

Vrednovanje merne nesigurnosti kod etaloniranja merila električne otpornosti izolacije i kod njihovog korišćenja za ispitivanje

NADA M. VUČIJAK, Beograd

Stručni rad

UDC: 621.317.33:53.089.6

DOI: 10.5937/tehnika1901159V

U ovom radu razmatra se detaljno vrednovanje merne nesigurnosti rezultata etaloniranja merila električne otpornosti izolacije i vrednovanje merne nesigurnosti rezultata ispitivanja električne otpornosti izolacije etaloniranim merilom. Merna nesigurnost rezultata merenja procenjuje se u skladu sa uputstvima čije su oznake: GUM i EA - 4/02 M:2013. Sledivost etalona koji se koriste za etaloniranje a isto tako i sledivost merila koja se koriste za ispitivanje, mora da bude obezbeđena. Merila se etaloniraju u referentnim uslovima u akreditovanim laboratorijama za etaloniranje. Kada se etalonirana merila koriste za ispitivanja na terenu, radni uslovi ne moraju biti isti kao referentni uslovi, i u tom slučaju proširena merna nesigurnost može imati znatno veću vrednost.

Ključne reči: električna otpornost izolacije, etaloniranje, ispitivanje, merna nesigurnost

1. UVOD

Rezultat merenja je samo procena vrednosti merene veličine i on je kompletan tek kada mu je pridružen iskaz o nesigurnosti te procene [1]. Merna nesigurnost se vrednuje u skladu sa uputstvom GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement). Vrednost merne nesigurnosti treba dati sa dve značajne cifre [1]. Postupak za vrednovanje merne nesigurnosti rezultata merenja u skladu sa GUM sastoji se od sledećih koraka:

a) izvođenje modela merenja, a to je matematički izraz koji predstavlja relaciju f između merene veličine Y i ulaznih veličina X_i od kojih ona zavisi:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (1)$$

b) određivanje svih komponenti koje doprinose ukupnoj standardnoj mernoj nesigurnosti

c) određivanje kombinovane standardne merne nesigurnosti u_c mernog rezultata y prema zakonu prostiranja nesigurnosti. Ukoliko ulazne veličine nisu korelisane koristi se sledeća formula [1]:

$$u_c(y) = \left[\sum_{i=1}^N (c_i \cdot u(x_i))^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

gde su

$u(x_i)$ - komponente standardne merne nesigurnosti,

c_i - koeficijenti osetljivosti (parcijalni izvodi f po procenjenim vrednostima ulaznih veličina x_i) dati formulom:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3)$$

d) izračunavanje proširene merne nesigurnosti, oznaka U (od engleske reči uncertainty):

$$U = k \cdot u_c(y), \quad (4)$$

gde je k koeficijent obuhvata/pokrivanja.

Drugačiji postupak za vrednovanje merne nesigurnosti opisan je u Dodatku 1 GUM i sastoji se u primeni metode Monte Karlo na prostiranje raspodela [2].

Primena dva navedena postupka vrednovanja merne nesigurnosti (prema GUM i prema Dodatku 1 GUM) i njihovo poređenje, objašnjeno je na konkretnom primeru u radu navedenom pod [3].

2. ETALONIRANJE MERILA ELEKTRIČNE OTPORNOSTI IZOLACIJE

Na tržištu postoji veoma mnogo različitih merila različitih proizvođača, koja se koriste za ispitivanje električne otpornosti izolacije električnih instalacija, kablova i opreme. Merila imaju analogni ili digitalni

Adresa autora: Nada Vučijak, Beograd, Zahumska 29
e-mail: nvucijak@gmail.com
Rad primljen: 22.10.2018.
Rad prihvaćen: 21.12.2018.

prikazivač (displej) merene veličine. Najčešće se napajaju iz baterija, ali se koriste i merila koja se napajaju iz ručno pokretanog generatora. U uputstvu, proizvođač merila, između ostalog daje upozorenje da merenja smeju da se obavljaju samo na delovima instalacije ili opreme koja nije pod naponom, objašnjenje za ispravan rad merila, dozvoljenu osnovnu (sopstvenu, svojstvenu) grešku ako se merenje obavlja u referentnim uslovima i dozvoljenu radnu (upotrebnu) grešku ako se merenje ne obavlja u referentnim uslovima.

Ova merila etaloniraju laboratorije akreditovane za etaloniranje prema standardu SRPS ISO/IEC 17025 [4] i izdaju korisniku merila uverenje (sertifikat) o etaloniranju. Na zahtev korisnika, u uverenju (sertifikatu) daju i izjavu o saglasnosti sa specifikacijom za grešku koju je dao proizvođač merila, a pri tom uzimaju u obzir i mernu nesigurnost etaloniranja. U uverenju (sertifikatu) o etaloniranju daju se i podaci o akreditovanoj laboratoriji koja je etalonirala merilo, serijski broj merila, metoda etaloniranja, datum prijema na etaloniranje i datum izdavanja uverenja (sertifikata) o etaloniranju, podaci o korišćenim etalonima, sledivosti etalona i rezultata merenja [5], rezultati merenja i merna nesigurnost. Akreditovane laboratorije za etaloniranje vrednuju mernu nesigurnost u skladu sa uputstvom EA-4/02M:2013 [6] koje je zasnovano na GUM [1]. Etaloniranje merila električne otpornosti izolacije obavlja se u referentnim uslovima. Referentni uslovi za određivanje osnovne (sopstvene, svojstvene) greške ovih merila pri etaloniranju, su:

- nazivna vrednost napona napajanja;
- nazivna vrednost brzine obrtanja kada se napajanje obavlja pomoću ručno pokretanog generatora;
- referentna temperatura i vlažnost vazduha prema specifikaciji proizvođača;
- referentni položaj merila prema specifikaciji proizvođača.

Merne tačke kod etaloniranja merila bira korisnik usluge etaloniranja ili se, u zavisnosti od mernih mogućnosti laboratorije, bira po jedna merna tačka na 90% svakog mernog opsega, a na jednom mernom opsegu bar 3 merne tačke na 10%, 50% i 90% opsega. U državama, u kojima su merila električne otpornosti izolacije obuhvaćena propisima zakonske metrologije, ta merila se overavaju a merne tačke određene su državnim propisom. U Republici Srbiji, merila električne otpornosti izolacije električnih instalacija bila su obuhvaćena propisima u zakonskoj metrologiji do 2013. godine [7].

2.1. Primer budžeta merne nesigurnosti kod etaloniranja merila električne otpornosti izolacije

Greška merenja električne otpornosti merilom izolacije utvrđuje se direktnim poređenjem sa etalom otpornosti, koji može da izdrži visoke napone.

Primer: Na merilo električne otpornosti izolacije koje treba etalonirati (u daljem tekstu DUT = device under test) priključen je etalon otpornik vrednosti npr. $1 \text{ M}\Omega$, koji je etaloniran u akreditovanoj laboratoriji za etaloniranje. Iz DUT je zadat jednosmerni napon npr. 500 V u cilju merenja otpornosti izolacije. Izvršilac etaloniranja je registrovao pet uzastopnih vrednosti otpornosti izmerenih na DUT.

Moguće je izvesti sledeći matematički model etaloniranja DUT:

$$G_x = (R_x - R_{et}) + \delta R_{x-res} - \delta R_{et-spec} - \delta R_{et-cal} \quad (5),$$

gde je:

G_x - greška DUT pri merenju električne otpornosti izolacije,

R_x - srednja vrednost vrednosti električnih otpornosti izolacije određena iz uzastopnih ponovljenih merenja koristeći DUT,

R_{et} - vrednost električne otpornosti etalon otpornika koji simulira električnu otpornost izolacije,

δR_{x-res} - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled rezolucije DUT. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

$\delta R_{et-spec}$ - korekcija vrednosti otpornosti etalon otpornika usled specifikacije koju je deklarirao proizvođač za grešku. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

δR_{et-cal} - korekcija vrednosti otpornosti etalon otpornika usled merne nesigurnosti etaloniranja u akreditovanoj laboratoriji. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti.

Smatramo da ulazne veličine nisu korelisane.

Komponente standardne merne nesigurnosti rezultata etaloniranja merila električne otpornosti izolacije prema modelu merenja (5) su:

a) tip A, merne nesigurnosti, oznaka u_{cA} . Ova komponenta merne nesigurnosti određuje se tako da se od ponovljenih merenja električne otpornosti zabeleži najmanja i najveća vrednost (uniformna raspodela verovatnoće, koeficijent deljenja $2\sqrt{3}$), i izračuna npr.: $u_{cA} = (1,003 - 1,001) \text{ M}\Omega / 2\sqrt{3} = 0,577 \text{ k}\Omega$.

Ukoliko se uzme u obzir N rezultata merenja i normalna raspodela verovatnoće, onda se koristi najčešće excel fajl da se izračuna standardna devijacija ($STDEV$) i merna nesigurnost tip A koristeći formulu ($STDEV/\sqrt{N}$).

b) standardna merna nesigurnost usled rezolucije DUT npr. $0,001 \text{ M}\Omega$ (uniformna raspodela verovatnoće, koeficijent deljenja $2\sqrt{3}$), izračuna se:

$$u(\delta R_{x-res}) = 0,001 \text{ M}\Omega / 2\sqrt{3} = 0,289 \text{ k}\Omega.$$

c) standardna merna nesigurnost usled specifikacije za grešku etalon otpornika npr. $\pm 0,5\%$ (uniformna raspodela verovatnoće, koeficijent deljenja $2\sqrt{3}$):

$$u(\delta R_{\text{et-spec}}) = 2 \cdot (1 \text{ M}\Omega \cdot 0,5 / 100) / 2\sqrt{3} = 2,887 \text{ k}\Omega.$$

d) merna nesigurnost usled merne nesigurnosti etaloniranja etalon otpornika u akreditovanoj laboratoriji određuje se tako da se vrednost proširene merne nesigurnosti iz uverenja (sertifikata) o etaloniranju etalon otpornika koja iznosi npr. $0,090 \text{ k}\Omega$, podeli sa

navedenim faktorom obuhvata/ pokrivanja $k = 2$: $u(\delta R_{\text{et-cal}}) = 0,090 \text{ k}\Omega / 2 = 0,045 \text{ k}\Omega$.

Kombinovana merna nesigurnost rezultata merenja izračuna se prema formuli (2), a detalji su dati u tabeli 1. Efektivni broj stepeni slobode se izračuna se prema Welch-Satterwite formuli [1], [6] i iznosi $v_{\text{eff}} = 172$.

Budžet merne nesigurnosti daje se u obliku tabele koja se dobije na osnovu modela merenja.

Tabela 1. Primer za budžet merne nesigurnosti rezultata etaloniranja merila električne otpornosti izolacije (izlazni napon 500 V) metodom direktnog poređenja sa etalon otpornikom otpornosti 1 M Ω .

Veličina	Vred-nost x_i [M Ω]	Merna nesigurnost $u(x_i)$ [k Ω]	Tip mer. nes.	Raspodela	Broj stepeni slobode	Koef. osetlj. c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ [k Ω]
R_{et}	1	-	-	-	-	-	-
R_x	1,002	0,577	A	normalna	4	1	0,577
$\delta R_{x\text{-res}}$	0,0	0,289	B	uniformna	∞	1	0,289
$\delta R_{\text{et-spec}}$	0,0	2,887	B	uniformna	∞	-1	-2,887
$\delta R_{\text{et-cal}}$	0,0	0,045	B	normalna	∞	-1	-0,045
G_x	2 k Ω				$v_{\text{eff}} = 172$	$u_c = 3,0 \text{ k}\Omega$	

Proširena merna nesigurnost, oznaka U , za faktor obuhvata/pokrivanja $k = 2$ za rezultat etaloniranja iz tabele 1, prema formuli (4) iznosi: $U = 2 \cdot 3,0 \text{ k}\Omega = 6,0 \text{ k}\Omega$.

Rezultat etaloniranja glasi: Greška merila električne otpornosti izolacije pri merenju otpornosti vrednosti 1 M Ω , ispitnim DC naponom 500 V, sa nivoom poverenja (verovatnoća pokrivanja) od približno 95% i normalnu raspodelu verovatnoće je: $G_x = 2 \text{ k}\Omega \pm 6,0 \text{ k}\Omega$.

Osim greške merenja električne otpornosti izolacije, kod ovih merila pri etaloniranju se određuje i greška izlaznog napona iz merila, metodom direktnog poređenja sa etalomom za merenje električnog napona.

3. MERNA NESIGURNOST REZULTATA ISPITIVANJA ELEKTRIČNE OTPORNOSTI IZOLACIJE

Etalonirano merilo za ispitivanje električne otpornosti izolacije koristi se za ispitivanje električnih instalacija, kablova i opreme. Ta ispitivanja često se vrše na terenu, gde nisu uvek ostvareni referentni uslovi koje je naveo proizvođač merila.

Zato proizvođač daje komponente upotrebne (radne) greške i to: usled uticaja promene položaja upotrebe merila, usled uticaja promene napona napajanja merila i usled uticaja promene temperature okoline, pod pretpostavkom da se ostali uticaji mogu zanemariti.

Da bi odredili mernu nesigurnost rezultata ispitivanja električne otpornosti izolacije [8], [9] polazimo od modela merenja.

Za ispitivanje električne otpornosti izolacije električnih instalacija, kablova i opreme na terenu moguće je napisati sledeći model merenja:

$$R_{\text{IZO}} = R_{\text{IZOsr}} + \delta R_{\text{IZOspec}} + \delta R_{\text{IZOres}} + \delta R_{\text{IZOcal}} + \delta R_{\text{IZOpl}} + \delta R_{\text{IZOnap}} + \delta R_{\text{IZOtemp}} \quad (6)$$

gde je:

R_{IZO} - rezultat merenja električne otpornosti izolacije (električnih kablova, instalacije ili opreme),

R_{IZOsr} - srednja vrednost vrednosti električne otpornosti izolacije određena iz ponovljenih merenja,

δR_{IZOres} - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled rezolucije korišćenog merila. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

$\delta R_{\text{IZOspec}}$ - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled specifikacije proizvođača za grešku korišćenog merila. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

δR_{IZOcal} - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled merne nesigurnosti etaloniranja korišćenog merila u akreditovanoj laboratoriji. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

δR_{IZOpl} - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled položaja upotrebe

korišćenog merila. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

$\delta R_{IZO_{nap}}$ - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled napona napajanja korišćenog merila. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti,

$\delta R_{IZO_{temp}}$ - korekcija izmerene vrednosti električne otpornosti izolacije usled temperature okoline pri korišćenju merila za ispitivanje. Ova korekcija se ne vrši ali se uzima kao komponenta merne nesigurnosti.

Smatramo da ulazne veličine nisu korelisane.

3.1. Primer budžeta merne nesigurnosti kod ispitivanja električne otpornosti izolacije električne instalacije

Pri ispitivanju električne otpornosti izolacije na terenu, nastoji se da se merenja vrše u referentnim uslovima koje je deklarirao proizvođač merila. Ukoliko nije moguće ostvariti referentne uslove za sve uticajne veličine, onda se moraju uzeti u obzir i komponente merne nesigurnosti koje potiču od tih uticajnih veličina. Uticajna veličina, koja na terenu često nije u referentnim granicama je temperatura.

U tabeli 2 dat je primer budžeta merne nesigurnosti kod ispitivanja električne otpornosti izolacije npr. Električne instalacije, kada su sve uticajne veličine u dozvoljenim granicama.

Komponente standardne merne nesigurnosti rezultata ispitivanja električne otpornosti izolacije prema modelu merenja (6) su:

a) tip A, merne nesigurnosti, koji se određuje iz ponovljenih merenja električne otpornosti na način opisan kod etaloniranja, i iznosi npr. 1,432 k Ω .

b) standardna merna nesigurnost usled rezolucije merila npr. 0,001 M Ω (uniformna raspodela verovatnoće, koeficijent deljenja $2\sqrt{3}$), i iznosi

$$u(\delta R_{IZO_{res}}) = 0,001 \text{ M}\Omega / 2\sqrt{3} = 0,289 \text{ k}\Omega.$$

c) standardna merna nesigurnost usled specifikacije proizvođača za grešku merila, npr. $\pm (2\%R + 2 \text{ dig})$ (uniformna raspodela verovatnoće, koeficijent deljenja $2\sqrt{3}$):

$$u(\delta R_{IZO_{spec}}) = 2 \cdot (0,516 \text{ M}\Omega \cdot 2 / 100 + 0,002 \text{ M}\Omega) / 2\sqrt{3} = 7,113 \text{ k}\Omega.$$

d) merna nesigurnost usled merne nesigurnosti etaloniranja merila električne otpornosti izolacije u akreditovanoj laboratoriji. Ova komponenta merne nesigurnosti određuje se tako da se vrednost proširene merne nesigurnosti iz uverenja (sertifikata) o etaloniranju koja iznosi npr. 3,0 k Ω , podeli sa faktorom obuhvata/pokrivanja k koji je naveden, npr. $k=2$, i iznosi: $u(\delta R_{et-cal}) = 3,0 \text{ k}\Omega / 2 = 1,5 \text{ k}\Omega$.

e) Ostale komponente merne nesigurnosti, u skladu sa modelom merenja, dobiju se tako da se (\pm vrednost odstupanja) koje je naveo proizvođač za date radne uslove, u slučaju pravougaone raspodele verovatnoće, podele sa koeficijentom $2\sqrt{3}$.

Zatim se odredi kombinovana merna nesigurnost rezultata merenja prema formuli (2), a detalji su dati u tabeli 2. Efektivni broj stepeni slobode $v_{eff} = 180$ izračuna se prema Welch-Satterwite formuli [1], [6].

Proširena merna nesigurnost rezultata ispitivanja električne otpornosti izolacije, oznaka U , prema formuli (4) za normalnu raspodelu i verovatnoću pokrivanja približno 95%, i faktor obuhvata/ pokrivanja je $k=2$, iznosi: $U = 2 \cdot 7,4 \text{ k}\Omega \cong 15 \text{ k}\Omega$.

Rezultat ispitivanja glasi: Električna otpornost izolacije električne instalacije pri ispitivanju ispitnim DC naponom 500 V, sa nivoom poverenja (verovatnoća pokrivanja) od približno 95% i normalnu raspodelu verovatnoće iznosi: $R_{IZO} = 0,516 \text{ M}\Omega \pm 15 \text{ k}\Omega$.

Tabela 2. Primer za budžet merne nesigurnosti rezultata ispitivanja električne otpornosti izolacije električne instalacije, naponom 500 V

Veličina	Vrednost [M Ω]	Merna nesigurnost $u(x_i)$ [k Ω]	Tip merne nesig.	Raspodela	Broj stepeni slobode	Koef. osetlj. c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ [k Ω]
$R_{IZO_{sr}}$	0,516	1,432	A	normalna	4	1	1,432
$\delta R_{IZO_{spec}}$	0,0	7,113	B	uniformna	∞	1	7,113
$\delta R_{IZO_{res}}$	0,0	0,289	B	uniformna	∞	1	0,289
$\delta R_{IZO_{cal}}$	0,0	1,500	B	normalna	∞	1	1,500
$v_{eff} = 180$						$u_c = 7,4 \text{ k}\Omega$	

4. ZAKLJUČAK

Samo oni rezultati merenja, koje daju različiti subjekti, uz koje je data procenjena merna nesigurnost mogu da se upoređuju. Pri tom, sledivost etalona, merila i rezultata merenja, mora da bude obezbeđena.

U ovom radu pokazano je da je u oba slučaja: a) kod etaloniranja merila električne otpornosti izolacije i b) kod ispitivanja električne otpornosti izolacije etaloniranim merilom, moguće izvesti matematički model merenja i na osnovu njega vrednovati mernu

nesigurnost rezultata merenja u skladu sa uputstvima čije su oznake GUM i EA-4/02 M:2013 [1], [6].

LITERATURA

- [1] JCGM 100:2008: (GUM 1995 with minor corrections) Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, dostupno na www.BIPM.org.
- [2] 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, dostupno na www.BIPM.org.
- [3] Vučijak N, Pejović P, *Dva postupka procene merne nesigurnosti rezultata merenja fazne razlike metodom tri voltmetra*, Tehnika No. 3/2014, str. 549-554, 2014, ISSN 0040-2176.
- [4] SRPS ISO/IEC 17025:2017 Opšti zahtevi Za Kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje, Institut za standardizaciju Srbije, decembar 2017.
- [5] JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms, dostupno na www.BIPM.org.
- [6] EA - 4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement, European co-operation for Accreditation, dostupno na www.european-accreditation.org.
- [7] Pravilnik o vrstama merila za koja je obavezno overavanje i vremenskim intervalima njihovog periodičnog overavanja, Sl. Glasnik RS, br. 49/2010.
- [8] EA-4/16 G (rev.00):2003, EA Guidelines on the Expression of Uncertainty in Quantitative testing, European co-operation for Accreditation, dostupno na www.european-accreditation.org.
- [9] ILAC-G17:2002 Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025, dostupno na <https://ilac.org>.

SUMMARY

UNCERTAINTY EVALUATION OF THE RESULTS OF ELECTRICAL INSULATION TESTER CALIBRATION AND ITS APPLICATION FOR TESTING

In this paper evaluation of the uncertainty of electrical insulation tester calibration and evaluation of the uncertainty of electrical insulation testing results, are presented in details. The uncertainty of measurements is evaluated according guides whose abbreviated marks are: GUM and EA - 4/02 M:2013. Traceability of standards used in calibration and traceability of measuring instruments used in testing, is obliged. The calibration of measuring instrument is performed at reference conditions by accredited laboratory for calibration. When using calibrated measuring instrument for outdoor measurement then the working conditions may be different from the reference conditions, and expanded uncertainty can have larger value.

Key words: *electrical insulation resistance, calibration, testing, uncertainty of measurement*