

Dva postupka procene merne nesigurnosti rezultata merenja fazne razlike metodom tri voltmetra

NADA M. VUČIJAK, Beograd

PREDRAG V. PEJOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 681.2-5:006.91

U radu je prikazan postupak merenja fazne razlike između dva sinusna električna napona koristeći metodu tri voltmetra. Merna nesigurnost rezultata merenja fazne razlike procenjena je na dva načina: u skladu sa Uputstvom za izražavanje nesigurnosti u merenju (GUM) i u skladu sa Dodatkom 1 GUM - Prenos raspodela korišćenjem metode Monte Karlo. Upoređeni su dobijeni rezultati za mernu nesigurnost.

Ključne reči: fazna razlika, metoda tri voltmetra, merna nesigurnost, GUM, Dodatak 1 GUM

1. UVOD

Fazna razlika između dva sinusna električna napona meri se u nacionalnim metrološkim institutima (NMI), koristeći više metoda: sistem sa uzorkovanjem signala, merne mostove, heterodinski merni sistem i metodu tri voltmetra [1 – 4]. Najmanja vrednost proširene merne nesigurnosti merenja fazne razlike između dva sinusna električna napona, sa verovatnoćom 95%, ostvarena u NMI, danas je reda 1 m° za učestanosti do 1 kHz [5].

Nesigurnost rezultata merenja procenjuje se u skladu sa Uputstvom za izražavanje nesigurnosti u merenju (Guide to the expression of uncertainty in measurement – GUM) [6 – 8]. To uputstvo utvrđuje opšta pravila za ocenjivanje i izražavanje nesigurnosti u merenju.

Merna nesigurnost je definisana [9] kao parametar koji nije negativan i koji opisuje rasipanje vrednosti veličine koje se na osnovu upotrebljenih podataka pridružuju merenoj veličini.

Nesigurnost rezultata merenja sastoji se od više komponenti koje se prema GUM mogu grupisati u dve kategorije: tip A – komponente koje se ocenjuju statističkim metodama i tip B – komponente koje se ocenjuju na druge načine.

Za ocenu nesigurnosti pridružene vrednosti merene veličine u skladu sa GUM, potrebno je [6]:

- izvesti model merenja, što znači odrediti vezu između ulaznih veličina X_1, \dots, X_N i merene veličine Y ;
- odrediti funkcije gustine verovatnoće za ulazne veličine;
- primeniti zakon prostiranja nesigurnosti na linearne ili linearizovane modele;
- dati izjavu o rezultatu merenja koja daje najbolju procenu vrednosti merene veličine, kombinovanu standardnu nesigurnost pridruženu proceni i proširenu nesigurnost.

Procenjena standardna devijacija pridružena proceni izlazne veličine, ili rezultatu merenja y , naziva se kombinovana standardna nesigurnost i označava se $u_c(y)$, a određuje se iz procenjene standardne devijacije pridružene svakoj proceni ulazne veličine x_i , koja se naziva standardna nesigurnost i označava sa $u(x_i)$.

Pri određivanju kombinovane standardne merne nesigurnosti potrebno je znati da li su veličine X_1, \dots, X_N od kojih zavisi veličina Y , čija se merna nesigurnost procenjuje, korelisane ili su statistički nezavisne. Ako su ulazne veličine statistički nezavisne, kombinovana standardna merna nesigurnost u_c se dobija pomoću izraza:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (1),$$

Adresa autora: mr. Nada Vučijak, Beograd, Zahumska 29

Rad primljen: 14.05.2014.

Rad prihvaćen: 21.05.2014.

gde je y najbolja procena izlazne veličine, x_1, x_2, \dots, x_N su procene ulaznih veličina a funkcija f data je izrazom $Y = f(X_1, \dots, X_N)$. Parcijalni izvodi se nazivaju koeficijenti osetljivosti i obeležavaju c_i . Jednačina (1) je zasnovana na Tejlorovom (Taylor) razvoju prvog reda aproksimacije za $Y = f(X_1, \dots, X_N)$.

Kada su ulazne veličine korelisane u jednačinu (1) se dodaje komponenta koja sadrži koeficijent korelacije [6].

U poglavlju 2 razmatrano je merenje fazne razlike između dva sinusna signala koristeći metodu tri voltmetra i određen je model merenja. Model merenja u ovom slučaju je složen. Dati su rezultati merenja za faznu razliku 60° između dva napona efektivne vrednosti 1V, učestanosti 20 kHz.

U poglavlju 3 opisan je postupak i dati su rezultati u skladu sa GUM, procene kombinovane i proširene merne nesigurnosti za verovatnoće 95% i 95,45%, za određenu faznu razliku 60° .

U poglavlju 4 dati su rezultati u skladu sa Dodatkom 1 GUM [10–12]. Vrednostima ulaznih veličina pripisuju se odgovarajuće gustine raspodele. Zatim se sprovedu Monte Karlo simulacije. Na ovaj način se dobija histogram izlazne veličine, koji se preskalira tako da aproksimira gustinu raspodele. Iz procenjene gustine raspodele se dalje računaju funkcija raspodele, srednja vrednost, standardna devijacija i interval obuhvata.

Tipični problemi određivanja nesigurnosti na koje se može primenjivati Dodatak 1 GUM [10–12], su:

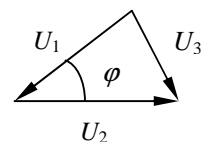
- postojanje doprinosa nesigurnosti koji nisu uporedivi po veličini,
- složen model merenja,
- teško je dobiti parcijalne izvode modela,
- funkcija gustine verovatnoće izlazne veličine nije Gaussova ili normalizovana t -raspodela,
- procena vrednosti izlazne veličine i pridružena standardna nesigurnost su uporedive po veličini,
- pojavljuju se asimetrične funkcije gustine verovatnoće za vrednosti ulaznih veličina.

Kod primene metode Monte Karlo (MCM) nije potrebno naći parcijalne izvode i ne zahteva se faktor obuhvata kada se određuje interval obuhvata.

2. MODEL I REZULTATI MERENJA

Metoda tri voltmetra se koristi za merenje električne snage, impedanse i fazne razlike [2, 13, 14].

Fazna razlika φ između dva napona U_1 i U_2 prikazana na slici 1 može da se odredi ako se istovremeno izmere tri napona U_1 , U_2 , i U_3 koristeći tri voltmetra.

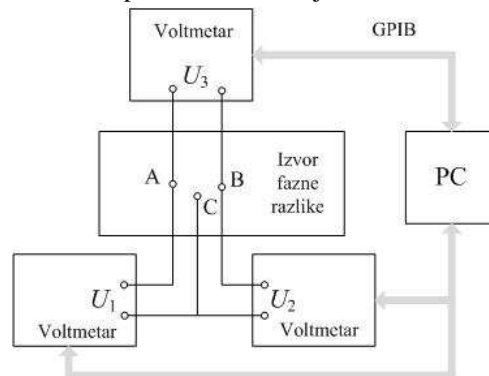


Slika 1 - Vektorski dijagram za merenje fazne razlike φ između dva napona U_1 i U_2 metodom tri voltmetra.

Formula za faznu razliku φ između napona U_1 i U_2 , dobijena koristeći vektorski dijagram prema slici 1 i kosinusnu teoremu, je:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{U_1^2 + U_2^2 - U_3^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2} \right). \quad (2)$$

Blok šema jednog sistema za merenje fazne razlike između napona U_1 i U_2 data je na slici 2.



Slika 2 - Blok šema za merenje fazne razlike između napona U_1 i U_2 metodom tri voltmetra

Na slici 2 prikazan je izvor koji generiše dva napona između kojih je zadata fazna razlika i tri voltmetra koja istovremeno mere tri napona U_1 , U_2 i U_3 . Rezultati merenja se iz voltmetara prenose u računarski sistem gde se obrađuju.

Sa tri voltmetra meri se istovremeno po dvadeset uzastopnih vrednosti tri napona. Iz izmerenih vrednosti izračunavaju se srednje vrednosti napona, a iz srednjih vrednosti napona izračuna se vrednost fazne razlike prema formuli (2).

Vrednosti izmerenog električnog napona U_1 mogu se opisati sa:

$$U_1 = U_{Isr} + \delta U_{Ical} + \delta U_{Ires} + \delta U_{Ide} \quad (3)$$

gde je

U_{Isr} - srednja vrednost 20 ponovljenih merenja električnog napona;

δU_{Ical} - korekcija usled merne nesigurnosti etaloniranja voltmetra. Smatra se da je ova korekcija jednaka nuli sa nesigurnošću $u(\delta U_{Ical})$ [6];

δU_{1res} - korekcija usled rezolucije voltmetra. Smatra se da je ova korekcija jednaka nuli sa nesigurnošću $u(\delta U_{1res})$ [6];

δU_{1de} - korekcija usled drugih efekata koje navodi proizvođač u specifikacijama voltmetra [15]. Smatra se da je ova korekcija jednaka nuli sa nesigurnošću $u(\delta U_{1de})$ [6].

Na isti način se mogu napisati formule za izmerene vrednosti električnih napona U_2 i U_3 :

$$U_2 = U_{2sr} + \delta U_{2cal} + \delta U_{2res} + \delta U_{2de} \quad (4)$$

$$U_3 = U_{3sr} + \delta U_{3cal} + \delta U_{3res} + \delta U_{3de} + \delta U_{3CM} \quad (5)$$

gde pojedini članovi u jednačinama (4) i (5) imaju analogno značenje kao članovi u jednačini (3) i gde je δU_{3CM} u jednačini (5) korekcija usled zajedničkog signala (engl. common mode) jer treći voltmetar nije uzemljen. Smatra se da je ova korekcija jednaka nuli sa nesigurnošću $u(\delta U_{3CM})$.

Vrednosti napona dobijene koristeći jednačine (3) do (5) predstavljaju ulazne veličine za jednačinu (2) tako da je model merenja fazne razlike složen.

U ovoj analizi pretpostavlja se da ulazne veličine nisu korelisane.

Najmanja merna nesigurnost ostvarena metodom tri voltmetra je za merenje fazne razlike od 60° , kada sva tri voltmetra treba da izmere približno iste efektivne vrednosti električnog napona.

U merenju je korišćen generator Clarke Hess, 5500-2, i tri multimetra Agilent, 3458A.

Srednje vrednosti rezultata merenja tri napona učestanosti 20 kHz sa tri voltmetra date su u tabeli 1: $U_{1sr}=1,0002496V$, $U_{2sr}=1,0006004V$ i $U_{3sr}=1,0004297V$.

Kada se u jednačinu (2) uvrste navedene srednje vrednosti napona i rezultat za dobijenu faznu razliku zaokruži na $1 m^\circ$ dobije se da je vrednost fazne razlike između napona U_1 i U_2 , izmerena metodom tri voltmetra, jednaka $60,000^\circ$.

3. PROCENA MERNE NESIGURNOSTI REZULTATA MERENJA U SKLADU SA GUM

Postupak određivanja fazne razlike opisan u poglavlju 2 je složen tako da se merna nesigurnost fazne razlike dobije u dva stepena: najpre se odredi merna nesigurnost rezultata merenja tri napona, a zatim se odredi merna nesigurnost fazne razlike izračunate iz vrednosti tri napona.

3.1 Merenje tri napona

Komponente merne nesigurnosti u skladu sa GUM, za vrednosti po 20 merenja napona U_1 , U_2 i U_3 su:

- merne nesigurnosti tipa A za srednje vrednosti električnih napona, označene u_{A1} , u_{A2} i u_{A3} , a date su u tabeli 1 uz U_{1sr} , U_{2sr} i U_{3sr} . Ove merne nesigurnosti dobijene su tako što standardnu devijaciju određenu iz 20 merenja podelimo sa koeficijentom iz broja merenja [6];
- merna nesigurnost $u(\delta U_{1cal})$ koju dobijemo deljenjem proširene merne nesigurnosti $30 \mu V$ koja je data u uverenju o etaloniranju, sa faktorom obuhvata/ proširenja $k = 2$ za Gausovu raspodelu i verovatnoću približno 95%. Dobije se da je standardna nesigurnost $15 \mu V$. Ovo je merna nesigurnost tipa B. Jednaku vrednost imaju i merne nesigurnosti $u(\delta U_{2cal})$ i $u(\delta U_{3cal})$ koje potiču od merne nesigurnosti etaloniranja voltmetara 2 i 3 [6];
- merna nesigurnost $u(\delta U_{1res})$ koja se dobije deljenjem rezolucije $100 nV$ merenja napona, koja ima uniformnu raspodelu verovatnoće, sa $2\sqrt{3}$. Dobije se vrednost $29 nV$. Ovo je merna nesigurnost tipa B. Jednaku vrednost imaju i merne nesigurnosti $u(\delta U_{2res})$ i $u(\delta U_{3res})$ koje potiču od rezolucije voltmetara 2 i 3 [6];
- merna nesigurnost $u(\delta U_{1de})$ koja se dobije deljenjem specifikacije proizvođača [15] koja ima uniformnu raspodelu verovatnoće, sa $2\sqrt{3}$. Proizvođač je u specifikacijama deklarirao tačnost voltmetra za opseg 1 V, učestanost 20 kHz, izrazom: $\pm(0,03\% U_{o\check{c}} + 0,002\% U_{op})$, gde je $U_{o\check{c}}$ – mereni napon, U_{op} – napon opsega. U ovom slučaju i mereni napon i napon opsega su približno jednaki, 1V. Kada se za $U_{o\check{c}}$ uzme srednja vrednost izmerenog napona dobije se da je $u(\delta U_{1de})=0,1848 mV$. Ovo je merna nesigurnost tipa B. Analogno tome, merne nesigurnosti koje potiču od specifikacije proizvođača voltmetara 2 i 3 su: $u(\delta U_{2de}) = 0,1849 mV$ i $u(\delta U_{3de}) = 0,1848 mV$ [6];
- merna nesigurnost $u(\delta U_{3CM})$ koja se dobije iz specifikacije proizvođača [15] za faktor potiskivanja zajedničkog signala – 90 dB za treći voltmetar koji u toku merenja nije uzemljen. Koristeći formulu:

$$-90 dB = 20 \log(\delta U_{3CM} / IV) \quad (6)$$

dobije se da je vrednost $\delta U_{3CM} = 31,6 \mu V$. Deljenjem vrednosti za δU_{3CM} sa $2\sqrt{3}$ za uniformnu raspodelu verovatnoće, dobije se $u(\delta U_{3CM}) = 9,1 \mu V$ [6]. Ova komponenta merne nesigurnosti je znatno veća kada se radi o merenju većih napona.

Vrednost kombinovane merne nesigurnosti napona U_1 , označena u u_{U_1} , određuje se prema jednadžinama (1) i (3) kao pozitivna vrednost kvadratnog korena sledeće jednačine:

$$u_{U_1}^2 = \left(\frac{\partial U_1}{\partial U_{1sr}} \right)^2 u_{A_1}^2 + \left(\frac{\partial U_1}{\partial \delta U_{1cal}} \right)^2 u^2 (\delta U_{1cal}) + \left(\frac{\partial U_1}{\partial \delta U_{1res}} \right)^2 u^2 (\delta U_{1res}) + \left(\frac{\partial U_1}{\partial \delta U_{1de}} \right)^2 u^2 (\delta U_{1de}) \quad (7)$$

Analogno se odrede vrednosti kombinovane merne nesigurnosti napona U_2 označena u_{U_2} i napona U_3 označena u_{U_3} .

Vrednosti kombinovanih mernih nesigurnosti napona određene prema (7) za jednačine (3) do (5) iznose: $u_{U_1} = 0,0001854$ V, $u_{U_2} = 0,0001855$ V i $u_{U_3} = 0,0001857$ V.

3.2 Izračunavanje fazne razlike

Kombinovana merna nesigurnost rezultata merenja fazne razlike $u_c(\varphi)$, u skladu sa GUM, određuje se koristeći formule (1) i (2):

$$u_c(\varphi) = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial U_1} \right)^2 u_{U_1}^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial U_2} \right)^2 u_{U_2}^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial U_3} \right)^2 u_{U_3}^2} \quad (8)$$

gde u_{U_1} , u_{U_2} i u_{U_3} označavaju procene mernih nesigurnosti rezultata merenja napona U_1 , U_2 i U_3 respektivno, određene u poglavlju 3.1.

Parcijalni izvodi u formuli (8) predstavljaju koeficijente osetljivosti, i imaju sledeće vrednosti:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial U_1} = \frac{-U_3^2 + U_2^2 - U_1^2}{U_1 \sqrt{4U_1^2 U_2^2 - (U_1^2 + U_2^2 - U_3^2)^2}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial U_2} = \frac{-U_3^2 - U_2^2 + U_1^2}{U_2 \sqrt{4U_1^2 U_2^2 - (U_1^2 + U_2^2 - U_3^2)^2}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial U_3} = \frac{2U_3}{\sqrt{4U_1^2 U_2^2 - (U_1^2 + U_2^2 - U_3^2)^2}} \quad (11)$$

Kada se vrednost korena u imeniocu razlomaka u jednačinama (9), (10) i (11), približava nuli, vrednost koeficijentata osetljivosti, a time i doprinos mernoj nesigurnosti, znatno poraste. To se događa kada je vrednost fazne razlike 0° ili 180° .

Iz (8) se dobije da je kombinovana merna nesigurnost merenja fazne razlike sinusnih napona vrednosti 1V, učestanosti 20 kHz, određena u skladu sa GUM, jednaka $0,015^\circ$.

Pretpostavlja se da fazna razlika ima Gausovu raspodelu tako da se proširena merna nesigurnost dobije:

- množenjem sa faktorom obuhvata $k = 1,96$ za verovatnoću 95%, i iznosi $0,029^\circ$, odnosno
- množenjem sa faktorom obuhvata $k = 2$ za verovatnoću 95,45%, i iznosi $0,030^\circ$.

4. PROCENA MERNE NESIGURNOSTI REZULTATA MERENJA U SKLADU SA DODATKOM 1 GUM

GUM dozvoljava i druge načine procene merne nesigurnosti osim onih opisanih u GUM. U Dodatku 1 GUM [10] opisana je metoda Monte Karlo kao sredstvo za numerički prikaz raspodele izlazne veličine, a ne kao metoda simulacije sama po sebi. U kontekstu prenosa raspodela pri određivanju nesigurnosti, rešava se deterministički problem, ne simulira se nikakav slučajni fizikalni proces.

U ovom primeru određivanja fazne razlike metodom tri voltmetra ulazne veličine imaju Gausovu ili uniformnu raspodelu verovatnoće.

Uzorkovanje iz Gausove raspodele verovatnoće $N(x, u^2(x))$ za veličinu X_i realizuje se prema [10]:

$$\xi = x + u(x)z, \quad (12)$$

gde je

ξ - slučajna promenljiva koja opisuje moguće vrednosti veličine X_i ,

x - najbolja procena veličine X_i ,

$u(x)$ - standardna nesigurnost pridružena najboljoj proceni, i

z - pseudoslučajni broj iz standardne Gausove raspodele $N(0,1)$.

Uzorkovanje iz uniformne raspodele verovatnoće $R(a,b)$ za veličinu X_i definisanu na intervalu $[a, b]$ realizuje se prema [10]:

$$\xi = a + (b-a)r \quad (13)$$

gde je

ξ - slučajna promenljiva koja opisuje moguće vrednosti veličine X_i ,

a - donja granica procene veličine X_i ,

b - gornja granica procene veličine X_i , i

r - pseudoslučajni broj iz standardne uniformne raspodele $R(0,1)$.

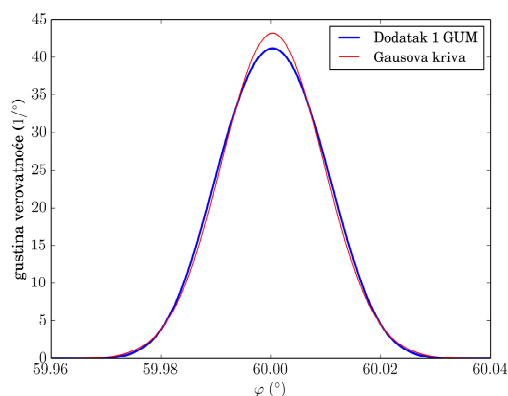
U tabeli 1 za Gausovu raspodelu verovatnoće ulaznih veličina (obeleženu „Gaus“) data je standardna nesigurnost, a za uniformnu raspodelu (obeleženu „uniform.“) data je poluširina intervala [10].

Za MCM simulacije korišćen je softver GNU Octave 3.8.1 za koji je napisan program za 10^{10} simulacija. Dobijeni rezultati za verovatnoću 95% prikazani su na slikama 3 i 4, dok su u tabeli 2 dati rezultati za verovatnoće 95% i 95,45%. Srednja vre-

dnost fazne razlike dobijena primenom GUM i Dodatka 1 GUM je $60,000^\circ$.

Tabela 1. Podaci za ulazne veličine X_i , modela merenja fazne razlike između dva napona vrednosti 1V, učestanosti 20 kHz koji se koriste kod primene Dodatka 1 GUM.

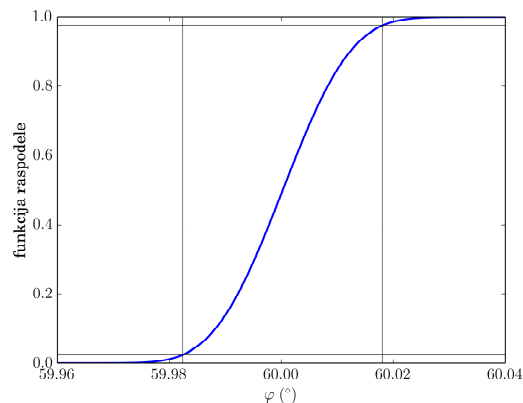
X_i	Vrednost [V]	Raspo-dela	Standardna nesigurnost
U_{1sr}	1,0002496	Gaus	3,65 μ V
δU_{1cal}	0	Gaus	15 μ V
U_{2sr}	1,0006004	Gaus	4,06 μ V
δU_{2cal}	0	Gaus	15 μ V
U_{3sr}	1,0004297	Gaus	3,31 μ V
δU_{3cal}	0	Gaus	15 μ V
			Poluširina intervala
δU_{1de}	0	uniform.	0,3201 mV
δU_{2de}	0	uniform.	0,3202 mV
δU_{3de}	0	uniform.	0,3201 mV
δU_{1res}	0	uniform.	50 nV
δU_{2res}	0	uniform.	50 nV
δU_{3res}	0	uniform.	50 nV
δU_{3CM}	0	uniform.	15,8 μ V



Slika 3 – Gustina verovatnoće za rezultat merenja fazne razlike 60° dobijena primenom MCM i Gausova kriva.

Na slici 3 prikazana je dobijena gustina verovatnoće za vrednost fazne razlike 60° i Gausova kriva sa istom standardnom devijacijom. Iz grafika se uočava da gustina verovatnoće ima približan oblik Gausove raspodele.

Na slici 4 prikazana je dobijena funkcija raspodele za vrednost fazne razlike iz koje je određen interval obuhvata za verovatnoću 95% (obeleženi vertikalnim linijama).



Slika 4 – Funkcija raspodele za rezultat merenja fazne razlike 60° dobijena primenom MCM.

U tabeli 2 prikazane su vrednosti intervala obuhvata za faznu razliku 60° za verovatnoće 95% i 95,45%, dobijene u skladu sa GUM i Dodatkom 1 GUM.

Tabela 2. Intervali obuhvata sa verovatnoćom 95% i 95,45% za faznu razliku 60° dobijeni u skladu sa GUM i Dodatkom 1 GUM.

Metoda	Interval obuhvata za faznu razliku, verovatnoća 95%
GUM, $k = 1,96$	[59,971°; 60,029°]
Dodatak 1 GUM	[59,972°; 60,029°]
Metoda	Interval obuhvata za faznu razliku, verovatnoća 95,45%
GUM, $k = 2$	[59,970°; 60,030°]
Dodatak 1 GUM	[59,971°; 60,029°]

Poređenjem intervala obuhvata iz table 2 zaključuje se da se donje granice dobijene u skladu sa GUM i Dodatkom 1 GUM, za verovatnoću 95% razlikuju za $0,001^\circ$, a za verovatnoću 95,45% i donje i gornje granice intervala obuhvata razlikuju se za $0,001^\circ$. Numerička tolerancija određena u skladu sa Dodatkom 1 GUM je $0,0005^\circ$. Iz navedenog proizlazi da primena Dodatka 1 GUM nije u ovom slučaju potvrdila rezultate za mernu nesigurnost određenu u skladu sa GUM.

ZAKLJUČAK

Fazna razlika između dva sinusna električna napona može da se odredi na više načina, a jedna od

metoda merenja sastoji se u istovremenom merenju tri napona i izračunavanju vrednosti fazne razlike iz srednjih vrednosti izmerenih napona.

Naponi su mereni voltmetrima koji imaju metrološku sledivost. Standardna nesigurnost i interval obuhvata za vrednost fazne razlike 60° sa verovatnoćom 95% i 95,45%, određeni su u skladu sa GUM i u skladu sa Dodatkom 1 GUM.

Problemi određivanja nesigurnosti na koje se može primenjivati Dodatak 1 GUM, a koji su prisutni u primeru merenja fazne razlike metodom tri voltmetra, su: model merenja je složen, doprinosi nesigurnosti nisu uporedivi po veličini, teško je dobiti parcijalne izvode modela i sumnja se da je funkcija gustine verovatnoće izlazne veličine Gaussova ili normalizovana t -raspodela.

U svim slučajevima gde postoji sumnja da su zadovoljeni svi kriterijumi za primenu GUM preporučuje se primena metode Monte Karlo u ocenjivanju merne nesigurnosti i intervala obuhvata/prekrivanja vrednosti izlazne veličine, kao što je objašnjeno u Dodatku 1 GUM [10–12]. Metoda Monte Karlo se na taj način koristi za validaciju rezultata dobijenih primenom GUM za određeni nivo poverenja.

Poređenjem rezultata za faznu razliku za interval obuhvata za verovatnoće 95% i 95,45% koji su dobijeni u skladu sa GUM i Dodatkom 1 GUM, nisu potvrđeni rezultati dobijeni u skladu sa GUM, tako da je opravdano interval obuhvata fazne razlike odrediti primenom Dodatka 1 GUM.

LITERATURA

- [1] Mohns E., Kahmann M., Heterodyne Measurement System (HMS) for Determining Phase Angles, IEE-EE Trans. Instrum. Meas., vol. 56, No. 2, pp 505–508, april 2007.
- [2] Klarke K. K., Hess D. T., Phase Measurement, Traceability, and Verification Theory and Practice, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 39, No. 1, 1990.
- [3] Ramm G., Moser H., Braun A., A new scheme for generating and measuring active, reactive and apparent power at power frequencies with uncertainties of $2.5 \cdot 10^{-6}$, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, str. 422–426, Apr. 1999.

SUMMARY

TWO PROCEDURES OF EVALUATION OF UNCERTAINTY FOR RESULTS OF PHASE DIFFERENCE MEASUREMENT USING THREE VOLTMETER METHOD

Phase difference measurement between two sinusoidal electric voltages using three voltmeter method is presented. Uncertainty of phase difference measurement is evaluated in two methods: according to Guide for expression of uncertainty in measurement (GUM) and according to Supplement 1 to GUM - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Those results for measurement uncertainty are compared.

Key words: *phase difference, three voltmeter method, uncertainty of measurement, GUM, Supplement 1 to GUM*

- [4] Svenson S., Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions, Doctoral thesis for the degree of PhD, Chalmers university of technology, Goteborg, Sweden, 1999.
- [5] Calibration and measurement capabilities – CMC http://kcdb.bipm.org/appendixc/EM/DE/EM_DE.
- [6] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML (1995): Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, Switzerland.
- [7] ISO IEC GUIDE 98-3: Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), 2008.
- [8] GUIDE OIML G 1-100: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, OIML, 2008.
- [9] JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms - VIM 3rd edition.
- [10] JCGM 101:2008: Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [11] GUIDE OIML G 1-101: Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method, OIML, 2007.
- [12] ISO IEC GUIDE 98-3/Suppl.1: Uncertainty of measurement Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method, 2008.
- [13] The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, Editor-in-Chief John Webster, CRC Press, IEEE Press, 1999., poglavlje 41.
- [14] Callegaro L., D'Elia V., Automated system for inductance realization traceable to ac resistance with a three-voltmeter method, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50, str. 1630–1633, Dec. 2001.
- [15] User's Guide, 3458A Multimeter, Agilent, 2000.