

# ИСПИТИВАЊЕ УТИЦАЈА АМБИЈЕНТАЛНИХ УСЛОВА НА МЕРНУ НЕСИГУРНОСТ МЕРЕЊА ПРОБОЈНОГ НАПОНА МИНЕРАЛНОГ ИЗОЛАЦИОНОГ УЉА

Весна Радин, Бранка Ђурић, Неда Ковачевић

Кључне речи: репродуктивност мерења, мерна несигурност, пробојни напон, минерално  
изолационо уље

## КРАТАК САДРЖАЈ

Пробојни напон је способност минералног изолационог уља да издржи јако електрично поље али да при том не дође до пробоја. У овом раду је приказан утицај различитих амбијенталних услова на стабилност и репродуктивност мерења. Испитивани су могући извори несигурности мерења и истражена потреба за евентуалним корекцијама начина мерења у циљу веће поузданости.

## AMBIENT CONDITIONS IMPACT ON UNCERTAINTY OF MEASUREMENT OF BREAKDOWN VOLTAGE OF MINERAL INSULATION OIL

Vesna Radin, Branka Đurić, Neda Kovačević

Keywords: reproductivity, uncertainty, breakdown voltage, mineral insulation oil

## ABSTRACT

Scope of this paper was investigation of different atmospheric impact on measurement reproducibility of breakdown voltage of mineral insulating oil. The influence of atmospheric conditions at field were considered in relation to laboratory test conditions. Possible sources of measurement uncertainty were studied. The need for corrections of measurement method in order to increase reliability was investigated.

## УВОД

Хемијска лабораторија института Никола Тесла је дуги низ година акредитована за мерење пробојног напона минералног изолационог уља, а један од важнијих захтева стандарда ИСО/ИЕЦ 17025 је процена мерне несигурности. Познавање мерне несигурности је од суштинске важности за лабораторије али и за све кориснике ових резултата. Она представља оцену поверења у резултате мерења и омогућава њихово поређење.

Последњих неколико година се указала потреба за теренским мерењима која се спровode у импровизованој лабораторији. Зато је било потребно размотрити утицај атмосферских тј. теренских у односу на лабораторијске услове испитивања. У овом раду истражен је утицај различитих атмосферских услова на стабилност и репродуктивност мерења пробојног напона минералног изолационог уља. Проучавани су могући извори несигурности мерења и истражена потреба за евентуалним корекцијама начина мерења у циљу веће поузданости.

За испитивање пробојног напона коришћен је инструмент произвођача Vaur, са аутоматским мерењем (слика 1), који се може користити и у лабораторији и на терену. Уређај се еталонира једном годишње у Лабораторији за еталонирање института Никола Тесла која је такође акредитована.



Слика 1. Опрема за испитивање пробојног напона

Пробојни напон се мери у складу са стандардом ИЕЦ 60156 [1], тако што се узорак уља излаже порасту једносмерног електричног поља све док не дође до пробоја. Електрично поље се успоставља између две електроде тачно дефинисаног облика и на тачно дефинисаном растојању (од 2,5 cm). Сва мерења, која су предмет овог рада, спроведена су на једном репрезентативном узорку који је изабран тако да покрива целокупан аналитички процес.

## СПРОВОЂЕЊЕ МЕРЕЊА И ПРИНЦИП ПРОЦЕНЕ МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

Мерења су спроведена током маја и јуна 2022. године, након поступка обраде уља када је било могуће обезбедити довољну количину хомогеног и репрезентативног узорка (око десетак литара уља).

Пре почетка мерења спроводи се узорковање наливањем уља у мерну ћелију, слика 2. Ћелија се пуни тако да тест електроде буду потпуно покривене уљем. У тренутку пробоја уређај аутоматски искључује испитни напон. Број мерења на једном узорку је дефинисан стандардом и износи 6. По завршетку мерења, ћелија са уљем се испразни и налије се нова количина узорка. У табелама 1 и 2 су приказани резултати мерења као и атмосферски услови околине (температура и релативна ваздуха).



Слика 2. Мерна ћелија са уљем

Прва серија мерења је спроведена на терену, у импровизованој лабораторији, у близини трансформатора, Табела 1.

Табела 1. Резултати мерења на терену

Редни бр.	Појединачна мерења, kV						Средња вредност, kV	Амбијентални услови	
	I	II	III	IV	V	VI		Температура ваздуха, °C	Влажност ваздуха, %
1	74,6	74,3	74,4	74,3	74,4	74,1	74,36	20	52
2	67,8	65,1	71,2	72,3	72,3	66,9	69,27	20	52
3	65,6	57,9	62,8	60,9	47,1	60,3	59,10	20	52
4	63,4	72,7	71,7	73,2	74,2	69,3	70,75	20	52
5	63,0	57,7	41,4	65,2	52,6	74,5	59,07	23	48
6	74,8	41,6	50,9	69,8	74,3	61,5	62,15	23	48
7	74,7	72,7	74,7	74,7	74,7	64,7	72,70	23	48
8	68,6	73,2	71,8	60,4	69,9	73,5	69,57	23	48
9	73,9	73,1	71,6	71,5	60,8	70,3	70,20	24	41
10	73,2	74,4	72,0	74,4	70,0	72,3	72,72	24	41
Средња вредност свих мерења							68,0		

Друга серија мерења је извршена у просторијама Лабораторије за испитивање изолационог уља и папира института Никола Тесла, Табела 2.

Табела 2. Резултати мерења у лабораторији

Редни бр.	Појединачна мерења, kV						Средња вредност, kV	Амбијентални услови	
	I	II	III	IV	V	VI		Температура ваздуха, °C	Влажност ваздуха, %
1	71,9	66,5	74,5	74,5	65,9	67,7	70,17	23	43
2	74,6	66,7	69,3	74,5	69,9	66,6	70,27	22	43
3	68,8	63,9	52,4	69,8	69,1	73,9	66,32	22	43
4	65,8	57,3	72,3	73,1	69,1	74,5	68,68	23	44
5	74,8	74,5	74,5	73,4	74,4	73,4	74,17	23	43
6	57,6	66,3	69,0	58,6	64,2	60,7	62,73	23	43
7	72,5	71,4	46,4	64,6	74,2	51,0	63,35	23	43
8	57,4	52,1	54,3	68,4	58,0	68,3	59,75	23	43
9	74,8	61,3	71,7	65,0	67,3	63,5	67,27	23	43
10	71,8	74,5	59,2	60,3	62,2	67,2	65,87	23	43
Средња вредност свих мерења							66,8		

Несигурност једног мерења се састоји од две компоненте и то од: несигурности настале од узорковања матрикса и коришћења ових узорка ради представљања целокупне масе узорка и несигурности услед аналитичког процеса. У овој методи, само мерење је аутоматизовано па се ове две компоненте могу изједначити.

#### *Математички модел мерења и буџет мерне несигурности*

Процена мерне несигурности је извршена у складу са смерницама датим у документима EA-4/16 [2] и EURACHEM/CITAC Guide CG 4 [3]. Буџет мерне несигурности мерења пробојног напона ( $U_p$ ) се може приказати следећом једначином:

$$u(U_p) = f(u_A(U_p), u_A(T), u_A(H), u_B(U_p), u_B(G), u_B(r), u_B(T), u_B(H)) \quad (1)$$

којом су обухваћени сви могући извори мерне несигурности:

$u_A(U_p)$  – статистичка компонента настала од поновљеног узорковања,

$u_A(T)$  – статистичка компонента настала од поновљеног мерења температуре ваздуха,

$u_A(H)$  – статистичка компонента настала од поновљеног мерења влажности ваздуха,

$u_B(U_p)$  – несигурност типа Б, која је преузета из извештаја о еталонирању,

$u_B(G)$  – несигурност типа Б, допринос услед тачности инструмента,

$u_B(r)$  – несигурност типа Б, допринос резолуције инструмента,

$u_B(T)$  – несигурност типа Б за термометар, преузета из уверења о еталонирању,

$u_B(H)$  – несигурност типа Б за хигрометар, преузета из уверења о еталонирању.

Допринос мерној несигурности услед узорковања процењен је на основу више поновљених мерења. Ово је несигурност типа А и базирана је на статистичкој анализи одређеног броја ( $n$ ) независних и једнако тачних поновљених мерења. Мерење је спроведено више пута у дужем временском периоду и под различитим амбијенталним условима. За процену стандардне мерне несигурности  $u_A(U_p)$  је употребљена комбинована стандардна девијација (енг. *pooled standard deviation*,  $s_{pooled}$ ) [4] која у овом случају боље описује расипање мерења у односу на експерименталну стандардну девијацију средње вредности. Комбинована стандардна девијација представља усредњену стандардну девијацију за два или више мерења, једначина 2.

$$s_{pooled} = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2 + \dots + (n_k-1)s_k^2}{k}} \quad (2)$$

где је:

$n$  – број мерења на једном узорку уља,

$s_1, s_2, \dots, s_k$  – експериментална стандардна девијација мерења једног узорка уља,

$k$  – укупан број узорака уља.

Следивост мерења је обезбеђена редовним еталонирањем инструмента у акредитованој лабораторији. Произвођач је декларисао грешку читавања [4] односно тачност инструмента у износу од  $\pm 1$  kV. Претпостављена је униформна расподела, па је несигурност читања (тачности,  $G$ ) одређена из следеће једначине:

$$u_B(G) = \frac{G}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Спецификацијом инструмента [4] је дата и резолуција мерења ( $r$ ) и она износи 0,1 kV. То је такође несигурност типа Б, са правоугаоном расподелом, а њена несигурност је израчуната на следећи начин:

$$u_B(r) = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (4)$$

Произвођач је декларисао радне услове инструмента при чему температура ваздуха треба да се креће у опсегу од 0 °C до 45 °C. Са друге стране релативна влажност ваздуха није детаљније разматрана, већ је декларисан услов да нема кондензације. Приликом теренских мерења влажност ваздуха није било могуће адекватно контролисати и њена вредност се кретала у опсегу од 41 % до 52 %. Ова два податка су такође мерена и обрађена статистички како би се квантификовао њихов допринос укупној мерној несигурности.

Пошто мерене величине нису међусобно корелисане, фактори осетљивости су једнаки јединици.

Буџет мерне несигурности за мерења на терену је приказан у табели 3.

Табела 3. Буџет мерне несигурности за теренска мерења

Величина	Несигурност $u(x_i)$ , %	Коефицијент осетљивости $c_i$	$c_i \cdot u(x_i)$ , %	$[c_i u(x_i)]^2 / u_c^2 \times 100$ , %
$u_A(U_p)$	9.04	1	9.04	35.66
$u_B(U_p)$	0.36	1	0.36	0.06
$u_B(G)$	0.85	1	0.85	0.31
$u_B(r)$	0.04	1	0.04	0.001
$u_A(T)$	8.02	1	8.02	28.08
$u_B(T)$	1.13	1	1.13	0.56
$u_A(H)$	8.79	1	8.79	33.76
$u_B(H)$	1.90	1	1.90	1.58
		$u_c$	15.13	

Основа за процену је поновљено мерење репрезентативног узорка и статистички приступ у ком различити извори процењени и комбиновани у једну вредност (комбинована мерна несигурност,  $u_c$ ).

Из табеле 3, се види да доминантан допринос мерној несигурности потиче од статистичке компоненте па је усвојена нормална расподела. Проширена мерна несигурност је добијена множењем комбиноване несигурности са коефицијентом проширења  $k = 2$  који одговара нивоу поверења од 95 % и износи  $\pm 30,3$  %.

На исти начин је спроведена процена мерне несигурности пробојног напона у лабораторијским условима, табела 4.

Табела 4. Буџет мерне несигурности за лабораторијска мерења

Величина	Несигурност $u(x_i)$ , %	Коефицијент осетљивости $c_i$	$c_i \cdot u(x_i)$ , %	$[c_i u(x_i)]^2 / u_c^2 \times 100$ , %
$u_A(U_p)$	9.49	1	9.487	90.24
$u_B(U_p)$	0.360	1	0.360	0.13
$u_B(G)$	0.864	1	0.864	0.75
$u_B(r)$	0.043	1	0.043	0.00
$u_A(T)$	1.849	1	1.849	3.43
$u_B(T)$	1.135	1	1.135	1.29
$u_A(H)$	0.73	1	0.734	0.54
$u_B(H)$	1.9	1	1.900	3.62
		$u_c$	9.99	

Проширена мерна несигурност за мерења спроведена у лабораторији је добијена множењем комбиноване несигурности са коефицијентом проширења  $k = 2$  који одговара нивоу поверења од 95 % и износи  $\pm 20$  %.

## ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

Анализом резултата мерења у теренским и лабораторијским условима, уочено је добро слагање средњих вредности пробојног напона. Мерења су извршена у периоду од неколико недеља, од стране два испитивача. Анализа средњих вредности појединачних мерења показала је добро

слагање резултата уз задовољен услов репродуктивности од 30 % одступања, прописан у стандарду ИЕЦ 60156.

Резултати свих мерења спроведених на терену су усредњени (табела 1), а добијеној вредности од 68 kV је придружена проширена мерна несигурност  $\pm 30,3 \%$ , односно  $\pm 20$  kV. То значи да тачан резултат мерења може да се нађе било где у опсегу од 48 kV до 88 kV.

Резултати свих лабораторијских мерења су такође усредњени (табела 2), а добијена је вредност од 67 kV. Средњој вредности ових мерења придружена је проширена мерна несигурност  $\pm 20 \%$ , односно  $\pm 13$  kV. То значи да тачан резултат мерења може да се нађе било где у опсегу од 54 kV до 80 kV.

Стандард ИЕЦ 60156 прописује да оперативна температура ваздуха и узорка уља износи  $20 \pm 5$  °C. Приликом мерења температура околног ваздуха није значајније одступала од прописаног опсега, док је релативна влажност у неким случајевима прелазила вредност од 50 %. Утицај влажности ваздуха на поузданост мерења је могућ само у случају велике влажности (изнад 50 %) када је теоретски могућа и миграција воде из ваздуха у уље, али и могућност појаве кондензације.

У циљу квантификације величине доприноса различитих величина на укупну мерну несигурност уведен је следећи индекс:

$$\frac{[c_i \cdot u(x_i)]^2}{u_c^2} \cdot 100 \quad (5)$$

Једначина 5 описује процентуални удео појединачних стандардних несигурности у укупној комбинованој несигурности, табеле 3 и 4, колона 5. Посматрањем ових индекса код теренских мерења уочено је да утицај температуре и влажности ваздуха има значајан допринос. Допринос мерења температуре износи 28 %, док је утицај влажности ваздуха око 34 % што је скоро изједначено са несигурношћу услед понављања мерења од 36 %.

Анализом података за буџет несигурности код мерења спроведених у контролисаним условима околине, у лабораторији (Табела 4), уочено је да доминантну компоненту мерне несигурности чини несигурност услед понављања мерења око 90 %. Збир компоненти доприноса услед мерења амбијенталних услова је око 7 % па се сматра да је њихов утицај на проширену мерну несигурност мали.

У износу мерне несигурности садржане су све случајне грешке и утицаји околине и они се не могу избећи. Одавде произилази значај несигурности ради добијања доброг квалитета мерења и разумевања самог резултата. Мерну несигурност је посебно важно узети у обзир код испитивања где је неопходна процена да ли мерена величина задовољава одређени критеријум или границу. Одлуке које се доносе на основу резултата мерења често могу имати велике финансијске и материјалне последице. У том смислу потребно је посматрати интервал у коме се мерена величина налази са одређеном вероватноћом. Управо тај интервал обухвата најбољу процену мерене величине и представља мерну несигурност.

## ЗАКЉУЧАК

Познавање извора мерне несигурности је од изузетног значаја за правилно извештавање о мереној величини. Резултати мерења пробојног напона уља на различитим локацијама и амбијенталним условима показали су веома мало одступање средњих вредности мерења. Истовремено, процењене мерне несигурности су различите односно поверење у добијене вредности није исто. Резултат мерења у теренским условима налази се у опсегу од 48 kV до 88 kV, док је резултат добијен у лабораторијским условима у ужем опсегу од 54 kV до 80 kV. У том смислу, у циљу повећања поузданости мерења потребно је смањити утицај околине што је више

могуће. Да би се смањило негативан утицај повишене влажности ваздуха потребно је смањити време излагања узорка уља, односно манипулацију обављати у што краћем року.

Експерименти који су спроведени у оквиру овог рада показали су да је стабилност узорка уља током дужег временског периода задовољавајућа. Резултати пробојног напона су поновљиви и репродуктивни у дужем временском периоду (30 дана) што чини посебну вредност овог експеримента.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 60156 Insulating liquids – Determination of the beakdown voltage at power frequency – Test method
- [2] EA-4/16, EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing, december 2003
- [3] EURACHEM/CITAC Guide CG 4, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, second Edition
- [4] EA-4/02 M:2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Septembre 2013 rev 01
- [5] User manuel, Baur – Oil Tester DPA, BAUR Pruf - und Messtechnik GmbH
- [6] Eurolab Technical Report No. 1/2002, June 2002, Measurement Uncertainty in testing

Vesna Radin

Elektrotehnički institut Nikola Tesla a.d. Beograd, Koste Glavinića 8a

Telefon: +381648259759

Mejl: [vesna.radin@ieent.org](mailto:vesna.radin@ieent.org)