

АНАЛИЗА ПРОРАЧУНА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ ЕТАЛОНИРАЊА ЕЛЕКТРИЧНЕ ОТПОРНОСТИ ОТПОРНИКА ДС СТРУЈЕ АУТОМАТИЗОВАНИМ МОСТОМ ЗА ОТПОРНОСТ MEASUREMENTS INTERNATIONAL 6010D

Слободан Суботић, Славко Вуканић и Никола Јовичић

Кључне речи: прорачун мерне несигурности, отпорник ДС струје, мост за отпорност

КРАТАК САДРЖАЈ

Један од начина еталонирања отпорника ДС струје је методом поређења са референтним еталон отпорником помоћу компараторског моста ДС струје. У раду је приказана метода поређења са референтним еталон отпорником Leeds & Northrup 4210B помоћу аутоматизованог моста за отпорност Measurements International 6010D која се примењује у лабораторији за еталонирање Техничког опитног центра. Дат је математички модел и поступак вредновања мерне несигурности, на примеру еталонирања отпорника Tinsley 5684A.

ANALYSIS OF MEASURING UNCERTAINTY OF ELECTRICAL RESISTANCE CALIBRATION OF THE RESISTORS BY AUTOMATED PRIMARY RESISTANCE BRIDGE MEASUREMENTS INTERNATIONAL 6010D

Keywords: analysis of measuring uncertainty, DC resistance current, resistance bridge

ABSTRACT

One of the calibration DC resistance current methods is a comparison method with reference resistance etalon by DC Comparator ratio bridge. The paper presents method by comparison with the reference resistance etalon Leeds & Northrup 4210B by automated primary resistance bridge Measurements International 6010D which is applied in the laboratory for the calibration of the Technical Test Center. A mathematical model and a procedure for evaluating measurement uncertainty is given, in the case of the resistance Tinsley 5684A calibration.

УВОД

Као интерни стандард система квалитета Техничког опитног центра (у даљем тексту ТОЦ), за еталонирање електричне отпорности отпорника DC струје донето је "Радно упутство за еталонирање електричне отпорности отпорника DC струје програмабилним системом за електричну отпорност MI 6010/100" [1]. Упутство је намењено за употребу у ТОЦ-у, Сектору за метрологију, Метролошкој лабораторији за примарне еталоне електричних величина (МЛ 01), при извођењу еталонирања електричне отпорности отпорника DC струје (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 прорачун одређивања буџета мерне несигурности еталонирања електричне отпорности DUT у складу са релевантним међународним стандардима у којима су препоруке и методе изражавања несигурности у мерењима [2 - 3].

Предмет овог рада је да се прикажу резултати прорачуна мерне несигурности еталонирања електричне отпорности DUT директним методом поређења са референтним еталон отпорником Leeds & Northrup 4210B [4-5] (у даљем тексту RE), помоћу аутоматизованог моста за отпорност Measurements International 6010D (у даљем тексту MI), односно програмабилног система за електричну отпорност MI 6010/100 који се састоји од: мерног моста за отпорност MI 6010D [6], скенера MI 4220A [7], струјног извора MI 6100A [8] и екстендера MI 6011D [9].

МЕРНА ОПРЕМА И ПОСТУПАК ЕТАЛОНИРАЊА У ТОЦ

Мерна опрема која се користи за еталонирање DUT дата је у табели 1. RE и програмабилни систем за електричну отпорност имају 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

Ред. бр.	Мерна опрема				Примедба
	Назив	Тип	Произвођач	Серијски број	
1.	Мост мерни за отпорност	6010D	MI, Canada	1104075	Програмабилни систем MI 6010/100
2.	Скенер	4220A	MI, Canada	1103959	
3.	Струјни извор	6100A	MI, Canada	1104055	
4.	Екстендер	6011D	MI, Canada	1104055	
5.	Референтни еталон отпорник (RE)	4210B	L&N, USA		

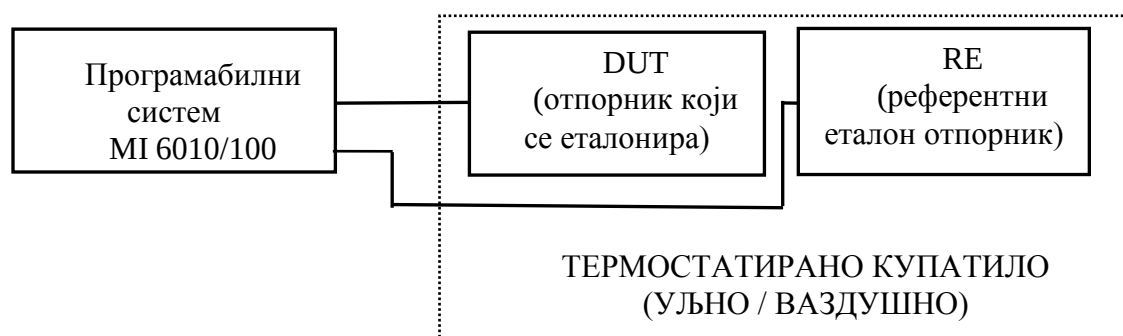
Отпорност код DUT еталонирамо методом поређења са RE помоћу програмабилног система за електричну отпорност MI 6010/100.

Код методе поређења са RE, помоћу MI 6010/100 повезујемо RE и DUT (отпорник који еталонирамо) према одговарајућој шеми веза у зависности од називне вредности отпорности DUT. На мосту меримо и читавамо измерену вредност отпорности DUT. Мере се односи отпорности између еталонираног отпорника и референтног еталона који има познату вредност.

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.



Слика 1. Блок шема еталонирања DUT методом поређења са RE помоћу програмабилног система MI 6010/100

Поступак еталонирања DUT помоћу програмабилног система за отпорност MI 6010/100 врши се у следећим корацима редом како су наведени.

- 1) Повезати мерно коло према блок шеми на слици 1.
- 2) Повезати четворокрајно RE и DUT са мостом MI 6010D преко аутоматизованог скенера MI 4220A који олакшава мерење групе отпорника без потребе за сталним превезивањем каблова. Наведеним скенером може се управљати ручно преко контролног панела или софтверски преко GPIB интерфејса.
- 3) Поступак мерења DUT називне вредности 1Ω изводи се према процедури за мерење отпорности на мосту према Упутству произвођача (тачка 4.1). Ако је DUT називне вредности $1 \Omega (R_x)$, за RE изабрати отпорник исте називне вредности $1 \Omega (R_s)$, тако да постављени однос отпорности R_x и R_s на мосту буде 1:1.
- 4) Током мерења, на дисплеју предњег панела моста могуће је изабрати приказ у виду табеле, графикана или информације о мерењима. У табели, прва колона показује број мерења, друга колона приказује однос вредности, а трећа колона приказује измерену вредност отпорности.
- 5) Када се мерење заврши, резултати мерења могу се сачувати на *flash* меморији преко USB прикључка који се налази на предњем панелу моста и касније одштампати.
- 6) У зависности од вредности отпорника који се еталонира (R_x), за референтни еталон изабрати отпорник вредности R_s тако да однос R_x и R_s на мосту буде 1:1 или 10:1 у зависности од вредности DUT.

ПОЛАЗНИ ПОДАЦИ ЗА ПРОРАЧУН МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

Сви подаци потребни за прорачун мерне несигурности еталонирања DUT методом поређења са RE помоћу MI 6010/100, тип Б, који потичу од неискључених систематских грешака, наведени су у табели 2, сагласно [2 - 3].

Табела 2. Полазни подаци за прорачун мерне несигурности електричне отпорности отпорника 1 Ω Tinsley 5684A према референтном еталон отпорнику LN 4210B

Величина	
R_{DUT}	вредност електричне отпорности еталонираног отпорника
Еталон	
референтни еталон отпорник LN 4210B и програмабилни систем за отпорност MI 6010/100	
Утицајне величине	
R_{RE}	вредност отпорности RE из Уверења о еталонирању
δR_{RE}	несигурност вредности електричне отпорности RE
δR_{RE-t}	несигурност услед промене вредности отпорности RE са температуром
δR_{RE-T}	несигурност услед промене вредности отпорности RE са временом
δR_{RE-D}	несигурност услед промене вредности отпорности RE због дисипације
A	несигурност измереног односа отпорности на мосту
δR_{DUT-t}	несигурност услед промене вредности отпорности DUT са температуром
Математички модел	
$R_{DUT} = (R_{RE} + \delta R_{RE} + \delta R_{RE-t} + \delta R_{RE-T} + \delta R_{RE-D}) \cdot A - \delta R_{DUT-t}$	

БУЏЕТ МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

Пример прорачуна мерне несигурности дат је за еталон отпорник називне вредности 1 Ω , произвођача Tinsley, тип 5684A, серијски број 225.320 према референтном еталон отпорнику називне вредности 1 Ω , произвођача LN, тип 4210B, серијски број 1771730 чија вредност је дата у Уверењу ДМДМ на референтној температури од 23,000 $^{\circ}\text{C}$. Елементи прорачуна мерне несигурности електричне отпорности наведеног отпорника, добијени према полазним подацима приказаним у табели 2 систематизовани су у табели 3.

Извори мерне несигурности:

1) Несигурност вредности отпорности референтног еталона (δR_{RE})

Вредност отпорности RE од 1 Ω тип L&N 4210B, серијски број 1771730, одређена је у ДМДМ, на референтној температури од 23,000 $^{\circ}\text{C}$, при последњој компарацији 2020. године и дата је у Уверењу о еталонирању ДМДМ, број 1404/2 од 01.09.2020. године. Вредност отпорности за средњи датум мерења 26.08.2020. године и за референтну температуру од 23,000 $^{\circ}\text{C}$ износи $R_{RE} = 0,99998876 \Omega$, а мерна несигурност износи $2,2 \cdot 10^{-7} \Omega$. Расподела је нормална. Коефицијент осетљивости и несигурности су:

$$c = \frac{\partial R_{DUT}}{\partial (\delta R_{RE})} = 1,00001162, \quad u = 1,1 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (1)$$

2) Несигурност услед промене вредности отпорности RE са температуром (δR_{RE-t})

Температурна корекција RE услед промене референтне температуре (δR_{RE-t}) израчунава се за еталон отпорник од 1 Ω тип L&N 4210B, серијски број 1771730, на основу вредности линеарног и квадратног температурног коефицијента датих у Уверењу о еталонирању NBS (сада NIST) број 211.01/206046 од 27.03.1972. године на референтној температури од 25 $^{\circ}\text{C}$, а који када се сведу на температуру од 23,000 $^{\circ}\text{C}$ износе: $\alpha = 6,39 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ и $\beta = -0,510 \cdot 10^{-6}/\text{K}^2$. При израчунавању δR_{RE-t} узима се у обзир мерна несигурност коришћеног еталонираног термометра резолуције 0,01 $^{\circ}\text{C}$ која износи $\pm 0,01$ $^{\circ}\text{C}$ и утврђена дуготрајна стабилност температуре уља у уљном купатилу која износи $\pm 0,0025$ $^{\circ}\text{C}$ око постављене температуре од 23 $^{\circ}\text{C}$ на којој се врше мерења, тако да укупна максимална промена температуре износи $\pm 0,0125$ $^{\circ}\text{C}$. Узимајући да се температура променила за максималну вредност од 0,0125 $^{\circ}\text{C}$ добија се да δR_{RE-t} износи $7,98 \cdot 10^{-8} \Omega$. Расподела је троугаона па се стандардна несигурност израчуна тако што се $7,98 \cdot 10^{-8} \Omega$ подели са $\sqrt{6}$ и добије се $3,26 \cdot 10^{-8} \Omega$. Коефицијент осетљивости и несигурност су:

$$c = \frac{\partial R_{\text{DUT}}}{\partial (\delta R_{RE-t})} = 1,00001162, \quad u = 3,26 \cdot 10^{-8} \Omega \quad (2)$$

3) Несигурност услед промене вредности отпорности RE са временом (δR_{RE-T})

Промена вредности отпорности RE са временом у односу на последње еталонирање у ДМДМ (δR_{RE-T}) израчунава се на основу вредности отпорности еталон отпорника која је одређена у ДМДМ, на референтној температури од 23 $^{\circ}\text{C}$, при компарацији из 2017. године и вредности отпорности при последњој компарацији из 2020. године на референтној температури од 23 $^{\circ}\text{C}$. У Уверењу о еталонирању ДМДМ, број 1835/2 од 28.06.2017. године вредност отпорности отпорника за средњи датум мерења 22.06.2017. године износи $R_{RE} = 0,99998899 \Omega$, а мерна несигурност износи $2,2 \cdot 10^{-7} \Omega$. Вредност отпорности која је одређена при последњој компарацији у ДМДМ из 2020. године и дата у Уверењу о еталонирању, број 1404/2 од 01.09.2020. године, за средњи датум мерења 26.08.2020. године износи $R_{RE} = 0,99998876 \Omega$, а мерна несигурност износи $2,2 \cdot 10^{-7} \Omega$. Укупна промена вредности отпорности RE за период од 3,2 године (између средњих датума мерења у ДМДМ) износи $23 \cdot 10^{-8} \Omega$, из чега произилази да је нестабилност референтног еталон отпорника R_{RE} за годину дана $7,2 \cdot 10^{-8} \Omega$.

Како је расподела униформна, стандардна девијација промене вредности отпорности RE са временом израчунава се тако што се $7,2 \cdot 10^{-8} \Omega$ подели са $\sqrt{3}$ и добије се $4,16 \cdot 10^{-8} \Omega$.

Коефицијент осетљивости и несигурност су:

$$c = \frac{\partial R_{\text{DUT}}}{\partial (\delta R_{RE-T})} = 1,00001162, \quad u = 4,16 \cdot 10^{-8} \Omega$$

4) Несигурност услед промене вредности отпорности RE због дисипације (δR_{RE-D})

Промена отпорности RE услед дисипације δR_{RE-D} израчунава се на основу коефицијента дисипације који за овај тип манганског отпорника износи 2,5 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Једносмерна струја кроз референтни еталон износи 100 mA, што одговара снази дисипације од 10 mW, тако да је максимална промена температуре на референтном еталону реда величине 0,025 $^{\circ}\text{C}$. Пошто се еталонирање обавља у уљном купатилу у коме се температура непрекидно одржава у опсегу температуре околине ($23 \pm 0,010$) $^{\circ}\text{C}$ уз сталну циркулацију уља, промена отпорности референтног еталона услед дисипације не узима се у обзир.

5) Несигурност измереног односа отпорности на мосту (*A*)

Однос отпорности измерен на мосту (*A*) је однос отпорности мереног еталон отпорника R_{DUT} и референтног еталон отпорника R_{RE} који се директно читава на мосту MI 6010D. Измерен однос отпорности отпорника износи $A = 1,00001162$ на температури мерења уља у уљном купатилу $T_{ulja} = 23,00$ °C. Мост мери овај однос отпорности у границама грешке $\pm 0,046 \cdot 10^{-6}$. Расподела је униформна па се стандардна несигурност израчуна када се $0,046 \cdot 10^{-6}$ подели са $\sqrt{3}$ и добије се $0,027 \cdot 10^{-6}$. Коефицијент осетљивости и несигурности су:

$$c = \frac{\partial R_{DUT}}{\partial (\delta A)} = 0,99998876 \Omega, \quad u = 0,027 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

6) Несигурност услед промене вредности отпорности DUT са температуром (δR_{DUT-t})

Температурна корекција отпорника Tinsley 5684A услед промене референтне температуре (δR_{RE-t}) израчунава се на основу температурног коефицијента декларисаног од стране произвођача и који износи $4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. При израчунавању δR_{DUT-t} узима се у обзир мерна несигурност коришћеног еталонираног термометра резолуције $0,01$ °C која износи $\pm 0,01$ °C и утврђена дуготрајна стабилност температуре уља у уљном купатилу која износи $\pm 0,0025$ °C око постављене температуре од 23 °C на којој се врше мерења, тако да укупна максимална промена температуре износи $\pm 0,0125$ °C. Узимајући да се температура променила за максималну вредност од $0,0125$ °C добија се да δR_{DUT-t} износи $0,05 \cdot 10^{-6} \Omega$. Расподела је троугаона па се стандардна несигурност добије када се $0,05 \cdot 10^{-6} \Omega$ подели са $\sqrt{6}$ и добије се $0,02 \cdot 10^{-6} \Omega$. Коефицијент осетљивости и несигурност су:

$$c = \frac{\partial R_{DUT}}{\partial (\delta R_{DUT-t})} = -1, \quad u = 0,02 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (4)$$

7) 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. 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. Прорачун мерне несигурности еталонирања отпорника DC струје од 1Ω Tinsley 5684A програмабилним системом за електричну отпорност MI 6010/100

Утицајна величина X_i	Процена x_i	Стандардна несигурност $u(x_i)$	Коефицијент c_i	Функција расподеле	Допринос стандардној несигурности $u_i(y) = c_i u(x_i)$
δR_{RE}	$0,99998876 \Omega$	$1,1 \cdot 10^{-7} \Omega$	1,00001162	нормална	110,001 nΩ
δR_{RE-t}	0	$3,26 \cdot 10^{-8} \Omega$	1,00001162	троугаона	32,6 nΩ
δR_{RE-T}	0	$4,16 \cdot 10^{-8} \Omega$	1,00001162	униформна	41,6 nΩ
A	1,00001162	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$0,99998876 \Omega$	униформна	27 nΩ
δR_{DUT-t}	0	$2 \cdot 10^{-8} \Omega$	-1	троугаона	-20 nΩ
R_{DUT}	1,00000038 Ω	$k = 1$			126,58 nΩ
		$k = 2$			253,16 nΩ

Комбинована мерна несигурност износи 126,58 nΩ.
Проширена ($k = 2$) мерна несигурност износи 253,16 nΩ.

Укупна мерна несигурност типа Б за $k = 2$ за дати пример отпорника од 1 Ω Tinsley 5684А износи: 253,16 nΩ.

ЗАКЉУЧАК

Прорачун мерне несигурности еталонирања отпорника DC струје који је приказан у раду, урађен је за потребе Радног упутства за еталонирање електричне отпорности отпорника DC струје програмабилним системом за електричну отпорност МП 6010/100 Ц.41.051 [1] које се примењује у Сектору за метрологију у ТОЦ-у. За конкретан пример прорачуна узет је отпорник Tinsley 5684А. Применом истог математичког модела за прорачун мерне несигурности могу се израчунати мерне несигурности еталонирања сваке друге вредности отпорника DC струје узимајући у обзир дате буџете мерне несигурности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **С. Суботић**, „Радно упутство за еталонирање електричне отпорности отпорника DC струје програмабилним системом за електричну отпорност МП 6010/100", Ц.41.051, ТОЦ (2019.).
- [2] ЕА-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] Leeds & Northrup Co.: Directions D.B. 2641, Issue 3 : "Thomas Type Resistance Standards 4210 - B, 4210 - C1 and 4210 - C2" (1969)
- [5] Leeds & Northrup Co.: Data Sheet A5.1111.DS: "DC Resistance Standards",
- [6] Operator Manual for Automated Primary Resistance Bridge, Model 6010D, Measurements International, 2018
- [7] Operating Manual for Four Terminal Matrix Scanner, Model 4210A/4220A, Measurements International, 2016
- [8] Operations Manual for Linear DC Power Supply, Model 6100A, Measurements International, 2016
- [9] Operations Manual for 100/150 Ampere Range Extender, Model 6011D, Measurements International, 2016

Адреса за кореспонденцију:

АУТОРИ

сц. Слободан М. Суботић, дипл. инж.

Начелник лабораторије
Технички опитни центар, Сектор за метрологију
Лабораторија за еталоне основних електричних величина (ML – 01)
Београд, Војводе Степе 445
телефон 011/3401-149, 064/21-99-568
faks: 011/3977- 422
e-mail: metrologija@toc.vs.rs

Славко М. Вуканић, дипл. инж.

водећи истраживач
Технички опитни центар, Сектор за метрологију
Лабораторија за еталоне основних електричних величина (ML – 01)
Београд, Војводе Степе 445
телефон: 011/3401-150, 064/3654-810
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 еталоне основних електричних величина (ML – 01)
Београд, Војводе Степе 445
телефон: 011/3401-150, 061/16-14-012
faks: 011/3977- 422
e-mail: metrologija@toc.vs.rs