




## Примери ултразвучне детекције парцијалних пражњења на 110 kV мерним трансформаторима

Момчило Милић<sup>1</sup>, Ђорђе Јовановић<sup>1</sup>, Весна Радин<sup>1</sup>, Марко Димитријевић<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду Електротехнички институт Никола Тесла, , Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Србија

[momcilo.milic@ieent.org](mailto:momcilo.milic@ieent.org)

**Кратак садржај:** Мерни трансформатори представљају важне елементе у оквиру електроенергетских постројења у којима су широко распрострањени јер играју значајну улогу у мерењу и заштити електроенергетског система. Узимајући у обзир константну изложеност мерних трансформатора амбијенталним и електричним напрезањима, као и чињеницу да се неретко дешавају њихове хаварије које су често праћене експлозијом, што директно угрожава рад електроенергетских објеката и нарушава стабилност и непрекидност у напајању конзума, јавља се потреба за електричним испитивањима мерних трансформатора како би се утврдило у каквом су тренутном стању и да ли су способни, односно да ли су ризични за даљи погон. Једна од метода за испитивање мерних трансформатора, чија је велика предност што не захтева њихово искључење из погона, већ се мерења врше док је испитивани објекат оптерећен, тј. под напоном, је акустичка (ултразвучна) метода и подразумева постављање акустичког пиезо-сензора на зид трансформаторског суда који је уземљен и на безбедном растојању од делова који су под напоном, краткотрајну аквизицију и каснију анализу. Управо то поменуто методу чини једноставном за примену у погону јер не захтева никакве посебне интервенције, нити мере заштите. Акустичка детекција парцијалних пражњења се углавном врши у кооперацији са гаснохроматографском анализом изолационог уља која потврђује исказану сумњу на активност парцијалних пражњења у изолацији испитиваног објекта. У раду ће пре свега бити приказани примери ултразвучне детекције парцијалних пражњења на 110kV мерним трансформаторима на којима је и хемијска анализа узорка уља потврдила постојање парцијалних пражњења.

**Кључне речи:** Мерни трансформатори – Акустичка (ултразвучна) метода – Парцијална пражњења – Гаснохроматографска анализа.

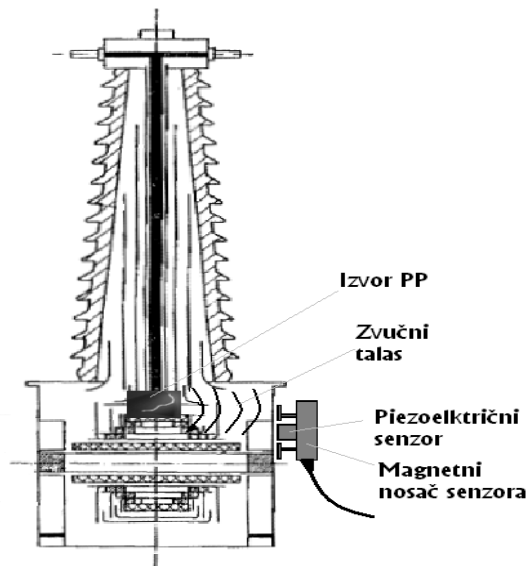
## 1 Увод

Парцијална пражњења (ПП) генеришу електромагнетне и акустичке таласе, емитују светлосне ефекте и доводе до хемијске декомпозиције изолационих материјала. Ови физички и хемијски ефекти могу бити откривени разним дијагностичким методама уз примену одговарајућих сензора. Поред такозваних конвенционалних електричних метода могућа је детекција и мерење ПП разним неконвенционалним методама при чему ће у овом раду фокус бити на акустичкој (ултразвучној) методи. ПП, као што знамо, представљају комплексан физички феномен који се састоји од локализованог електричног пражњења изазваног делимичним пробојем изолационог медијума под дејством напрезања локалног електричног поља [1]. Имајући у виду да су мерни трансформатори кључни за мерење напона и струја у електроенергетским системима, акустичко (ултразвучно) испитивање мерних трансформатора представља недеструктивну методу која се користи за процену њиховог стања и способности за даљи нормалан погон. Акустичка мерења на мерним трансформаторима помажу у идентификацији могућих механичких дефеката, затим кваровима унутар изолационог система и другим аномалијама, што на крају обезбеђује њихов безбедан и ефективан рад. Метода се ослања на детекцију звучних таласа генерисаних електричном активношћу или механичким вибрацијама унутар мерних трансформатора, при чему ови звучни таласи могу указивати на проблеме као што су парцијална пражњења унутар изолационог система. Специјализовани уређаји и сензори се користе у сврху детекције ПП на мерним трансформаторима који обезбеђују адекватну аквизицију и анализу ултразвучног сигнала конвертованог у електрични. Предности акустичке методе су то што је неинвазивна, односно не захтева искључење из погона већ се мерење врши постављањем акустичког пиезо-сензора на зид трансформаторског суда који је уземљен и на безбедном растојању од делова који су под напоном. Затим, омогућује рану детекцију, односно проактивно одржавање идентификацијом проблема пре него што они ескалирају. Оно што може бити мана акустичких (ултразвучних) испитивања мерних трансформатора је што сама интерпретација акустичког сигнала може да буде веома комплексна захтевајући да кадар који врши мерења и даљу анализу мора да буде искусан и способан да препозна и разликује сигнал који је последица парцијалних пражњења од сметњи изазваних спољним утицајем. Такође, треба истаћи да ова метода није применљива на струјне мерне трансформаторе инверзне конструкције код којих се трансформаторски суд са активним делом налази на високом потенцијалу, јер је немогуће на безбедан начин на њега поставити акустички пиезо-сензор ради аквизиције.

## 2 Принцип рада и мерни уређај

Електрична пражњења у изолационом систему генеришу напонско-струјне импулсе у мрежи али и ултразвучне таласе који се простиру кроз изолациони систем и конструкцију. Детекција и мерење насталих ултразвучних и звучних таласа се врши помоћу сонди са мембранама код којих се вибрације претварају у електрични сигнал. Амплитудно-фазно-фреквентна анализа тих сигнала садржи у себи информације о енергији, типу и месту парцијалних пражњења [2].

Активност ПП се огледа у комбинацији разних ефеката, као што су електрични, хемијски, термички и механички, те је за откривање ПП потребно искористити неки од поменутих феномена. Један део енергије извора ПП се трансформише у механичку енергију у облику високофреквентних акустичких таласа (Слика 1) [3]. Ови акустички таласи се преносе радијално у свим правцима од извора ПП ка суду мерног трансформатора. Као што је раније речено, суд мерних трансформатора је уземљен у погону што омогућује једноставан приступ и постављање сензора, обично пиезо-електричног, који акустички сигнал у пропорцији генерисаног механичког напрезања претвара у одговарајући електрични сигнал над којим се даље врши адекватна аквизиција и процена евентуалне активности ПП.



Слика 1: Приказ генерисаног акустичког таласа унутар мерног трансформатора и ултразвучне пиезо-електричне сонде постављене на зид суда

Ниво акустичког сигнала може бити дат у mV или dB што се може искористити за поређење у случају мерних трансформатора истог типа. Сигнали се прикупљају у ултразвучном фреквентном домену (преко 20kHz). Даља дијагностика подразумева тумачење такозваних образаца, односно мапа ПП (*Phase Resolved Partial Discharge Pattern - PRPDP*). Мапе ПП су заправо формиране од тачака које се акумулирају у одређеним фазним/напонским координатама репрезентујући појаву ПП у виду импулса. Софистициранији уређаји и софтвер могу дати дубљу слику, пружајући различите боје за координате у којима се импулси ПП акумулирају, при чему се користи логика да позиције где су сигнали ПП ретки, боја тачака буде хладна, нпр. сива или плава, а ако су сигнали ПП врло чести, боја се мења у жуту или црвену.

На Слици 2 представљен је уређај *AIA (Power Diagnostix)* [4] за ултразвучно мерење парцијалних пражњења. Уређај је аутономан, са сондом, микропроцесорским системом, меморијом и монитором. Могућа је RS232 комуникација са рачунаром што знатно проширује могућности по питању меморије, дводимензионалних и тродимензионалних дијаграма мерења, статистичке обраде података итд. Поред аквизиционе јединице за мерење се користе претпојачавач (*RPA1F*) и сензори, односно сонде *AS75-M* и *AS150-M* којима бројчани део имена носи податак о резонантној фреквенцији.



а)



б)

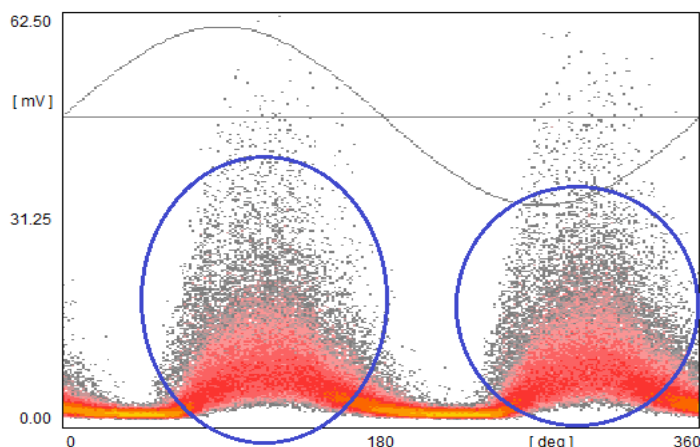
**Слика 2: Приказ: а) аквизиционе јединице уређаја *AIA* за мерење парцијалних пражњења; б) претпојачавача *RPA1F* и сонди за мерење**

### 3 Примери и интерпретација резултата мерења детекције парцијалних пражњења ултразвучном методом 110kV мерних трансформатора на терену

Кроз наредних неколико примера биће приказани резултати мерења испитаних 110kV мерних трансформатора на терену. У примерима ће пре свега акценат бити на мерењима у којима је поред ултразвучних испитивања извршена и ГХ анализа узорака уља на мерним трансформаторима који су окарактерисани као сумњиви на повишену активност ПП. Треба рећи да се у већини случајева са сигурношћу, на основу снимљених мапа ПП, може дати оцена стања мерних трансформатора, али се ипак у добром делу случајева иде на страну сигурности како би се потврдиле сумње. Ипак, процена се може донети и само на основу ултразвучних мерења имајући у виду мању количину изолационог уља у мерним трансформаторима. Такође, осврнућемо се и на поједине случајеве спољашњих сметњи које на први поглед могу „заварати“ да се ради о ПП, при чему у таквим ситуацијама преовладава искуство испитивача. У свим примерима измерене вредности напонског сигнала који је последица акустичке манифестације присуства парцијалних и других пражњења су изражене у mV.

#### 3.1 Пример 1

У овом примеру испитан је струјни мерни трансформатор (СМТ) типа *TPE – 11B*, бр. x1 чији је ниво акустичког сигнала био повишен и износио је 57,5 mV, а чија је снимљена мапа ПП (Слика 3) упућивала на ПП [5]. Плавим круговима је обележен део снимљеног сигнала карактеристичног за појаву ПП.



Слика 3: Мапа фазне расподеле импулса парцијалних пражњења на СМТ бр. x1

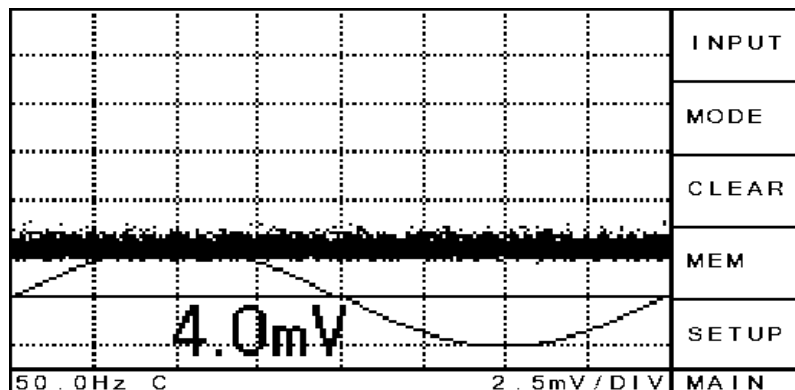
У Табели 1 дати су резултати ГХ анализе узорка уља горе наведеног СМТ где је потврђено да је на основу контроле садржаја гасова уочен квар, оцена Ц. У уљу су измерене веома високе концентрације водоника, метана и етана, насталих као последица парцијалних пражњења, при чему је напоменуто да је СМТ под високим погонским ризиком и да се не препоручује његова даља експлоатација.

**Табела 1 Резултати анализе садржаја гасова СМТ бр. х1[6, 7]**

Појединачне концентрације гасова, ppm									Оцена
Водоник (H <sub>2</sub> )	Метан (CH <sub>4</sub> )	Ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Етилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Етан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Угљен моноксид (CO)	Угљен диоксид (CO <sub>2</sub> )	Кисеоник (O <sub>2</sub> )	Азот (N <sub>2</sub> )	
4571	3398	0	43	952	966	2849	773	60730	Цпп

ПП – парцијална пражњења;

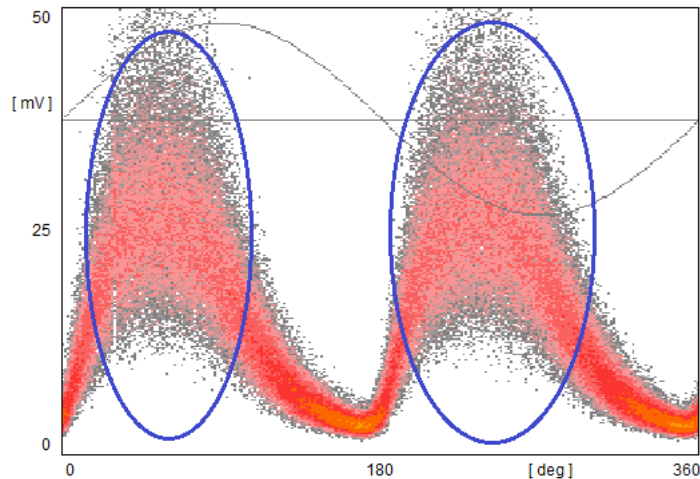
Наиме, у истом далеководном пољу постоји још један мерни трансформатор истог типа бр. х2 на коме је измерен ниво сигнала карактеристичан за исправан мерни трансформатор (Слика 4) што је још један показатељ добре оцене стања на ПП сумњивог СМТ.



**Слика 4: Образац парцијалних пражњења на СМТ бр. х2**

### 3.2 Пример 2

У овом случају је такође у питању СМТ, типа *TPE - 11C*, бр. х3 чији је ниво акустичког сигнала мереном вредношћу од 49 mV и обрасцем ПП (Слика 5) указивао на активност ПП [5].



**Слика 5: Мапа фазне расподеле импулса парцијалних пражњења на СМТ бр. х3**

Карактеристичан облик и ниво сигнала за СМТ без активности ПП је идентичан оном приказаном на Слици 4.

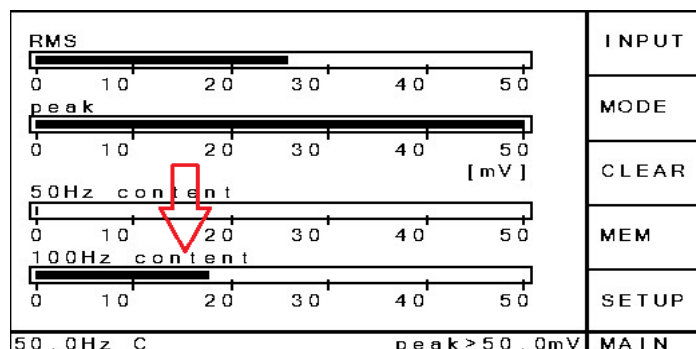
У Табели 2 дати су резултати ГХ анализе узорка уља претходно наведеног СМТ где је такође потврђено присуство квара као последице ПП, оцена Ц. У уљу су измерене веома високе концентрације водоника, метана и етана, насталих као последица парцијалних пражњења, при чему је напоменуто да је СМТ под високим погонским ризиком и да се не препоручује његово пуштање у рад.

**Табела 2 Резултати анализе садржаја гасова СМТ бр. х3[6, 7]**

Појединачне концентрације гасова, ppm									Оцена
Водоник (H <sub>2</sub> )	Метан (CH <sub>4</sub> )	Ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Етилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Етан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Угљен монооксид (CO)	Угљен диоксид (CO <sub>2</sub> )	Кисеоник (O <sub>2</sub> )	Азот (N <sub>2</sub> )	
<b>24764</b>	<b>12124</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1451</b>	<b>77</b>	<b>374</b>	<b>2660</b>	<b>27961</b>	<b>Цпп</b>

ПП – парцијална пражњења;

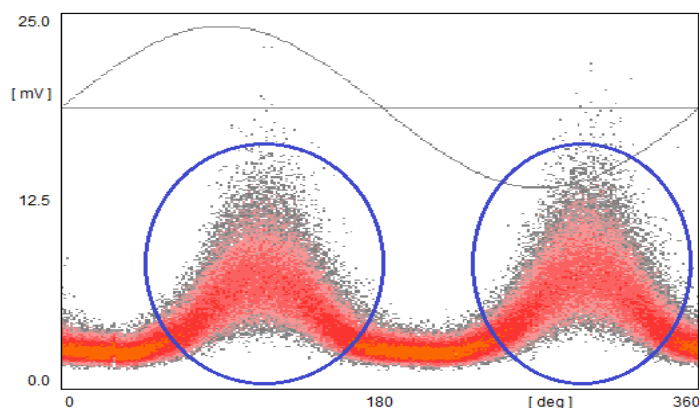
Иначе, овакав облик сигнала (Слика 5) у веома великом броју случајева недвосмислено указује на ПП, али може бити последица растресености, односно олабављености магнетних лимова, где се услед појаве магнетострикције јавља већи удео 100Hz компоненте сигнала (Слика 6 – црвена стрелица).



Слика 6: Приказ нивоа акустичког сигнала и удела компоненте 100Hz за СМТ бр. х3

### 3.3 Пример 3

Иако се према досадашњем искуству у највећем броју случајева ПП углавном јављају код СМТ, у примеру 3 је у питању напонски мерни трансформатор (НМТ) типа *МВН - 123*, бр. у1. На први поглед измерен је не тако висок ниво напонског сигнала (16,1 mV), али ипак око 4 пута већи него за НМТ истог типа у преостале две фазе (око 4 mV – готово идентичан сигналу са Сликe 4). У оваквим ситуацијама узрок повишене вредности напонског сигнала може бити изазван утицајем спољашњих сметњи. Ипак, на основу снимљене мапе фазне расподеле мереног сигнала приказане на Слици 7 [8] дошло се до закључка да је последица заправо појава ПП, а исто је потврдила и ГХ анализа узорка уља дата у Табели 3.



Слика 7: Мапа фазне расподеле импулса парцијалних пражњења на НМТ бр. у1



**Табела 3 Резултати анализе садржаја гасова НМТ бр. у1[6, 7]**

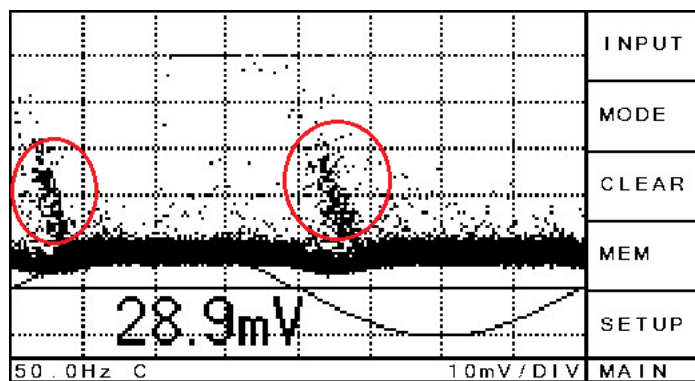
Појединачне концентрације гасова, ppm									Оцена
Водоник (H <sub>2</sub> )	Метан (CH <sub>4</sub> )	Ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Етилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Етан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Угљен моноксид (CO)	Угљен диоксид (CO <sub>2</sub> )	Кисеоник (O <sub>2</sub> )	Азот (N <sub>2</sub> )	
32973	7177	0	0	1799	35	246	437	16250	Цпп

ПП – парцијална пражњења;

Као и у претходна два примера, поменути НМТ окарактерисан је као веома ризичан за даљи погон.

### 3.4 Пример 4

Као што је раније поменуто постоје ситуације у којима спољашње сметње могу навести испитивача да се ради о ПП, а да то заиста није случај што је приказано у овом примеру. Наиме, на НМТ типа *UH 11-15*, бр. у2 измерен је око 3 пута већи ниво сигнала у односу на НМТ истог типа у преостале две фазе, реда величине 30 mV (Слика 8).



**Слика 8: Мапа фазне расподеле импулса парцијалних пражњења на НМТ бр. у2**

Анализом снимљене мапе ПП, као и упоређивањем са неким сличним примерима у којима су значајан утицај имале управо спољашње сметње одмах се посумњало да је у питању спољни фактор. Међутим, зарад сигурности и како би се дефинитивно имала потврда да су у питању спољашње сметње, а не активност ПП узет је узорак уља за ГХ анализу чији су резултати дати у Табели 4 оценили наведени НМТ оценом А, односно у узорку уља су измерене концентрације гасова које

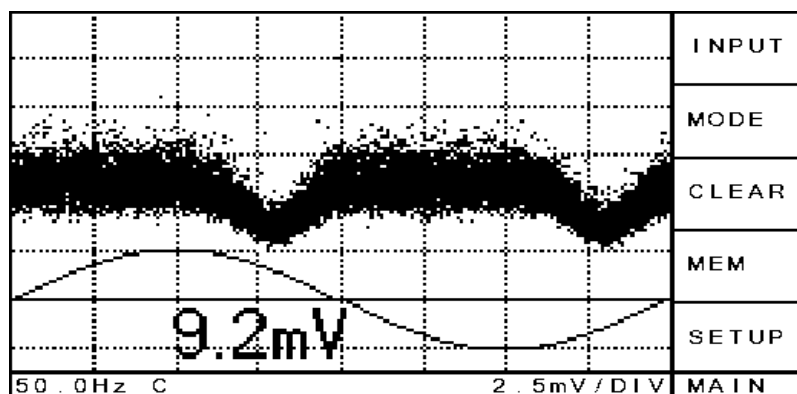
се сматрају продуктом старења изолације под нормалним погонским условима и стање предметног НМТ је оцењено као задовољавајуће.

**Табела 4 Резултати анализе садржаја гасова НМТ у2[6, 7]**

**бр.**

Појединачне концентрације гасова, ppm									Оцена
Водоник (H <sub>2</sub> )	Метан (CH <sub>4</sub> )	Ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Етилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Етан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Угљен моноксид (CO)	Угљен диоксид (CO <sub>2</sub> )	Кисеоник (O <sub>2</sub> )	Азот (N <sub>2</sub> )	
4	1	1	0	0	53	668	25281	60592	A

Искуство са испитивањем НМТ типа *UH 11-15* показало је да нормалан и очекиван сигнал има облик „крила“ што се можда са стране посматрача не види најјасније на Слици 8 због смањеног појачања, али је на Слици 9 дат приказ како у већини случајева изгледа сигнал снимљена наведеном типу НМТ уз варијације у вредности напонског сигнала од реда неколико mV, па све до неких 3 или 4 десетине mV.



**Слика 9: Мапа фазне расподеле импулса парцијалних пражњења на НМТ бр. у3**

#### 4 Закључак

Идеја рада је да се кроз практичне примере прикажу резултати мерења и подели искуство са теренских испитивања у погледу акустичке методе мерења ПП на 110 kV мерним трансформаторима. Сама метода,

као и уређај којим се врши испитивање су веома једноставни, а корист од овог начина мерења су вишеструки узимајући у обзир само да се не захтева искључење, нити развезивање МТ, а правилним тумачењем добијених резултата и искуством испитивача се може врло брзо дати оцена стања МТ како би се правовремено реаговало и избегле потенцијалне хаварије и на тај начин обезбедио поуздан и безбедан рад електроенергетских постројења.

Захвалница са бројем уговора

Овај рад је подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије кроз Уговор о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2024. години (број уговора 451-03-66/2024-03).

## Литература

- [1] *High voltage test technique – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods, IEC TS 62478:2016*
- [2] „Ултразвучно испитивање парцијалних прањjenja код мernih трансформатора“, Savo Marinković, Dragan Teslić, Ђорђе Јовановић, Nenad Kartalović, Miloš Sušić, 1. *Savjetovanje CIGRE Crna Gora 2009.*
- [3] „On line acoustic detection of partial discharge in oil filled instrument transformers as a tool for screening“, Denis Ilić, Branko Pejović, Radmila Kališkić, Momčilo Milić, Ђорђе Јовановић, Jelena Janković, Ksenija Drakić, Vesna Radin, Nevena Malešević, Srđan Milosavljević; *CIGRE South East European Regional Council Conference 2020 in Vienna, Austria*
- [4] *Упутство за употребу мерног уређаја AIA compact Acoustic Insulation Analyzer, Power Diagnostix System Aachen, Ver. 2.00, 2005.*
- [5] Извештај Института Никола Тесла бр. 424074
- [6] Извештај Института Никола Тесла бр. 424141-Л
- [7] *Одређивање садржаја гасова растворених у уљу и слободних гасова у електричној опреми, гасни хроматограф Agilent 7890В ТОGA, калибрисан сертифицикованим референтним стандардима следивим до NIST, SRPS EN 60567:2013.*
- [8] Извештај Института Никола Тесла бр. 424082

**Abstract:** Instrument transformers are a critical component of power plants, widely distributed due to their essential role in measuring and protecting the entire power system. Given their continuous exposure to environmental and electrical stresses, and the potential for explosive failures that can jeopardize power facility operations and disrupt power supply, regular electrical testing is crucial to assess their condition and operational reliability. One non-invasive testing method for instrument transformers is acoustic (ultrasound) analysis. This technique involves placing an acoustic piezo-sensor on the grounded wall of the transformer tank, at a safe distance from high-voltage components. Short-term data acquisition and subsequent analysis are then performed. This method is particularly advantageous for power plants as it requires minimal intervention and does not necessitate disconnecting the transformer from operation. Acoustic detection of partial discharges is often complemented by gas chromatographic analysis of insulating oil. This combined approach provides robust confirmation of partial discharge activity within the transformer's insulation system. This paper will present case studies of ultrasonic detection of partial discharges on 110 kV instrument transformers, where chemical analysis of oil samples corroborated the presence of these detrimental discharges.

**Keywords:** Instrument transformers - Acoustic (ultrasonic) method - Partial discharges - Gas chromatographic analysis of oil samples.

## **Examples of Ultrasonic Detection of Partial Discharges in Case of 110 kV Instrument Transformers**

Momčilo Milić<sup>ORCID</sup>, Đorđe Jovanović<sup>ORCID</sup>, Vesna Radin<sup>ORCID</sup>, Marko Dimitrijević

Рад примљен у уредништво: 04.11.2024. године.

Рад прихваћен: 21.11.2024. године