



ДЕЈСТВА ТРОФАЗНОГ МАГНЕТНОГ ЈЕЗГРА И НАМОТАЈА НА ВРЕМЕ ПРИСТИЗАЊА
СИГНАЛА ОД ИЗВОРА ПАРЦИЈАЛНОГ ПРАЖЊЕЊА ДО UHF ДАВАЧА У
ЕНЕРГЕТСКОМ ТРАНСФОРМАТОРУ

EFFECTS OF THREE-PHASE MAGNETIC CORE AND WINDINGS ON TIME OF SIGNAL
ARRIVAL FROM PARTIAL DISCHARGE SOURCE TO UHF SENSORS IN POWER
TRANSFORMER

Ђорђе ДУКАНАЦ, Акционарско друштво „Електромрежа Србије“, Београд, Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

Парцијална пражњења у енергетском трансформатору погоршавају стање његове електричне изолације и могу да доведу до квара трансформатора. Уопште, до парцијалног пражњења може да дође при напону већем од 5 kV. Парцијално пражњење може да се деси у шупљини испуњеној гасом у чврстом изолационом материјалу или у мехуру гаса у течној изолацији. У овом раду, анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање UHF таласа од извора парцијалних пражњења до пријемне UHF антене биће извршена употребом електромагнетског примењеног програма Ansys HFSS. Основни проблем се овде одређује као високофреквентни проблем, за разлику од квазистатичког проблема или проблема на ниској учестаности. Геометријски модел се дели у велики број тетраедарских елемената. Разматрају се времена пристизања UHF сигнала на UHF давачима монтираним на различитим местима суда малог енергетског трансформатора конструкције типа језгра. Извор парцијалних пражњења представља предајну UHF антену. UHF давачи и извор парцијалних пражњења обликовани су помоћу двополних тракастих антена. Врше се пуноталасне електромагнетске симулације. Облик таласа биће изобличен услед дејства одбијања електромагнетских UHF таласа од зидова суда, скретања око и одбијања таласа од елемената трофазног магнетног језгра и трофазних примарних и секундарних намотаја, при чему долази до суперпозиције таласа на месту пријема. Због тога ће облици сигнала на различито постављеним пријемним UHF антенама у суду енергетског трансформатора да буду различити.

Кључне речи: време пристизања – енергетски трансформатор – изобличење сигнала – парцијална пражњења – UHF сигнал.

ABSTRACT

Partial discharges in the power transformer worsen the condition of its electrical insulation and can lead to transformer failure. In general, partial discharge can occur at voltages higher than 5 kV. Partial discharge can occur in a gas-filled cavity in a solid insulating material or in a gas bubble in a liquid insulating material. In this paper, the analysis of the influence of the actual construction of the power transformer on the propagation of UHF waves from the source of partial discharges to the receiving UHF antenna will be performed using the electromagnetic applied program Ansys HFSS. The underlying problem is defined here as high-frequency problem, as opposed to a quasi-static problem or a low-frequency problem. The geometric model is divided into a large number of tetrahedral elements. The arrival times of UHF signals at UHF sensors placed at different locations of a small power transformer of the core type structure are considered. The source of partial discharges is the transmitting UHF antenna. UHF sensors and a source of partial discharges are shaped using strip dipole antennas. Full-wave electromagnetic simulations are performed. The waveform will be distorted due to the effect of reflection of electromagnetic UHF waves from the walls of the tank, diffraction around and reflection of waves from the elements of the three-phase magnetic core and three-phase primary and secondary windings, with superposition of waves at the receiving point. Therefore, the signal shapes on the differently placed receiving UHF antennas in the power transformer tank will be different.

Keywords: partial discharges – power transformer – signal distortion – time of arrival – UHF signal.

25
godina

13. SAVETOVANJE O ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA sa regionalnim učešćem
13th CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION with regional participation
12-16 / 09 / 2022, Kopaonik, Srbija

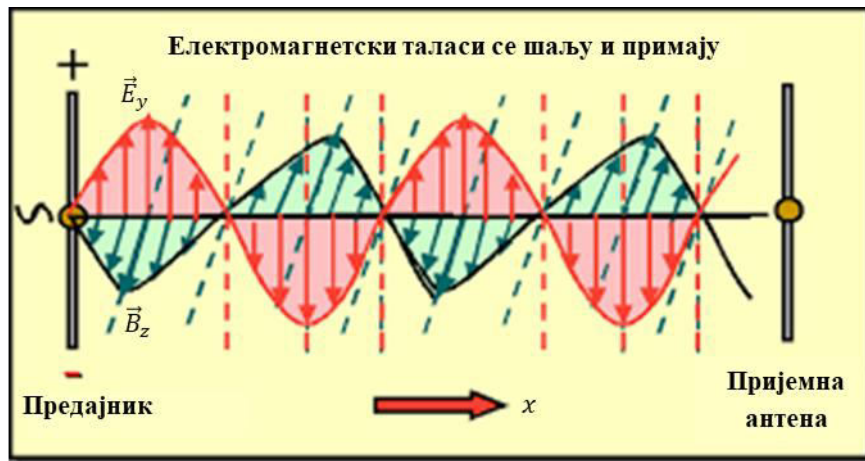


ZBORNİK RADOVA | PROCEEDINGS



1. УВОД

Најбитније тумачење Максвелових једначина јесте да је њима задато да се електромагнетски таласи простиру у одсуству било каквих наелектрисања или струја. Боље речено, у почетку нека временски зависна наелектрисања или струје би могле да буду потребне да се створи електромагнетски талас, али једном створен он наставља да се простира све даље и даље без било каквих додатних наелектрисања или струја [1]. На слици 1. приказан је процес простирања унакрсно повезаног електричног и магнетског поља које представља простирање електромагнетског таласа кроз простор од струјног извора ка пријемној антени.



Слика 1 – Промене електричног поља \vec{E}_y по оси y (означене црвеним стрелицама) и промене магнетског поља \vec{B}_z по оси z (означене зеленим стрелицама) и њихово простирање кроз простор од струјног извора ка пријемној антени по оси x у виду електромагнетског таласа.

Откривање парцијалног пражњења проналажењем ослобођене енергије у облику електромагнетског таласа током парцијалних пражњења коришћењем антене за ултра високе учестаности (UHF антене) један је од метода за одређивање нивоа квалитета изолационог система електроенергетских апарата [2,3]. Главна предност UHF система за откривање парцијалних пражњења помоћу антене је могућност проналажења сигнала парцијалних пражњења без претходног искључивања електроенергетског апарата [4]. Према томе, потребан је систем мерења парцијалних пражњења чији се рад заснива на откривању давачем електромагнетског таласа који је изазван парцијалним пражњењем.

За линеарни, изотропни и хомогени диелектрик таласне једначине за тачкасти извор сферних таласа су [1]:

$$\frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{r} \cdot \nabla^2 \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \frac{1}{r} \cdot \nabla^2 \vec{B} = 0 \quad (2)$$

где су:

\vec{E} – вектор електричног поља,

\vec{B} – вектор магнетског поља,

v – фазна брзина таласа,

r – растојање од тачкастог извора,

t – време.

За фазну брзину таласа у материјалима са релативном пермитивношћу ϵ_r и релативном пермеабилношћу μ_r , добија се:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3)$$

где је c – брзина простирања електромагнетског таласа у вакууму.

Ansys HFSS кодом користи се адаптивно умрежавање, што значи да се поставља почетна мрежа, решава поље, а затим се поново умрежава на основу тога где поља имају високу концентрацију и / или градијент. Сваки корак поновног умрежавања назива се „адаптивни пролаз“. Разлика између свака два адаптивна пролаза је ΔS . Дакле, како би се осигурало да је симулација тачна, Ansys HFSS кодом раде се адаптивни пролази док ΔS не падне испод постављеног прага. Овим кодом решавају се Максвелове једначине у смислу S -матрице која представља проценте пренете или одбијене снаге [5].

Високонапонска изолација је најважнији део опреме високог напона која се користи у електроенергетском систему. Главни задатак електричне изолације је да издржи велико електрично поље између фаза или фазе и неутралног проводника. При претерано великом електричном пољу због појаве места са појачаним пољем као што је гасна шупљина или метално избочење, могу да се јаве парцијална пражњења.

Појава парцијалних пражњења у електричној изолацији може да укаже на старење изолације и дугорочно то може додатно да смањује потпуност изолације, што доводи до квара опреме [6]. Проналажење парцијалних пражњења у раној фази потребно је да се спречи квар опреме високог напона.

Енергетски апарат је углавном у облику металом оклопљене опреме. Ослобођене енергије из парцијалних пражњења, као што су светлост, топлота и електромагнетски талас, онемогућене су да прођу кроз метално кућиште, тако да морају да се проналазе одговарајућим унутрашњим давачем.

Енергетски трансформатор састоји се од различитих материјала који могу бити [7]:

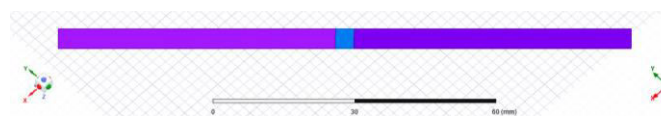
- 1) диелектрични (нпр. минерално уље, уљно-папирна изолација, прешпан),
- 2) електропроводни (нпр. бакар) и
- 3) меки магнетни (нпр. електрични челик).

Активни делови енергетског трансформатора могу да утичу на облик и величину примљених сигнала на УHF давачима, чији је извор парцијално пражњење у изолацији енергетског трансформатора. При томе је слабљење и изобличење сигнала на пријемној УHF антени утолико веће уколико је путања сигнала парцијалних пражњења више изобличена у односу на праву линију која спаја извор парцијалних пражњења и одговарајући УHF давач.

2. ОПИСИ МОДЕЛА ИЗВОРА ПАРЦИЈАЛНИХ ПРАЖЊЕЊА, УHF ДАВАЧА И ЕНЕРГЕТСКОГ ТРАНСФОРМАТОРА

2.1 Модел предајне и пријемне антене

Диполна антена коришћена је у рачунарској симулацији за извор парцијалних пражњења и даваче УHF сигнала приказана је на слици 2. Краци антене су димензија 60 mm x 5 mm и израђени су од бакра.



Слика 2 – Двополна антена димензија 124 mm x 5 mm [8].

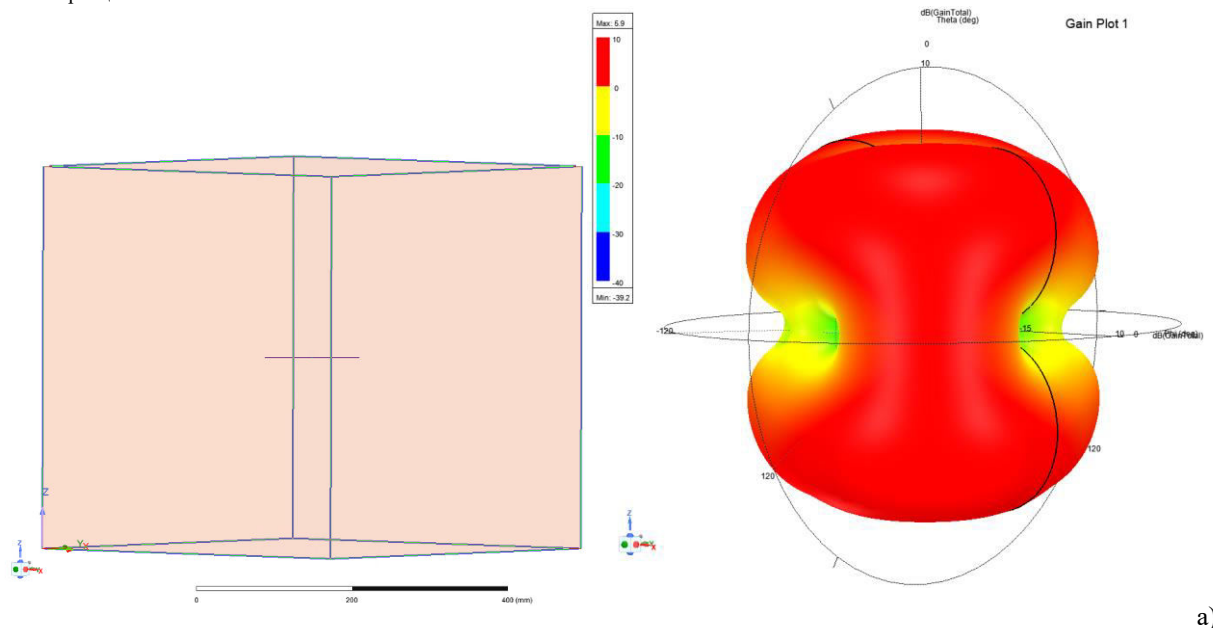
На слици 3а) приказана је разматрана диполна антена чије је зрачење ограничено коцком странице дужине 500 mm ради испитивања укупног добитка антене. Двополна антена је са средишњом тачком у положају [250; 250; 250] mm.

На слици 3б) дат је поларни дијаграм укупног добитка диполне УHF антене изражен у децибелима [dB], при учестаности 1 GHz, за положај антене на слици 3а).

Види се са слике 3б) да предајна диполна антена не зрачи подједнаком снагом зрачења у свим правцима.

У x -у равни у којој се налази УHF антена, по уздужној оси предајне антене, као и $\pm 15^\circ$ у односу на средиште антене, најмањи је интензитет зрачења. Такође, слабији је интензитет зрачења по вертикалној z -оси симетрије антене. Сам тродимензионални дијаграм

зрачења је више коцкаст него лоптаст. Према томе, ни пријемна UHF антена неће имати подједнако добар пријем снаге зрачења по свим правцима.



б)

Слика 3 – а) Двополна UHF антена и коцка за ограничење зрачења окренута за приближно 45° око z-осе у смеру супротном од смера казаљке на сату. б) Поларни дијаграм укупног добитка антене изражен у децибелима [dB] за положај диполне UHF антене на слици 3а) [8].

2.2 Модели енергетског трансформатора (од поједностављеног до најсложенијег)

Разматра се модел малог трофазног енергетског трансформатора снаге 5 MVA, преносног односа 66/11 kV. Дужина трансформаторског суда је 2300 mm, ширина 880 mm, а висина 2800 mm [8].

Разматрани енергетски трансформатор састављен је од делова следећих материјала:

- 1) намотаји високог и ниског напона израђени су од бабра;
- 2) језгро трансформатора израђено је од електричног челика;
- 3) трансформаторски суд израђен је од нерђајућег челика 304 дебљине 8 mm;
- 4) унутрашњост суда трансформатора испуњена је минералним уљем.

Ради поређења и анализе утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора посматраће се примери простирања UHF сигнала од извора парцијалних пражњења до пријемних UHF антена за следеће случајеве:

- 1) за празан трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304 и испуњен трансформаторским минералним уљем;
- 2) за трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304 и испуњен трансформаторским минералним уљем у коме се налази тростубно магнетно језгро трансформатора;
- 3) за једну типичну конструкцију енергетског трансформатора кога чине:
 - трансформаторски суд израђен од нерђајућег челика 304,
 - трансформаторско изолационо минерално уље,
 - тростубно четворостепено (са 7 ступњева) магнетно језгро енергетског трансформатора,
 - трофазни бакарни трансформаторски намотај ниског напона,
 - трофазни бакарни трансформаторски намотај високог напона.

Усвојени положаји (средишњих тачака) пријемних UHF антена су следећи:

D_1 [65; 65; 2750] mm, D_2 [1150; 440; 2758] mm, D_3 [2235; 815; 2755] mm, D_4 [70; 810; 2760] mm.

Трофазни високонапонски и нисконапонски намотаји, због ограничених могућности програма Ansys Electronics Desktop HFSS (high-frequency structure simulator) и рачунара (процесора и радне меморије), морали су да буду упрошћени.

Изолација трофазних намотаја је занемарена и приближно се сматра као да је са диелектричном чврстоћом минералног уља јер је сва папирна изолација намотаја импрегнисана уљем, чиме се диелектрична чврстоћа изолације смањује.

Намотаји ниског напона (НН) и високог напона (ВН) израђени су од по 42 диска одговарајућих величина. Међуизолација између суседних навојака дискова НН и ВН по радијалном правцу, дебљине 1,2 mm, није узета у обзир, сматра се бакром. Сваки диск ВН подељен је на два дела по усправној оси са размаком 1,2 mm, иако би требало да буде састављен из четири дела. Разлог томе су ограничене могућности пре свега радне меморије (за складиштење података који се истовремено обрађују), а затим и процесора (тј. брзине обраде података) у рачунару и на крају самог корисничког програма, јер се модел ВН намотаја вишеструко усложњава у погледу броја његових делова. Занемаривањем два размака од по 1,2 mm слабљење сигнала незнатно је веће. Отвор од 1,2 mm је мали за електромагнетски талас чија је таласна дужина у минералном уљу (диелектричне константе 2,2) једнака 20,23 cm при учестаности таласа од 1 GHz. Услед дифракције таласа на тако малом отвору, снага неког зрака сигнала кроз такав отвор расипа се у разним правцима у односу на сам отвор, тј. снага тог зрака слаби у правцу најкраћег могућег растојања до UHF давача.

Међуизолација између намотаја вишег и нижег напона занемарује се и сматра се као да је са диелектричном чврстоћом минералног уља јер су слојеви прешпанске изолације такође импрегнисани уљем, чиме се диелектрична чврстоћа прешпана смањује.

Претпостављено је да је извор парцијалних пражњења постављен у тачки: $I = [625; 625; 1550] \text{ mm}$. Налази се са предње леве стране 3. стуба језгра, у горњем делу 3. фазе намотаја. Постављен је између намотаја НН и ВН, ближе намотају ВН и то наспрам горњег дела 40. диска намотаја НН и наспрам доњег дела 35. диска намотаја ВН.

Брзина простирања електромагнетских таласа у средини са диелектричном константом 2,2 износи 0,2023 m/ns. Највеће могуће растојање у суду је 3728,86 mm, чему одговара кашњење електромагнетског таласа од 18,644 ns. Међутим, растојања између извора парцијалних пражњења и UHF давача обично су много краћа. Извор парцијалних пражњења обликован је као широкопојасни импулс најмање учестаности 0 Hz, највеће учестаности 1 GHz и амплитуде 1 V.

Да би се одредило место извора парцијалних пражњења [9], неопходно је да се користи расподељени низ од три или више UHF давача ради истовременог снимања сигнала парцијалних пражњења и омогућавања триангулације. Примљени UHF сигнали могу да се обраде за одређивање временске разлике доласка сигнала између њих. Место извора парцијалних пражњења тада може да се одређује из временских разлика пристизања сигнала између UHF давача [10,11].

За четири UHF давача могу да се напишу следеће четири једначине са четири непознате променљиве [9] :

$$v_y \cdot T_1 = \sqrt{(x_I - x_1)^2 + (y_I - y_1)^2 + (z_I - z_1)^2} \quad (4)$$

$$v_y \cdot (T_1 + t_{21}) = \sqrt{(x_I - x_2)^2 + (y_I - y_2)^2 + (z_I - z_2)^2} \quad (5)$$

$$v_y \cdot (T_1 + t_{31}) = \sqrt{(x_I - x_3)^2 + (y_I - y_3)^2 + (z_I - z_3)^2} \quad (6)$$

$$v_y \cdot (T_1 + t_{41}) = \sqrt{(x_I - x_4)^2 + (y_I - y_4)^2 + (z_I - z_4)^2} \quad (7)$$

где су:

$v_y = 20,23 \frac{\text{cm}}{\text{ns}}$ – брзина UHF сигнала у минералном уљу,

x_I, y_I, z_I – координате извора И парцијалних пражњења,

x_k, y_k, z_k – координате UHF давача k ($k = 1, 2, 3, 4$),

T_1 – време приспећа сигнала парцијалних пражњења од извора И до референтног давача D_1 ,

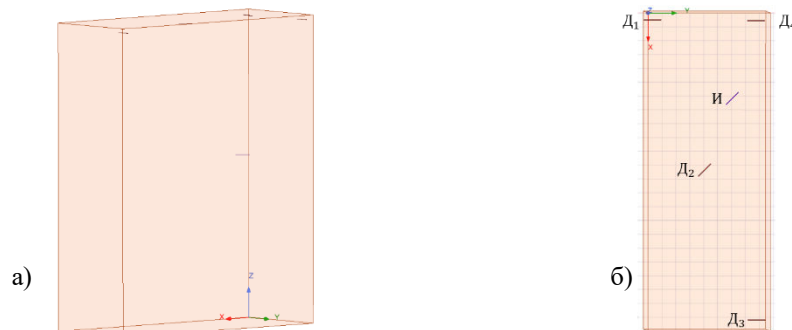
t_{21} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора И до давача D_2 и референтног давача D_1 ,

t_{31} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора И до давача D_3 и референтног давача D_1 ,

t_{41} – разлика између сигнала у временима пристизања од извора И до давача D_4 и референтног давача D_1 .

4. РЕЗУЛТАТИ АНАЛИЗЕ

На слици 4, за положај извора парцијалних пражњења И, приказан је поједностављени модел енергетског трансформатора који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајућим UHF давачима приказани су заједно на слици 5 у различитим бојама.

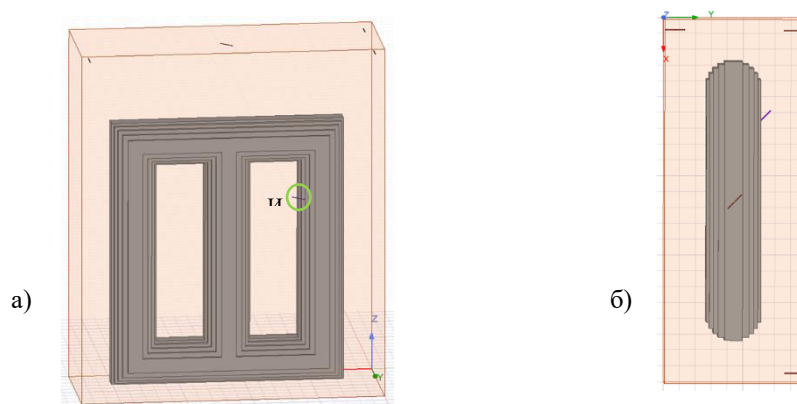


Слика 4 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем. а) Поглед спреда. б) Поглед одозго.

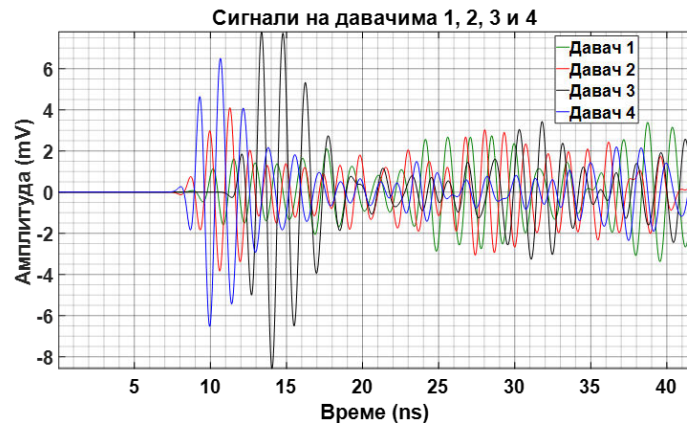


Слика 5 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 у различитим бојама (зеленом на D_1 , црвеном на D_2 , црном на D_3 и плавом на D_4).

На слици 6, за положај извора парцијалних пражњења И, приказан је сложенији модел енергетског трансформатора који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем и тростубног језгра од електричног челика. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на одговарајуће постављеним UHF давачима приказани су заједно на слици 7 у различитим бојама.



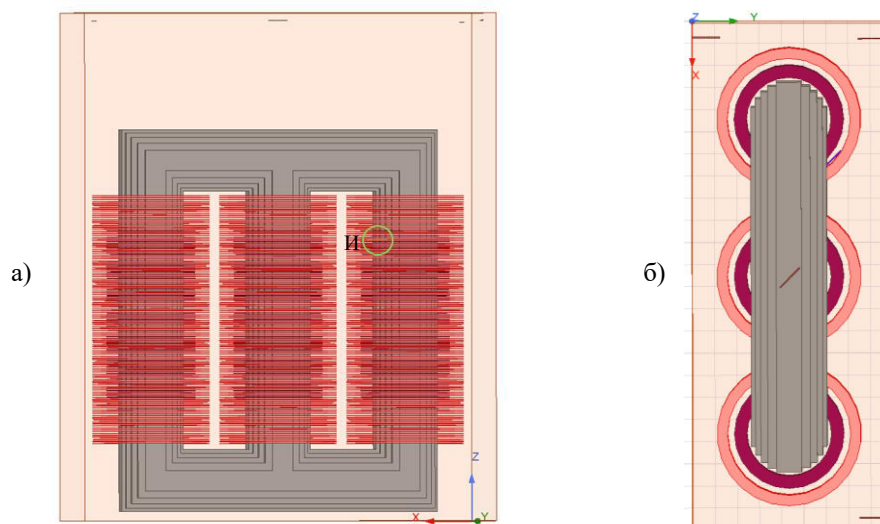
Слика 6 – Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем са тростубним магнетним језгром. а) Поглед спреда. б) Поглед одозго.



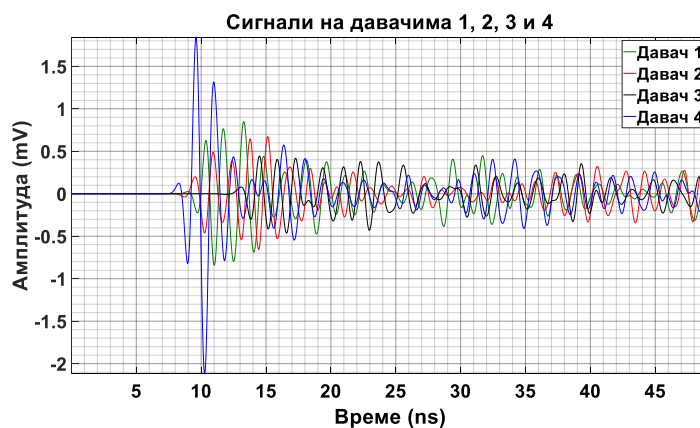
Слика 7 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 са слике 6 у различитим бојама (зеленом на D_1 , црвеном на D_2 , црном на D_3 и плавом на D_4).

На слици 7 примећује се пад у амплитудама (слабљење) снимљених сигнала на UHF давачима 1 и 2 у односу на стање сигнала на слици 5 када нема утицаја тростубног магнетног језгра.

На слици 8, за положај извора парцијалних пражњења И, приказан је уобичајени модел енергетског трансформатора који се састоји из суда од нерђајућег челика 304 испуњеног изолационим минералним уљем, тростубног језгра од електричног челика и трофазних намотаја ниског и високог напона направљених од бакура. Изгледи сигнала парцијалних пражњења на задато постављеним UHF давачима приказани су заједно на слици 9 у различитим бојама.



Слика 8 – Метални суд енергетског трансформатора са тростубним магнетним језгром и трофазним бакарним намотајима који је испуњен минералним уљем. а) Поглед са предње стране. б) Поглед одозго.



Слика 9 – Прикази сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 са слике 8 у различитим бојама (зеленом на D_1 , црвеном на D_2 , црном на D_3 и плавом на D_4).

На слици 9 примећује се нагли пад у амплитудима (слабљење) снимљених сигнала, посебно на UHF давачима 2 и 3, а релативно нешто мањи пад на UHF давачу 4, у односу на стање сигнала на слици 7 када нема утицаја трофазних бакарних намотаја. Са слика 5, 7 и 9 види се како су облици обвојница амплитуда појединих сигнала на UHF давачима различити, услед дејстава дифракције (скретања) око и одбијања од разних металних препрека.

У табели 1 дати су тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 1 – Тренуци појаве првог врха сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 за три примера конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | t_1 [ns] | t_2 [ns] | t_3 [ns] | t_4 [ns] |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| метални суд (α) | 8,55041 | 8,020327 | 11,408224 | 8,066421 |
| +метално језгро (β) | 8,8418 | 8,054746 | 11,403913 | 8,054746 |
| +метални намотаји (γ) | 8,989434 | 8,716391 | 11,950907 | 8,27532 |

Из резултата у табели 1 види се да метално језгро такође скоро не утиче на путање сигнала парцијалних пражњења од извора до UHF давача D_2, D_3 и D_4 , док се до давача D_1 путања сигнала продужава и он касније стиже за 0,29 ns. Трофазни намотаји и тростубно магнетно језгро утичу на кашњење сигнала од (0,21–0,7) ns, зависно од положаја UHF давача у односу на стање када је метални суд енергетског трансформатора празан. Највеће кашњење је за давач 2, а најмање за давач 4, 0,54 ns за давач 3 и 0,44 ns за давач 1.

У табели 2 приказане су разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора.

Табела 2 – Израчунате разлике у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 за теоријски случај и три примера конструкције енергетског трансформатора. Давач D_1 узет је за референтни давач.

| Конструкција | dt_{21} [s] | dt_{31} [s] | dt_{41} [s] |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| идеални случај (ζ) | -5,324614E-10 | 2,878378E-09 | -4,636155E-10 |
| +метални суд (α) | -5,300791E-10 | 2,857818E-09 | -4,839853E-10 |
| +метално језгро (β) | -7,870542E-10 | 2,562113E-09 | -7,870542E-10 |
| +метални намотаји (γ) | -2,730436E-10 | 2,9614720E-09 | -7,141139E-10 |

У табели 3. дата су узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за три разматрана симулирана случаја у односу на теоријски – савршени случај. Давач D_1 узет је за референтни давач.

Табела 3 – Узајамна одступања разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на давачима 1–4 и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматрана три опонашана случаја у односу на идеални (теоријски) случај.

| Одступања разлика у временима приспећа | $D_2 - D_1$ | $D_3 - D_1$ | $D_4 - D_1$ |
|--|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s] | 2,382254E-12 | -2,056027E-11 | -2,036976E-11 |
| $ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s] | 1,443743E-11 | | |
| $\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s] | -2,545928E-10 | -3,162654E-10 | -3,234387E-10 |
| $ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s] | 2,98099E-10 | | |
| $\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s] | 2,594178E-10 | 8,309441E-11 | -2,504984E-10 |
| $ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s] | 1,976702E-10 | | |

Средње одступање апсолутних вредности разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 у односу на идеални случај највеће је у 2. симулираном случају, а најмање у 1. симулираном случају.

У табели 4 приказани су израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера симулиране конструкције енергетског трансформатора.

У табели 5 дата су узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења и средња вредност њихових апсолутних вредности за три разматрана симулирана случаја у односу на теоријски – савршени случај.

Табела 4 – Израчунати положаји извора парцијалних пражњења за теоријски случај и три примера опонашане конструкције енергетског трансформатора.

| Конструкција | x [m] | y [m] | z [m] |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| идеални случај (ζ) | 6,25E-01 | 6,25E-01 | 1,55E+00 |
| +метални суд (α) | 6,225129E-01 | 6,341728E-01 | 1,538712E+00 |
| +метално језгро (β) | 6,463912E-01 | 7,373285E-01 | 1,629467E+00 |
| +метални намотаји (γ) | 5,261988E-01 | 7,465691E-01 | 1,391993E+00 |

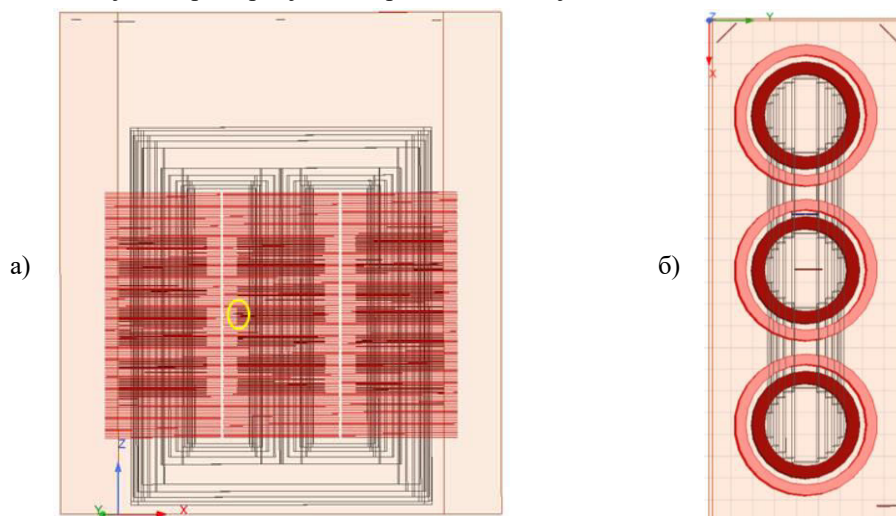
Табела 5 – Узајамна одступања у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења по осама и средња вредност њихових апсолутних вредности за разматрана три опонашана случаја у односу на идеални случај.

| Одступања у израчунатим положајима | x | y | z |
|-------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| $\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm] | -2,487127E-01 | 9,172777E-01 | -1,128776E+00 |
| $ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm] | 7,649222E-01 | | |
| $\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm] | 2,139119E+00 | 1,123285E+01 | 7,946674E+00 |
| $ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm] | 7,106215E+00 | | |
| $\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm] | -9,880121E+00 | 1,215691E+01 | -1,580071E+01 |
| $ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm] | 1,261258E+01 | | |

Средње одступање апсолутних вредности у израчунатим положајима извора парцијалних пражњења у односу на савршени случај највеће је у 3. симулираном случају, а најмање у 1. симулираном случају.

4. ДИСКУСИЈА

У чланку [8], био је разматран положај извора парцијалних пражњења, као на слици 10., који се, гледано са задње стране, налазио са леве стране средњег стуба језгра од електричног челика испод јарма, у средњем делу 2. фазе трофазних бакарних намотаја. Био је постављен између намотаја ниског напона и високог напона, ближе намотају ниског напона, и то наспрам 22. диска намотаја ниског напона и наспрам доњег дела 22. диска намотаја високог напона. У том случају, као и за задати распоред UHF давача, средња вредност апсолутних вредности одступања положаја извора парцијалних пражњења у односу на стварни положај била је највећа када су узети у обзир метални суд и тростубно језгро енергетског трансформатора и износила је 11,3 cm. Када су и трофазни намотаји били узети у обзир средња вредност апсолутних вредности одступања положаја извора парцијалних пражњења била је 8,2 cm. Када је разматран само метални суд енергетског трансформатора, средња вредност апсолутних вредности одступања положаја извора парцијалних пражњења била је 1,74 cm.



Слика 10. – Сложени модел из чланка [8]: Суд енергетског трансформатора испуњен минералним уљем са тростубним језгром и трофазним намотајима. а) Поглед са задње стране. б) Поглед одозго [8].

У односу на пример у чланку [8], у примеру у овом раду средње одступање апсолутних вредности разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења на UHF давачима 1–4 у односу на идеални случај веће је за 0,136 ns и 0,121 ns, респективно, при утицајима металног језгра и металног језгра и намотаја заједно на путање простирања сигнала од извора до UHF давача.

Може да се закључи да је у случају описаном у чланку [8] утицај магнетног језгра на одређивање места извора парцијалних пражњења био већи него утицај магнетног језгра и намотаја заједно, тј. супротно него у примеру приказаном у овом раду, мада је у оба случаја трофазни намотај додатно утицао на кашњења UHF сигнала од извора парцијалних пражњења до појединих UHF давача у одговарајућој мањој или већој мери зависно од величине и броја металних препрека. Величине и међусобни односи разлика у временима пристизања сигнала парцијалних пражњења до UHF давача могу да утичу на величине и односе добијених резултата за положаје извора парцијалних пражњења при утврђивању утицаја магнетног језгра и магнетног језгра и бакарних намотаја заједно.

5. ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада био је да се изврши анализа утицаја стварне конструкције енергетског трансформатора на простирање електромагнетских UHF таласа из извора парцијалних пражњења у електричној изолацији у суду енергетског трансформатора од места њиховог настајања до пријемних UHF антена.

Помоћу симулација у HFSS-у омогућени су сликовити прикази примљених сигнала, обухваћене су све рефлексије и дифракције сигнала на путу од извора до UHF давача. Недостатак је што извор парцијалних пражњења није тачкаст, тј. не зрачи подједнаком снагом зрачења у свим могућим правцима од извора.

Разматран је положај извора парцијалних пражњења који се гледано спреда налази са предње леве стране 3. стуба магнетног језгра, у горњем делу 3. фазе намотаја. Постављен је између бакарних намотаја НН и ВН, ближе намотају ВН и то наспрам горњег дела 40. диска намотаја НН и наспрам доњег дела 35. диска намотаја ВН. У овом случају, као и за задати распоред UHF давача, средња вредност апсолутних вредности одступања положаја извора парцијалних пражњења у односу на стварни положај најмања је када се узму у обзир метални суд и тростубно магнетно језгро енергетског трансформатора и износи 7,11 cm, иако је продужена путања сигнаlima у односу на случај са празним челичним судом. Када се и трофазни намотаји узму у обзир, средња вредност апсолутних вредности одступања положаја извора парцијалних пражњења највећа је и износи 12,61 cm. Када се разматра само челични суд енергетског трансформатора, средња вредност апсолутних вредности одступања положаја извора парцијалних пражњења најмања је тј. 0,76 cm.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fleisch D. A Student's Guide to Maxwell's Equations (Student's Guides), 2008, Cambridge University Press; 1st edition, 134 pages, UK.
- [2] Дуканац, Ђ. Откривање и анализа сигнала парцијалних пражњења у енергетском трансформатору UHF методом, 2020, Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара, број 1–2, година XXII, стране 96–101. <https://doi.org/10.46793/EEEE20-1-2.096D>
- [3] Dukanaц, D. Analysis of partial discharge signal detected by the UHF sensor in the power transformer, 2021, 3rd CIGRE SEERC Online-Conference Vienna 2021: Cooperation - Sustainability - Future, paper no. 1189, pp. 1–9, Vienna, Austria. <https://e-cigre.org/publication/collaut2021-seerc-colloquium-2021>
- [4] Roslizan, N. D., Rohani, M. N. K. H., Rosmi, A. S., Ismail, B., Jamlos, M. A., Leong, W. C., Isa, C. M. N. C., Jalil, M. A. A. Comparison Study of UHF Sensor Modelling Based on 4th Order Hilbert Fractal Category for Partial Discharge Detection in Power Transformer, 2020, Systems Process and Control (ICSPC) 2020 IEEE 8th Conference on, pp. 196–201, Melaka, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ICSPC50992.2020.9305753>
- [5] Electronic design automation software, user's guide – High Frequency Structure Simulator, 2005, ANSOFT CORPORATION, 225 West Station Square Dr. Suite 200, Pittsburgh, PA 15219-1119. <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>
- [6] Thivyanathan, V. A., Ker, P. J., Leong, Y. S., Abdullah, F., Ismail, A., Jamaludin, Md. Z. Power transformer insulation system: A review on the reactions fault detection challenges and future prospects, 2022, Alexandria Engineering Journal, vol. 61, issue 10, pp. 7697–7713. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.026>
- [7] Heathcote M. J. The J & P Transformer Book, 1998, Twelfth edition, Newnes, 976 pages, England. http://www.myprotectionguide.com/uploads/7/3/0/1/73017921/the_j_p_transformer_book_12e.pdf
- [8] Дуканац, Ђ. Анализа утицаја активних делова енергетског трансформатора на простирање сигнала од извора парцијалних пражњења ка UHF давачима, 2022, 37. Међународна конференција ЕНЕРГЕТИКА 2022, Златибор, Србија.

- [9] Dukanac, D. Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume: 25, issue: 6, pp. 2266–2278, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006996>
- [10] Дуканац, Ђ. Лоцирање парцијалних пражњења у енергетском трансформатору применом UHF технике, Енергија, економија, екологија, Лист савеза енергетичара, број 2, година XXIII, стране 73–78, јун 2021., ISSN 0354-8651. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.73D>
- [11] Дуканац, Ђ. Примена UHF давача за одређивање места парцијалних пражњења у енергетском трансформатору, Зборник радова са међународне конференције „Energy and Ecology Industry“, стране 214–221, Београд, 10–13. октобар 2018., ISBN: 978-86-7466-751-4 (AM).