

АНАЛИЗА ПРОРАЧУНА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ ЕТАЛОНИРАЊА АС НАПОНА ДИГИТАЛНОГ МУЛТИМЕТРА AGILENT 3458A

Слободан Суботић, Никола Јовичић, Драган Лазић

Кључне речи: прорачун мерне несигурности, АС напон, дигитални мултиметар

КРАТАК САДРЖАЈ

Предмет ове анализе је одређивање мерне несигурности еталонирања АС напона дигиталног мултиметра Agilent 3458A директном методом поређења са референтним еталоном – калибратором Fluke 5730A.

ANALYSIS OF THE MEASUREMENT UNCERTAINTY CALCULATION OF THE AC VOLTAGE CALIBRATION OF THE AGILENT 3458A DIGITAL MULTIMETER

Keywords: analysis of measurement uncertainty, AC voltage, digital multimeter

ABSTRACT

The goal of this analysis is the determination of the measurement uncertainty of the AC voltage calibration of the Agilent 3458A digital multimeter by direct comparison method with the reference standard – the Fluke 5730A calibrator.

УВОД

Као интерни стандард система квалитета Техничког опитног центра (у даљем тексту ТОЦ), за еталонирање наизменичног електричног напона (у даљем тексту АС напона) донето је "Упутство за еталонирање АС напона волтметра" [1]. Упутство је намењено за употребу у ТОЦ-у, Сектору за метрологију, Метролошкој лабораторији за примарне еталоне електричних величина (МЛ 01), при извођењу еталонирања АС напона волтметра (у даљем тексту DUT) и у њему су дати поступци припреме за рад, спровођење еталонирања, методе еталонирања и мерна опрема коришћена за спровођење поменутих активности. Посебан нагласак је дат на анализи прорачуна и одређивања буџета мерне несигурности еталонирања АС напона DUT у складу са релевантним међународним стандардима у којима су препоруке и методе изражавања несигурности у мерењима [2][3].

Предмет овог рада је приказ резултата прорачуна мерне несигурности еталонирања АС напона DUT директним методом поређења са референтним еталоном калибратором Fluke 5730A [4] (у даљем тексту RE).

МЕРНА ОПРЕМА И ПОСТУПАК ЕТАЛОНИРАЊА У ТОЦ

Мерна опрема која се користи за еталонирање DUT дата је у табели 1. RE има метролошку следљивост до националног еталона Србије, а тиме и до међународног еталона у BIPM.

Табела 1. Мерна опрема која се користи за еталонирање електричне отпорности DUT

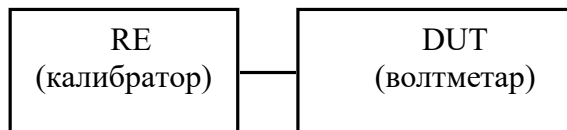
Назив мерне опреме		Карактеристике и мерни опсег	Дозвољена грешка
Еталони			
1.	Универзални калибратор Fluke 5730A	ACV: 2,2 mV – 1100 V	$\pm (4,4 \mu\text{V} - 77 \text{ mV})$
Помоћна опрема			
1.	Термохигрометар TESTO 175-H1	(-20 до 55) °C (0 до 100) %	$\pm 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 2 \text{ } \%$
2.	Кабл за повезивање Fluke 5730A-7003	Thermal EMF	$< 1,3 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

Практична реализација еталонирања са наведеном мерном опремом приказана је на слици 1.



Слика 1. Практични приказ еталонирања DUT директним методом поређења са RE

АС напон код DUT еталонирамо директном методом поређења са референтним еталоном калибратором Fluke 5730A према блок шеми приказаној на слици 2.



Слика 2. Блок шема еталонирања DUT директном методом поређења са RE

Референтни услови за еталонирање DUT, ако произвођач није другачије дефинисао су:

- температура: $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$,
- релативна влажност: (до 80) % и
- Фарадејев кавез за заштиту од електромагнетних сметњи.

DUT и мерна опрема која се користи при еталонирању треба да буду у референтним условима најмање 24 сата пре еталонирања ради стабилизације. У току еталонирања референтни услови одржавају се у наведеним границама и контролисани су термохигрометром, чија тачност мерења температуре износи $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$ (у опсегу $< 40 ^\circ\text{C}$), а за релативну влажност $\pm 3\% \text{ RV}$ у опсегу (2 до 98) % ± 1 дигит.

Поступак еталонирања DUT врши се у следећим корацима редом како су наведени.

- 1) Повезати мерно коло према блок шеми на слици 2.
- 2) Поставити на DUT функцију и опсег адекватану вредности АС напона мерне тачке.
- 3) Поставити одговарајућу вредност АС напона и фреквенцију на излазу RE.
- 4) Очитати и забележити АС напон на DUT.
- 5) Поновити поступак од 2 до 4 за све мерне тачке специфициране у захтеву за еталонирање од стране корисника.
- 6) Уколико је потребно извршити 10 мерења за сваку мерну тачку.

ПОЛАЗНИ ПОДАЦИ ЗА ПРОРАЧУН МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

Сви подаци потребни за прорачун мерне несигурности еталонирања DUT директном методом поређења са RE, тип Б, који потичу од неискључених систематских грешака, наведени су у табели 2, сагласно [2],[3].

Табела 2. Полазни подаци за прорачун мерне несигурности еталонирања АС напона (2 V, 1 kHz) дигиталног мултиметра Agilent 3458A према референтном еталону калибратору Fluke 5730A

U_{DUT}	измерена вредност АС напона на DUT
Еталон	калибратор универзални Fluke 5730A
Утицајне величине	
U_{RE}	постављена вредност АС напона на RE
ΔU	грешка DUT
δU_{RE}	несигурност постављеног АС напона на RE
δU_{RE-tk}	несигурност услед промене АС напона на RE са променом температуре
δU_{RE-st}	несигурност услед промене АС напона на RE са временом
δU_{RE-lin}	несигурност услед линеарности RE
δU_{RE-rez}	несигурност услед резолуције RE
δU_{RE-cal}	несигурност услед следивости RE
$\delta U_{DUT-rez}$	несигурност услед резолуције DUT
Математички модел	
$U_{DUT} = U_{RE} + \Delta U + \delta U_{RE} + \delta U_{RE-tk} + \delta U_{RE-st} + \delta U_{RE-lin} + \delta U_{RE-rez} + \delta U_{RE-cal} + \delta U_{DUT-rez}$	

БУЏЕТ МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

Пример прорачуна мерне несигурности дат је за мерну тачку АС напона (2 V, 1 kHz) дигиталног мултиметра, произвођача Agilent, тип 3458A [5], према референтном еталону калибратору, произвођача Fluke, тип 5730A [4], који је еталониран у Дирекцији за мере и драгоцене метале са резултатима приказаним у Уверењу број 951/2 од 04.03.2024. године.

Извори мерне несигурности:

1) Несигурност постављеног АС напона на RE (δU_{RE})

Постављена вредност АС напона (U_{RE}) је вредност напона од 2 V, 1 kHz генерисана на излазу "OUTPUT" калибратора Fluke 5730A на опсегу 2,2 V и за опсег фреквенција од 40 Hz до 20 kHz. Калибратор генерише АС напон на том опсегу са дозвољеном грешком за годину дана $\pm (42 \cdot 10^{-6} \text{ out} + 8 \text{ } \mu\text{V})$. За номиналну вредност напона $U_{nom} = 2 \text{ V}$, 1 kHz калибратор генерише ову вредност напона у границама грешке $\pm 92 \text{ } \mu\text{V}$. Расподела је униформна (правоугаона) па се стандардна несигурност израчуна тако што се $92 \text{ } \mu\text{V}$ подели са $\sqrt{3}$ и добије се $53,1 \text{ } \mu\text{V}$. Коефицијенти осетљивости и несигурности су:

$$c = \frac{\partial U_{DUT}}{\partial (\delta U_{RE})} = 1, \quad u = 53,1 \text{ } \mu\text{V} \quad (1)$$

2) Несигурност услед промене АС напона на RE са променом температуре (δU_{RE-ik})

Промена напона на излазу калибратора услед промене температуре (δU_{RE-ik}) на опсегу 2,2 V и за опсег фреквенција од 40 Hz до 20 kHz израчунава се на основу температурног коефицијента који износи $(2 \cdot 10^{-6} \text{ out} + 1 \text{ } \mu\text{V}) / ^\circ\text{C}$, за температуру амбијента $10 ^\circ\text{C}$ до $40 ^\circ\text{C}$. Промена температуре околине Δt је највише $2 ^\circ\text{C}$. Узимајући да се температура променила за максималну вредност $2 ^\circ\text{C}$ добиће се $10 \text{ } \mu\text{V}$ и када се подели са $\sqrt{6}$ због троугаоне расподеле добиће се да је стандардна несигурност $4,1 \text{ } \mu\text{V}$. Коефицијенти осетљивости и несигурност су:

$$c = \frac{\partial U_{DUT}}{\partial (\delta U_{RE-ik})} = 1, \quad u = 4,1 \text{ } \mu\text{V} \quad (2)$$

3) Несигурност услед промене АС напона на RE са временом (δU_{RE-st})

Промена напона на излазу калибратора са временом калибратора (δU_{RE-st}) већ је урачуната у апсолутну вредност спецификације датај у тачки 1) буџета мерне несигурности, тако да иста неће бити разматрана јер нема утицај на укупну мерну несигурност.

4) Несигурност услед линеарности RE (δU_{RE-lin})

Несигурност услед линеарности (δU_{RE-lin}) калибратора није дефинисана од стране произвођача мерне опреме Fluke и због тога се неће узимати у обзир. У случају коришћења другог калибратора дефинисана вредност би се поделила са $\sqrt{3}$ због униформне расподеле и добила би се стандардна несигурност.

5) Несигурност услед резолуције RE (δU_{RE-rez})

Несигурност услед резолуције калибратора (δU_{RE-rez}) на опсегу 2,2 V и за опсег фреквенција од 40 Hz до 20 kHz је $1 \text{ } \mu\text{V}$ и због тога се уноси грешка постављања од $0,5 \text{ } \mu\text{V}$ која износи половину вредности наведене резолуције. Расподела је униформна па се стандардна несигурност добије када се $0,5 \text{ } \mu\text{V}$ подели са $\sqrt{3}$ и добије се $0,29 \text{ } \mu\text{V}$. Коефицијенти осетљивости и несигурности су:

$$c = \frac{\partial U_{DUT}}{\partial (\delta U_{RE-rez})} = 1, \quad u = 0,29 \text{ } \mu\text{V} \quad (3)$$

6) Несигурност услед следивости RE (δU_{RE-cal})

Следивост референтног еталона за АС напон обезбеђена је еталонирањем RE у ДМДМ. Мерна несигурност се добија дељењем вредности несигурности еталонирања RE, која је дата у Уверењу о еталонирању, са 2. За еталонирану вредност АС напона (2 V, 1 kHz) у Уверењу о еталонирању исказана је мерна несигурност од 68 μV и када се иста услед нормалне расподеле подели са 2, добија се несигурност од 34 μV . Коефицијенти осетљивости и несигурности су:

$$c = \frac{\partial U_{DUT}}{\partial (\delta U_{RE-cal})} = 1, \quad u = 34 \mu V \quad (4)$$

7) Несигурност услед резолуције DUT ($\delta U_{DUT-rez}$)

Несигурност услед резолуције дигиталног мултиметра Agilent 3458A ($\delta U_{DUT-rez}$) на опсегу 10 V је 1 μV и због тога се уноси грешка читавања од 0,5 μV која износи половину вредности наведене резолуције. Расподела је униформна па се стандардна несигурност добије када се 0,5 μV подели са $\sqrt{3}$ и добије се 0,29 μV . Коефицијенти осетљивости и несигурности су:

$$c = \frac{\partial U_{DUT}}{\partial (\delta U_{DUT-rez})} = 1, \quad u = 0,29 \mu V \quad (5)$$

8) Несигурност због понављања мерења

Несигурност типа А, нормална расподела.

Када вршимо понављање мерења морамо урачунати несигурност типа А. Мерење се понавља 10 пута за сваку мерну тачку (резултати мерења приказани у табели 3). Израчунава се средња вредност грешке и придружена експериментална стандардна девијација. Експериментална стандардна девијација средње вредности израчунава се дељењем стандардне девијације са квадратним кореном броја мерења, а у овом случају 10 и добије се стандардна несигурност типа А.

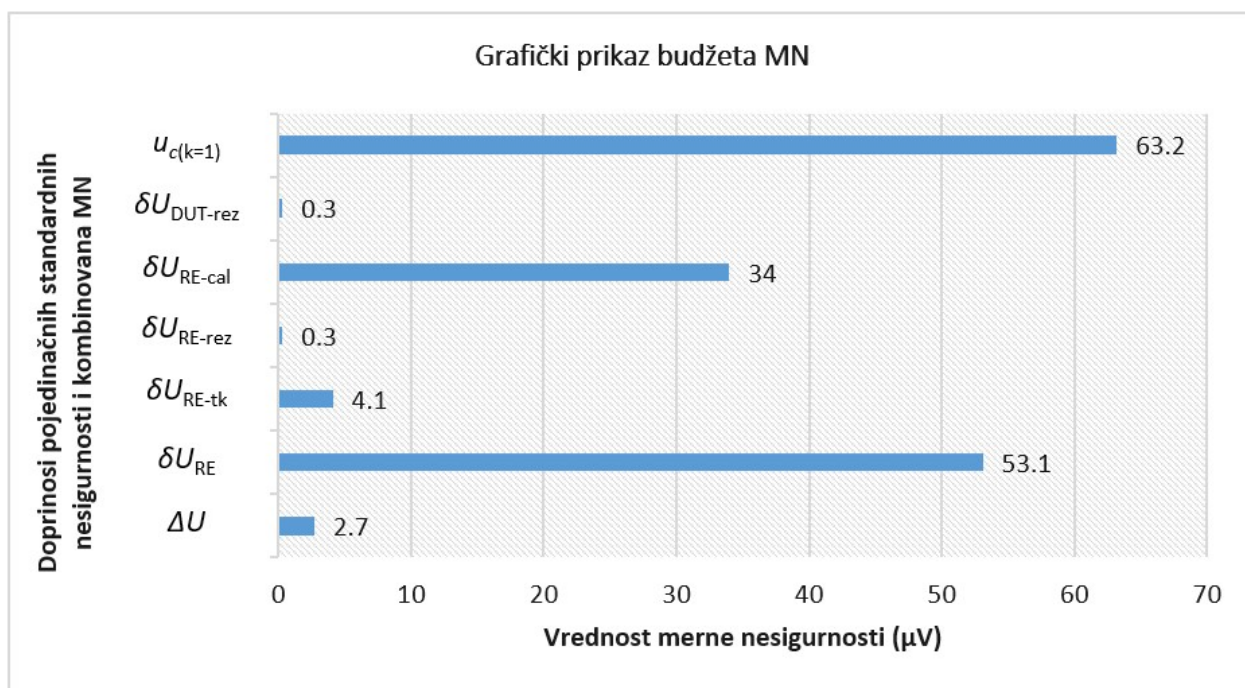
Табела 3. Резултати мерења дигиталног мултиметра Agilent 3458A за еталонирану вредност АС напона 2 V на фреквенцији 1 kHz

Р.бр.	U_{RE} (V)	U_{DUT} (V)	U_{DUT-SR} (V)	$\Delta U = U_{DUT} - U_{RE}$ (μV)	ΔU_{SR} (μV)	Посебан услов за DUT
1	2,000000	1,999837	1,999830	-163	-170	SETACV: SYNC RES: .002 LFILTER: ON
2	2,000000	1,999819		-181		
3	2,000000	1,999836		-164		
4	2,000000	1,999826		-174		
5	2,000000	1,999832		-168		
6	2,000000	1,999826		-174		
7	2,000000	1,999825		-175		
8	2,000000	1,999823		-177		
9	2,000000	1,999849		-151		
10	2,000000	1,999830		-170		

Буџет мерне несигурности дат је у табели 4, док је графички приказ буџета мерне несигурности приказан на слици 3.

Табела 4. Буџет мерне несигурности еталонирања АС напона 2 V на фреквенцији 1 kHz код дигиталног мултиметра Agilent 3458A

Утицајна величина X_i	Процена x_i	Стандардна несигурност $u(x_i)$	Коефицијент осетљивости c_i	Тип МН	Функција расподеле	Допринос стандардној несигурности $u_i(y) = c_i u(x_i)$
U_{RE}	2,000000 V	-	-	-	-	-
ΔU	-170 μ V	2,7 μ V	1	A	нормална	2,7 μ V
δU_{RE}	0 V	53,1 μ V	1	Б	униформна	53,1 μ V
δU_{RE-tk}	0 V	4,1 μ V	1	Б	троугаона	4,1 μ V
δU_{RE-rez}	0 V	0,3 μ V	1	Б	униформна	0,3 μ V
δU_{RE-cal}	0 V	34 μ V	1	Б	нормална	34 μ V
$\delta U_{DUT-rez}$	0 V	0,3 μ V	1	Б	униформна	0,3 μ V
U_{DUT}	1,999830 V	$k = 1$				63,2 μ V
		$k = 2$				126,4 μ V



Слика 3. Графички приказ буџета мерне несигурности

Комбинована мерна несигурност израчунава се када се у обзир узме тип А и тип Б мерне несигурности и она у овом примеру износи 63,2 μ V.

Проширена мерна несигурност добија се када се комбинована мерна несигурност помножи са коефицијентом проширења ($k=2$) и која за дати пример еталонирања АС напона (2 V, 1 kHz) код дигиталног мултиметра Agilent 3458A износи 126,4 μ V.

ЗАКЉУЧАК

Прорачун буџета мерне несигурности еталонирања АС напона код дигиталног мултиметра који је приказан у раду, урађен је за потребе Упутства за еталонирање АС напона волтметра Ц.41.035 [1] које се примењује у Сектору за метрологију у ТОЦ-у. За конкретан пример прорачуна узет је дигитални мултиметар Agilent 3458A. Применом истог математичког модела за прорачун мерне несигурности могу се израчунати мерне несигурности еталонирања било које друге вредности АС напона коју мери дигитални мултиметар узимајући у обзир дати буџет мерне несигурности.

У датом буџету мерне несигурности најдоминантнији утицај на укупну мерну несигурност има несигурност постављеног АС напона на RE која се добија на основу спецификације од стране произвођача и на који се не може много утицати у смислу смањења мерне несигурности, осим ако се искористи могућност коришћења спецификације до 90 дана од последње калибрације под условом да се температура амбијента одржава у границама $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ у односу на температуру амбијента при последњој калибрацији. У том случају наведени допринос износио би $45\text{ }\mu\text{V}$, па би проширена мерна несигурност била смањена за приближно $13\text{ }\mu\text{V}$. Следећи допринос по утицају на укупну мерну несигурност је услед следивости RE, а имајући у виду да је иста обезбеђена у националном метролошком институту Републике Србије (ДМДМ), долази се до закључка да би наведени утицај могао бити смањен искључиво еталонирањем RE у националним метролошким институтима или акредитованим лабораторијама за еталонирање у иностранству које у свом обиму овлашћења или акредитације имају исказане мерне могућности боље од мерних могућности ДМДМ. У том случају је потребно извршити анализу оправданости слања RE на еталонирање у иностранство, узимајући у обзир укупан финансијски трошак такве активности и реалну потребу било ког корисника у Републици Србији за постизањем што мање мерне несигурности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Суботић, „Упутство за еталонирање АС напона волтметра”, Ц.41.035, III издање, ТОЦ (2021.).
- [2] EA-4/02 М:2022, „Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, European Accreditation, 2022.
- [3] JCGM 100:2008, “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”, BIPM, 2008.
- [4] Multifunction Calibrator 5730A, Operators Manual, Fluke, Rev. 1, 6/15
- [5] Agilent Technologies 3458A Multimeter, User's Guide, Manual Part Number: 03458-90017

Адреса за кореспонденцију:

АУТОРИ

сц. Слободан М. Суботић, дипл. инж.

Начелник лабораторије
Технички опитни центар, Сектор за метрологију
Лабораторија за примарне еталоне електричних величина (МЛ 01)
Београд, Војводе Степе 445
телефон 011/3401-149, 064/2199568
faks: 011/3977- 422
e-mail: metrologija@toc.vs.rs

Никола С. Јовичић, струк. маст. инж.

водећи истраживач
Технички опитни центар, Сектор за метрологију
Лабораторија за примарне еталоне електричних величина (МЛ 01)
Београд, Војводе Степе 445
телефон: 011/3401-150, 061/1614012
faks: 011/3977- 422
e-mail: metrologija@toc.vs.rs

мр Драган М. Лазић, дипл. инж.

Начелник Сектора за метрологију
Технички опитни центар, Сектор за метрологију
Београд, Војводе Степе 445
телефон: 011/3401-011, 065/3416669
faks: 011/3977- 422
e-mail: metrologija@toc.vs.rs