i posebno po diferencijalnoj metodi (u tabeli označeno sa DIF). Rezultati jednovremenog ispitivanja transformatora T_x po metodi kompenzovanog strujnog komparatora (KSK) i po diferencijalnoj metodi (DIF) prikazani su u tabeli 2.

Razlika rezultata merenja grešaka (KSK-DIF) kod nejednovremenog, zasebnog etaloniranja, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom za amplitudnu grešku je u rasponu od 0,038 % do 0,095 %, a za faznu grešku od 1,90 min do 5,40 min. U ovom slučaju razlike amplitudne greške su u proseku 0,053 %, odnosno za faznu grešku 2.72 min. Razlika rezultata merenja grešaka (KSK-DIF) kada se etaloniranje vrši jednovremeno metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, za amplitudnu grešku je u rasponu od 0,001 % do 0,02 %, a za faznu grešku od 0,31 min do 0,95 min. Dakle, kod jednovremenog ispitivanja razlike amplitudne greške su u proseku 0.00067 %, odnosno za faznu grešku 0.58 min. Analizom dobijenih rezultata vidi se da je razlika izmerenih vrednosti za amplitudnu i faznu grešku kod jednovremenog uporednog etaloniranja skoro za red

veliĉine manja u odnosu na razlike grešaka izmerenih zasebnim etaloniranjima po obe metode.

Tabela 1. Rezultati zasebnog ispitivanja taĉnosti strujnog transformatora T_x metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom

25A/5A		Metoda				Razlika met.	
S_n	I/I_n (%)	KSK		DIF		KSK-DIF	
		p_i (%)	δ (min)	p_i (%)	δ (min)	p_i (%)	δ (min)
2,5VA $\cos\varphi = 1$	5	0.2959	19.2	0.23	24.6	0.066	-5.40
	20	0.3886	11.15	0.294	15.01	0.095	-3.86
	100	0.3815	4.36	0.344	6.76	0.038	-2.40
	120	0.3569	5.20	0.313	7.39	0.044	-2.19
10 VA $\cos\varphi = 1$	5	-0.5730	27.44	-0.612	32.6	0.039	-5.16
	20	-0.2181	12.97	-0.259	16.9	0.041	-3.93
	100	-0.0143	5.66	-0.0595	7.56	0.045	-1.90
	120	-0.0548	6.55	-0.1108	8.78	0.056	-2.23

Tabela 2. Greške merenja kada se strujni transformator T_x ispituje jednovremeno metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom

25A/5A		Metoda				Razlika met.	
S_n	I/I_n (%)	KSK		DIF		KSK-DIF	
		p_i (%)	δ (min)	p_i (%)	δ (min)	p_i (%)	δ (min)
2,5VA $\cos\varphi = 1$	5	0.1885	28.20	0.186	27.8	0.003	0.40
	20	0.2747	15.05	0.279	15.9	-0.004	-0.85
	100	0.3318	6.35	0.332	6.7	0.000	-0.31
	120	0.3114	7.13	0.313	7.5	-0.002	-0.37
10 VA $\cos\varphi = 1$	5	-0.5038	27.40	-0.481	28.0	-0.023	-0.60
	20	-0.2599	15.95	-0.248	16.9	-0.012	-0.95
	100	-0.0789	7.35	-0.0807	7.8	0.002	-0.47
	120	-0.1159	7.99	-0.1228	8.7	0.007	-0.71

3. ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Etaloniranje mernih instrumenata i uređaja koje je u skladu sa međunarodnim standardom ISO 17025 zahteva određivanje merne nesigurnosti za svaki iskazani rezultat merenja. To podrazumeva detaljnu metrološku analizu merne nesigurnosti za primenjenu mernu metodu i korišćene merne uređaje. Metrološka analiza polazi od matematičkog modela greške primenjene merne metode i uređaja. Merenje amplitudne

greške strujnih transformatora i po diferencijalnoj mernoj metodi i metodi kompenzovanog strujnog komparatora, kada se svaka od metoda sprovodi zasebno, može se opisati sledećim matematičkim izrazom:

$$g_{aT} = g_{aM} + g_{aRE} + \Delta g_{aU} + \Delta g_{a(U-rez)} + \Delta g_{aOpt} + \Delta g_{aIref} \quad (1)$$

gde su: g_{aM} izmerena vrednost amplitudne greške ispitivanog etalon strujnog transformatora (srednja vrednost $N \geq 3$ očitavanja) uređajima INST-2A, odnosno Tettex 2767 (u daljem tekstu uređaji za merenje amplitudne i fazne greške), g_{aT} greška ispitivanog etalon transformatora, g_{aRE} amplitudna greška referentnog etalona (kompenzovanog strujnog komparatora KSK-1000, odnosno etalon transformatora sa elektronskom kompenzacijom greške Tettex 4764), Δg_{aU} greška merenja amplitudne greške uređaja za merenje amplitudne i fazne greške, $\Delta g_{a(U-rez)}$ greška usled rezolucije uređaja za merenje amplitudne i fazne greške, Δg_{aOpt} greška usled greške referentnog opterećenja i Δg_{aIref} greška usled merenja referentne struje.

Merenje fazne greške strujnih transformatora opisano je sledećim izrazom:

$$g_{fT} = g_{fM} + g_{fRE} + \Delta g_{fU} + \Delta g_{f(U-rez)} + \Delta g_{fOpt} + \Delta g_{fIref} \quad (2)$$

gde su: g_{fM} očitana vrednost fazne greške ispitivanog strujnog etalon transformatora (srednja vrednost $N \geq 3$ očitavanja) na primenjenom uređaju za merenje amplitudne i fazne greške, g_{fT} fazna greška ispitivanog strujnog etalon transformatora, g_{fRE} fazna greška referentnog etalona, Δg_{fU} greška merenja fazne greške uređajem za merenje amplitudne i fazne greške, $\Delta g_{f(Urez)}$ greška usled rezolucije primenjenog uređaja, Δg_{fOpt} greška usled greške referentnog opterećenja i Δg_{fIref} greška usled merenja referentne struje.

Kao što se iz jednačina (1) i (2) vidi izvori merne nesigurnosti su različiti i višestruki. U određivanju merne nesigurnosti etaloniranja strujnih transformatora obuhvaćene su samo najznačajnije komponente. Kod merenja amplitudne greške to su:

- Merna nesigurnost usled ponovljenih merenja $u_1 = u(g_{aM})$ – merna nesigurnost tip A, Gausove (normalne) raspodele, sa $n-1$ stepeni slobode, gde je $n \geq 3$. Izražava se kao eksperimentalna standardna devijacija amplitudne greške.
- Merna nesigurnost usled amplitudne greške referentnog etalona $u_2 = u(\Delta g_{aRE})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele, sa stepenom slobode ∞ . Kod izračunavanja ove komponente uzima se vrednost greške iz poslednjeg izveštaja o etaloniranju navedenog referentnog etalona podeljena sa $\sqrt{3}$.
- Merna nesigurnost usled greške merenja amplitudne greške uređajem za merenje amplitudne i fazne greške, $u_3 = u(\Delta g_{aU})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele sa stepenom slobode ∞ . Izražava se kao vrednost amplitudne greške deklarisanе od strane proizvođača za uređaj za merenje amplitudne i fazne greške, podeljena sa $\sqrt{3}$.
- Merna nesigurnost usled rezolucije uređaja za merenje amplitudne i fazne greške pri merenju amplitudne greške, $u_4 = u(\Delta g_{a(U-rez)})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele sa stepenom slobode ∞ . Izračunava se kao vrednost najmanjeg digitalnog podeoka podeljena sa $2\sqrt{3}$.

- Merna nesigurnost usled greške priključenog opterećenja (tereta) u sekundarnom kolu $u_5 = u(\Delta g_{a\ Opt})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele sa stepenom slobode ∞ . Kod izračunavanja ove komponente uzima se vrednost osnovne greške opterećenja od 3 % podeljena sa $\sqrt{3}$.
- Merna nesigurnost usled greške merenja referentne struje $u_6 = u(\Delta g_{a\ Ref})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele, sa stepenom slobode ∞ . Izračunava se kao vrednost greške merenja referentne struje podeljena sa $\sqrt{3}$.

Kod merenja fazne greške izvori merne nesigurnosti su isti kao i kod merenja amplitudne greške samo se u određivanju uzimaju komponente merne nesigurnosti faznih grešaka respektivno označene od u_7 do u_{12} .

Kombinovana merna nesigurnost merenja amplitudne greške izračunava se prema izrazu:

$$u_c(g_{aT}) = \left[\sum_1^6 (c_i \cdot u_i(g_{ai}))^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

A kombinovana merna nesigurnost merenja fazne greške izračunava se prema izrazu:

$$u_c(g_{fT}) = \left[\sum_7^{12} (c_i \cdot u_i(g_{fi}))^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Faktori osetljivosti c_i u jednačinama (3) i (4) su jednaki jedinici izuzev faktora c_5 , c_6 , c_{11} i c_{12} koji se određuju prema jednačinama koje slede.

Koeficijent c_5 određuje se prema sledećem izrazu:

$$c_5 = \frac{\partial u_c(g_{aT})}{\partial(\Delta g_{aOpt})} \approx \frac{[g_{aT}(I_{ref}, S_n) - g_{aT}(I_{ref}, S_n/4)]}{(S_n - 1/4 S_n)} = \frac{[g_{aT}(I_{ref}, S_n) - g_{aT}(I_{ref}, S_n/4)]}{(3S_n/4)} \quad (5)$$

gde je: S_n naznačeno opterećenje ispitivanog transformatora, $g_{aT}(I_{ref}, S_n)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za naznačeno opterećenje S_n , $g_{aT}(I_{ref}, S_n/4)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za referentno opterećenje $1/4 S_n$.

Koeficijent c_6 određuje se prema sledećem izrazu:

$$c_6 = \frac{\partial u_c(g_{aT})}{\partial(\Delta g_{aRef})} \approx \frac{\Delta g_{aT}(I_{ref}, S_i)}{\Delta I_{ref}} = \frac{g_{aT}(I_{ref-1}, S_i) - g_{aT}(I_{ref-2}, S_i)}{(I_{ref-1} - I_{ref-2})} \quad (6)$$

gde je: $\Delta g_{aT}(I_{ref}, S_i)$ razlika vrednosti amplitudne greške u dve susedne merne tačke, S_i opterećenje ispitivanog transformatora, $g_{aT}(I_{ref-1}, S_i)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-1} za opterećenje S_i , $g_{aT}(I_{ref-2}, S_i)$ amplitudna greška

ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-2} za opterećenje S_i , ΔI_{ref} razlika referentnih struja u dve susedne merne tačke I_{ref-1} i I_{ref-2} .

Koeficijent c_{11} određuje se prema sledećem izrazu:

$$c_{11} = \frac{\partial u_c(g_{fT})}{\partial(\Delta g_{fOpt})} \approx \frac{[g_{fT}(I_{ref}, S_n) - g_{fT}(I_{ref}, S_n/4)]}{(S_n - 1/4 S_n)} = \frac{[g_{faT}(I_{ref}, S_n) - g_{fT}(I_{ref}, S_n/4)]}{(3S_n/4)} \quad (7)$$

gde je: S_n naznačeno opterećenje ispitivanog transformatora, $g_{fT}(I_{ref}, S_n)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za naznačeno opterećenje S_n , $g_{faT}(I_{ref}, S_n/4)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za referentno opterećenje $1/4 S_n$.

Koeficijent c_{12} određuje se prema sledećem izrazu:

$$c_{12} = \frac{\partial u_c(g_{fT})}{\partial(\Delta g_{fTref})} \approx \frac{\Delta g_{fT}(I_{ref}, S_i)}{\Delta I_{ref}} = \frac{g_{fT}(I_{ref-1}, S_i) - g_{fT}(I_{ref-2}, S_i)}{(I_{ref-1} - I_{ref-2})} \quad (8)$$

gde je: $\Delta g_{fT}(I_{ref}, S_i)$ razlika vrednosti fazne greške u dve susedne merne tačke, S_i opterećenje ispitivanog transformatora, $g_{fT}(I_{ref-1}, S_i)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-1} za opterećenje S_i , $g_{fT}(I_{ref-2}, S_i)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-2} za opterećenje S_i , ΔI_{ref} razlika referentnih struja u dve susedne merne tačke I_{ref-1} i I_{ref-2} .

Koeficijent c_5 , c_6 , c_{11} i c_{12} treba odrediti za svaku mernu tačku prema standardu [6] tj. za vrednosti referentne struje: $0,05 I_n$, $0,2 I_n$, $1,0 I_n$, $1,2 I_n$ i pri istom opterećenju S_i .

Kod jednovremenog, uporednog etaloniranja, obe aparature, i po diferencijalnoj i po metodi strujnog komparatora, napajaju se iz istog izvora strujom jednake vrednosti, a ispitivani etalon transformator je opterećen istim opterećenjem. Zbog toga su uticaji referentne struje i opterećenja na greške merenja isti za obe merne metode. Na ovaj način uticaj opterećenja i referentne struje na proračun merne nesigurnosti se eliminiše, tako da jednačine 1 i 2 dobijaju sledeći oblik:

$$g_{aT} = g_{aM} + g_{aRE} + \Delta g_{aU} + \Delta g_{a(U-rez)} \quad (9)$$

$$g_{fT} = g_{fM} + g_{fRE} + \Delta g_{fU} + \Delta g_{f(U-rez)} \quad (10)$$

Vidi se da komponente merne nesigurnosti Δg_{aOpt} , Δg_{aTref} , Δg_{fOpt} i Δg_{fTref} ne figurišu u jednačinama 9 i 10, pa se eliminiše potreba izračunavanja faktora osetljivosti c_5 , c_6 , c_{11} i c_{12} . U proračunu kombinovane merne nesigurnosti učestvuju samo merna nesigurnost usled greške primenjenih referentnih etalona i uređaja kao i merna nesigurnost usled rezolucije uređaja. To znači da se na ovaj način smanjuje i ukupna merna nesigurnost metode etaloniranja što je i eksperimentalno potvrđeno.

Ako se izneta teorijska razmatranja primene za određivanje merne nesigurnosti konkretnih mernih aparatura, dobijaju se prema jednačinama 3 i 4 sledeće vrednosti kombinovane merne nesigurnosti:

- za aparaturu koja radi po metodi kompenzovanog strujnog komparatora: $u_c(g_{aT}) = 0.0013 \%$ i $u_c(g_{IT}) = 0,05 \text{ min}$,
- za aparaturu koja radi po diferencijalnoj metodi: $u_c(g_{aT}) = 0.0026 \%$ i $u_c(g_{IT}) = 0,1 \text{ min}$.

Kombinovana merna nesigurnost pri određivanju razlika amplitudnih i faznih grešaka prilikom etaloniranja sračunata je na bazi pojedinačnih mernih nesigurnosti aparatura i iznosi za mernu metodu jednovremenog uporednog etaloniranja: $u_c(g_{aT}) = 0.0029 \%$ i $u_c(g_{IT}) = 0,11 \text{ min}$.

Ove vrednosti kombinovane merne nesigurnosti u proseku su manje od apsolutnih vrednosti izračunatih razlika izmerenih grešaka datih u tabeli 2, što ukazuje da postoje i drugi izvori grešaka koji nisu obuhvaćeni ovom analizom merne nesigurnosti. I zaista, greške usled elektromagnetnih smetnji i uticaja stranih magnetnih polja nisu obuhvaćene analizom. Takođe i greške usled kapacitivnih struja na međunamotajnom kapacitetu nisu obuhvaćene ovom analizom, a sve to zbog nemogućnosti kvantifikacije njihovog uticaja.

4. ZAKLJUČAK

Teorijska analiza merne nesigurnosti u odeljku 4 ovog rada, kao i sprovedena merenja čiji su rezultati prikazani u odeljku 3 pokazuju evidentnu prednost metode jednovremenog uporednog etaloniranja aparature za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Merna nesigurnost ove nove originalne merne metode etaloniranja poboljšana je eliminacijom dva izvora mogućih grešaka merenja: uticaja greške referentnog opterećenja i uticaja greške merenja sekundarne struje.

Prema rezultatima sprovedenih merenja ova poboljšanja merne nesigurnosti su u apsolutnom smislu u proseku 0,05 % za amplitudnu grešku i 2.2 minuta za faznu grešku. U relativnom smislu merna nesigurnost poboljšana je skoro deset puta. Tačno da nivo razlika grešaka u apsolutnom smislu zavisi od konkretnog ispitivanog strujnog transformatora i uticaja na isti greške referentnog opterećenja i greške u merenju ispitne struje, ali izneta konstatacija o relativnom odnosu mernih nesigurnosti razmatranih mernih metoda važi za svaki ispitivani transformator. Normalno je, a to i rezultati merenja potvrđuju da su odstupanja izmerenih vrednosti amplitudne i fazne greške znatno veća za ispitivanu referentnu struju od 5 %, nego za 100 % naznačene sekundarne struje, s obzirom da je uticaj elektromagnetnih smetnji i temperaturne varijacije ofseta izražen upravo pri malim vrednostima ispitnih struja.

Metodu jednovremenog uporednog etaloniranja aparatura za ispitivanje tačnosti mernih transformatora moguće je primeniti i za komparaciju etalon strujnih transformatora.

LITERATURA

- [1] W.J.M. Moore, N.L. Kusters, „Direct Reading Ratio-Error Sets for the Calibration of Current Transformers“, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol IM-19, no. 3, august 1970.
- [2] S. Škundrić, D. Kovačević, D. Naumović Vuković, S. Milosavljević: „Primena strujnog komparatora za ispitivanje tačnosti etalona i transformatora u mernim grupama“, Poglavlje u monografiji *Elektroenergetski sistemi – Eksploatacija, upravljanje, ispitivanje, merenje*, Institut Nikola Tesla, Beograd, 2006. pp 185.-207.

- [3] F. Smak, S. Škundrić, S. Vukovojac, D. Kovačević, M. Korolija, “Savremeni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora”, tip INST-2A, *Savetovanje “Transformatori u elektroenergetici”*, Beograd 1996.
- [4] S. Škundrić, R. Dereta, D. Naumović-Vuković, „Interkomparacija strujnih etalon transformatora“, *Elektroprivreda*, br. 3., str. 25-31, Beograd, 2005. (ISSN 0013-5755= Elektroprivreda COBISS.SR-ID 32023)
- [5] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, D. Kovačević: „Etaloniranje strujnog transformatora sa elektronskom kompenzacijom greške“, *Međunarodni simpozijum INFO-TEH*, Jahorina, 2007.
- [6] CEI/IEC 60044-1 Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers
- [7] ISO, Guide to the expression of uncertainty in measurement, Int. Org. for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.
- [8] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, december 1999.

Abstract: Calibration of microprocessor device for amplitude and phase displacement measurement, which is the main part of equipment for current transformer accuracy testing, is a serious metrological problem. Proposed method for simultaneous, comparative calibration of equipment for current transformer accuracy testing presented in this paper, could be used in resolving this problem. Analyzes of experimental results and measuring uncertainty evaluation is also presented.

Key words: *compensated current comparator method, differential method, measuring uncertainty estimation*

CALIBRATION OF MEASURING EQUIPMENT (APPARATUS) FOR CURRENT TRANSFORMERS ACCURACY TESTING

D. Naumović-Vuković, S. Škundrić