

# Analiza uticaja aktivnih delova energetskog transformatora na prostiranje signala od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima

## Analysis of the Influence of Active Parts of the Power Transformer on the Propagation of Signals from Source of Partial Discharges to UHF Sensors

Đorđe Dukanac

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd

**Rezime** - Parcijalna pražnjenja uzrokovana početnim slabostima u izolacionom sistemu energetskog transformatora ne mogu potpuno da se zanemare, jer mogu unapred da upozore na moguće ozbiljne nedostatke, koji bi u najgorim slučajevima mogli da uzrokuju nepovratni kvar energetskog transformatora. Nadziranjem signala parcijalnih pražnjenja primenom UHF davača pri radu energetskog transformatora u pogonu omogućuje se njihova obrada u cilju utvrđivanja glavnih osobina snimljenih signala parcijalnih pražnjenja (npr. visine amplitude, učestalosti ponavljanja, frekventnog opsega) radi predupređenja kvara energetskog transformatora. Pomoću simulacija u ANSYS HFSS-u, u ovom radu se istražuju talasni oblici i kašnjenja UHF elektromagnetskih signala na UHF davačima montiranim na različitim mestima suda malog energetskog transformatora. Elektromagnetski talasi se odašilju od strane posebno oblikovanog modela izvora parcijalnih pražnjenja u izolaciji energetskog transformatora. Vršu se puno-talasne elektromagnetske simulacije na modelu malog energetskog transformatora konstrukcije tipa jezgra. Uračunava se dejstvo odbijanja elektromagnetskih UHF talasa od zidova suda, zatim skretanje talasa oko i odbijanje talasa od elemenata trofaznog magnetnog jezgra i trofaznih primarnih i sekundarnih namotaja. Simulacija se zasniva na metodi konačnih elemenata. To je numerička metoda koja se primenjuje na diferencijalne jednačine sa graničnim vrednostima radi dobijanja približnog rešenja. Izvor i prijemni davači u računarskoj simulaciji oblikovani su predajnom i prijemnim UHF antenama, respektivno. Biće opisane prednosti i mane ove računarske simulacije.

**Ključne reči** - energetski transformator, parcijalna pražnjenja, prostiranje signala, UHF davač, UHF signal

**Abstract** - Partial discharges caused by initial weaknesses in the insulation system of the power transformer cannot be completely ignored, because they can warn in advance of possible serious deficiencies, which in the worst cases could cause irreversible failure of the power transformer. Monitoring of partial discharge signals using UHF sensors during power transformer operation enables their processing in order to determine the main properties

of recorded partial discharge signals (e.g. amplitude, repetition rate, frequency range) to prevent power transformer failure. Using simulations in ANSYS HFSS, this paper investigates the waveforms and delays of UHF electromagnetic signals on UHF sensors mounted at different locations of a small power transformer tank. Electromagnetic waves are emitted by a specially designed model of the source of partial discharges in the insulation of the power transformer. Full-wave electromagnetic simulations are performed on the model of a small power transformer of core construction. The effect of reflections of electromagnetic UHF waves from the walls of the tank is taken into account, then the diffractions of waves around and the reflections of waves from the elements of the three-phase magnetic core and three-phase primary and secondary windings. The simulation is based on finite element method. It is a numerical method that is applied to differential equations with limit values in order to obtain an approximate solution. The source and receiver sensors in the computer simulation are designed with transmitting and receiving UHF antennas, respectively. The advantages and disadvantages of this computer simulation will be described.

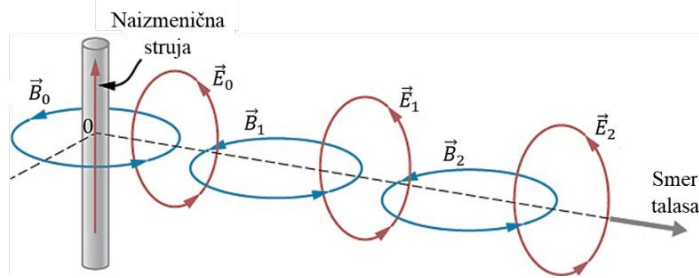
**Index Terms** - Power transformer, Partial discharges, Signal propagation, UHF sensor, UHF signal

### I UVOD

Najbitnije tumačenje Maksvelovih jednačina jeste da je njima zadato da se elektromagnetski talasi prostiru u odsustvu bilo kakvih naelektrisanja ili struja. Bolje rečeno, u početku neka vremenski zavisna naelektrisanja ili struje bi mogle da budu potrebne da se stvori elektromagnetski talas, ali jednom stvoren on nastavlja da se prostire sve dalje i dalje bez bilo kakvih dodatnih naelektrisanja ili struja. Na slici 1. prikazan je proces prostiranja unakrsno povezanog električnog i magnetskog polja koje predstavlja prostiranje elektromagnetskog talasa kroz prostor od strujnog izvora.

Otkrivanje parcijalnog pražnjenja pronalaženjem oslobodene energije u obliku elektromagnetskog talasa tokom parcijalnih

pražnjenja korišćenjem antene za ultra visoke učestanosti (UHF antene) jedan je od metoda za određivanje visine kvaliteta izolacionog sistema elektroenergetskih aparata [1,2].



**Slika 1.** - Prostiranje promena električnog  $\vec{E}$  i magnetskog  $\vec{B}$  polja kroz prostor od strujnog izvora.

Glavna prednost UHF sistema za otkrivanje parcijalnih pražnjenja pomoću antene je mogućnost pronalaženja signala parcijalnih pražnjenja bez prethodnog isključivanja elektroenergetskog aparata [3]. Prema tome, potreban je sistem merenja parcijalnih pražnjenja koji se zasniva na elektromagnetskom talasu koji je izazvan parcijalnim pražnjenjem i otkriven UHF davačem.

Za linearni, izotropni i homogeni dielektrik talasne jednačine za tačkasti izvor sfernih talasa su:

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

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

gde su:

$\vec{E}$  - vektor električnog polja,

$\vec{B}$  - vektor magnetskog polja,

$v$  - fazna brzina talasa,

$r$  - rastojanje od tačkastog izvora,

$t$  - vreme.

Za faznu brzinu talasa u materijalima sa relativnom permitivnošću  $\epsilon_r$  i relativnom permeabilnošću  $\mu_r$ , dobija se:

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

gde je  $c$  - brzina prostiranja elektromagnetskog talasa u vakuumu.

## II PROSTIRANJE ELEKTROMAGNETSKOG TALASA U DIELEKTRIČNOJ SREDINI I PARCIJALNA PRAŽNENJA

Dielektrik sa gubicima može da se objasni kao sredina gde se neki deo snage elektromagnetskog talasa gubi kako se talas prostire. Ovaj gubitak snage potiče zbog loše provodljivosti.

Dielektrik sa gubicima može da se opiše parametrima provodljivosti  $\sigma \neq 0$ , permeabilnosti  $\mu$  i permitivnosti  $\epsilon$ .

Konstanta slabljenja ( $\alpha$ ) je mera prostorne brzine opadanja elektromagnetskog talasa u datoj sredini, merena u decibelima po metru (dB/m). U pogledu osobina dielektričnih materijala, konstanta slabljenja može da se zada kao:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left[ \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right]^2} - 1 \right] \quad (4)$$

gde je  $\omega$  - kružna učestanost.

Može da se pokaže da kako se talas prostire kroz dielektrik sa gubicima duž z-pravca, amplituda (električnog i magnetskog polja) talasa je oslabljena sa činiocem  $e^{-\alpha z}$  i zato se  $\alpha$  naziva konstanta slabljenja, ili faktor slabljenja sredine.

Visokonaponska izolacija je najvažniji deo opreme visokog napona koja se koristi u elektroenergetskom sistemu. Glavni zadatak električne izolacije je da izdrži veliko električno polje između faza ili faze i neutralnog provodnika. Pri preterano velikom električnom polju zbog pojave mesta sa pojačanim poljem kao što je šupljina ispunjena gasom ili metalno izbočenje, mogu da se jave parcijalna pražnjenja.

Pojava parcijalnih pražnjenja u električnoj izolaciji može da ukaže na starenje izolacije i dugoročno to može dodatno da smanjuje potpunost izolacije što dovodi do kvara opreme [4]. Pronalaženje parcijalnih pražnjenja u ranoj fazi potrebno je da se spreči kvar opreme visokog napona.

Kada postoje parcijalna pražnjenja, elektromagnetski talasi se emituju radijalno iz izvora parcijalnih pražnjenja i UHF davači su u stanju da ih adekvatno prime. Prostiranje UHF signala predstavlja veoma brz proces.

U odnosu na vakuum, brzina talasa opada prema jednačini (3). Brzina UHF elektromagnetskih talasa parcijalnih pražnjenja u mineralnom ulju sa dielektričnom permitivnošću 2,2 je  $20,23 \frac{cm}{ns}$ .

## III OSOBINE PROSTIRANJA UHF TALASA PARCIJALNIH PRAŽNENJA U ENERGETSKOM TRANSFORMATORU

Energetski aparat je uglavnom u obliku metalom oklopljene opreme. Oslobođene energije iz parcijalnih pražnjenja, kao što su svetlost, toplota i elektromagnetski talas, onemogućene su da prođu kroz metalno kućište, tako da moraju da se pronalaze unutrašnjim davačem.

Na snimljeni signal na UHF davaču utiče sledeće:

- Poseban tip, jačina i položaj izvora parcijalnih pražnjenja;
- Frekvencijski odziv, mesto ugradnje, osetljivost i dijagram odavanja i prijema zračenja UHF davača;
- Odgovarajući put prostiranja UHF talasa između izvora parcijalnih pražnjenja i UHF davača, koji je obično određen unutrašnjom strukturom energetskog transformatora;
- Osetljivost mernog uređaja.

Energetski transformator se sastoji od različitih materijala koji mogu da budu:

- 1) dielektrični (npr. mineralno ulje, uljno-papirna izolacija, prešpan),
- 2) elektroprovodni (npr. bakar) i
- 3) meki magnetni (npr. električni čelik).

Aktivni delovi energetskog transformatora mogu da utiču na oblik i veličinu primljenih signala na UHF davačima čije je izvor parcijalno pražnjenje u izolaciji energetskog transformatora. Pri tome je slabljenje i izobličenje utoliko veće ukoliko je putanja signala parcijalnih pražnjenja više izobličena u odnosu na pravu liniju koja spaja izvor i odgovarajući UHF davač.

Slabljenje signala potiče od gubitka energije signala prilikom odbijanja od metalnih aktivnih delova transformatorskog jezgra i namotaja visokog i niskog napona. Pri svakom nailasku na bilo kakvu metalnu prepreku deo signala će da se odbije, a ostali deo će da nastavi prostriranje difrakcijom (skretanjem) talasa oko prepreka.

Da je u ovom radu u simulaciji uzeta u obzir i uljno-papirna izolacija namotaja visokog i niskog napona i medjuizolacija od prešpana javilo bi se i neko dodatno slabljenje i prelamanje na granicama ulje - papirno-uljna izolacija i papirno-uljna izolacija - ulje ili ulje - prešpan i prešpan - ulje.

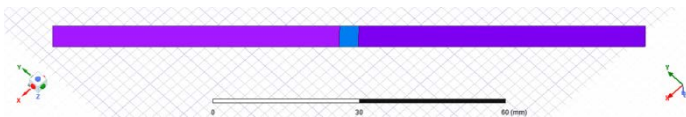
Iako UHF izvor parcijalnih pražnjenja zrači energiju u skoro svim pravcima, neki deo fronta elektromagnetskog talasa će da prati najkraći, najneposredniji put između izvora parcijalnih pražnjenja i prijemne UHF antene. Pošto ulje i papir imaju skoro iste dielektrične parametre, posebno permitivnost, kombinacija ulja i papira jedva da utiče na prostiranje UHF talasa. Zbog umereno oslabljenog prostiranja UHF talasa u sudu transformatora, otkrivanje elektromagnetskih talasa je veoma osetljivo [5].

Na slabljenje UHF signala u energetskom transformatoru uglavnom utiče rastojanje između UHF izvora i UHF davača. Slabljenje UHF signala zasnovano na rastojanju ima male promene, između (0,5 - 2,5) dB/m [6]. Može da se pretpostavi prosečno slabljenje UHF signala po metru od 2 dB/m [6,7].

Pored toga, signali se višestruko odbijaju od zidova suda i aktivnih delova transformatora dok se njihova energija ne potroši. Zato je razumevanje osobina prostiranja signala u transformatorima ključno za poboljšanje tačnosti određivanja mesta izvora parcijalnih pražnjenja [8]. Refleksije mogu da izobliče (smanje) prve vrhove signala i to utoliko pre ukoliko su metalni delovi transformatora bliži predajnoj anteni.

#### IV MODEL PREDAJNIKA I PRIJEMNIKA

Na slici 2. predstavljena je dipolna UHF antenna korišćena u računarskoj simulaciji u HFSS-u za izvor parcijalnih pražnjenja i davače UHF signala. Kraci ove UHF antene su dimenzija 60 mm x 5 mm i izrađeni su od bakra.

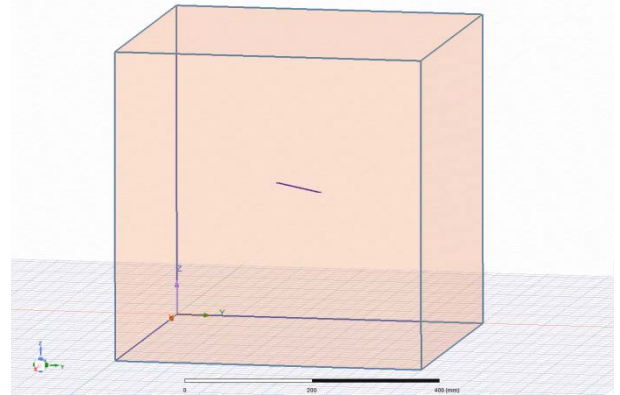


**Slika 2.** Dvopolna UHF antenna dimenzija 124 mm x 5 mm

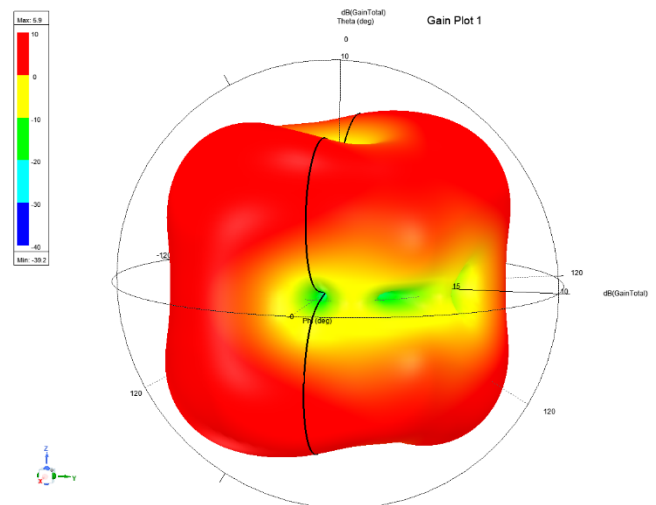
Na slici 3. prikazana je razmatrana dvopolna UHF antenna čije je zračenje ograničeno kockom stranica dužine 500 mm radi ispitivanja ukupnog dobitka antene. Dvopolna UHF antenna je u položaju [250 250 250] mm, za 45° okrenuta u xy-ravni u odnosu na y-osu u smeru kazaljke na satu.

Na slici 4 prikazan je polarni dijagram ukupnog dobitka dvopolne UHF antene, izražen u decibelima [dB] pri učestanosti 1 GHz, za položaj UHF antene na slici 3.

Sa slike 4. vidi se da dipolna antenna ne zrači podjednakom snagom zračenja u svim pravcima.



**Slika 3.** - Dvopolna UHF antenna čije je zračenje ograničeno kockom stranica dužine 500 mm radi ispitivanja ukupnog dobitka UHF antene.



**Slika 4.** Polarni dijagram ukupnog dobitka UHF antene, izražen u decibelima [dB], za položaj dipolne UHF antene na slici 3.

#### V OPIS KORIŠĆENIH MODELA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Razmatra se model malog trofaznog energetskog transformatora naznačene prividne snage 5 MVA i prenosnog odnosa 66/11 kV. Dužina transformatorskog suda je 2300 mm, širina 880 mm, a visina 2800 mm.

Radi poređenja i analize uticaja stvarne konstrukcije energetskog transformatora posmatraće se primeri prostiranja UHF signala od izvora parcijalnih pražnjenja (predajne dvopolne UHF antene) do četiri prijemne dvopolne UHF antene za sledeće modele energetskog transformatora korišćene u simulaciji:

- 1) za prazan transformatorski sud izrađen od nerđajućeg čelika 304 debljine 8 mm i ispunjen transformatorskim mineralnim uljem;

- 2) za transformatorski sud izrađen od nerđajućeg čelika 304 ispunjen transformatorskim mineralnim uljem u kome se nalazi trostubno četvorostepeno magnetno jezgro transformatora izrađeno od električnog čelika;
- 3) za jednu tipičnu konstrukciju energetskog transformatora koga čine:
  - transformatorski sud izrađen od nerđajućeg čelika 304;
  - transformatorsko izolaciono mineralno ulje;
  - trostubno četvorostepeno (sa 7 stupnjeva) jezgro energetskog transformatora izrađeno od električnog čelika;
  - trofazni bakarni transformatorski namotaji niskog i visokog napona.

Usvojeni položaji (središnjih tačaka) prijemnih antena su sledeći:

$$D_1 [65; 65; 2750] \text{ mm}, D_2 [1150; 440; 2758] \text{ mm},$$

$$D_3 [2235; 815; 2755] \text{ mm}, D_4 [70; 810; 2760] \text{ mm}.$$

Zbog ograničenih mogućnosti programa ANSYS Electronics Desktop HFSS (high-frequency structure simulator) i računara (procesora i radne memorije), trofazni visokonaponski i niskonaponski namotaji morali su da budu uprošćeni.

Izolacija trofaznih namotaja je zanemarena i približno se smatra kao da je sa dielektričnom čvrstoćom ulja jer je sva papirna izolacija namotaja impregnisana uljem, čime se dielektrična čvrstoća izolacije smanjuje. Međuizolacija između namotaja višeg i nižeg napona zanemaruje se i smatra se kao da je sa dielektričnom čvrstoćom ulja jer su slojevi prešpanske izolacije takođe impregnisani uljem, čime se dielektrična čvrstoća prešpana smanjuje.

Namotaji niskog napona (NN) i visokog napona (VN) izrađeni su od po 42 diska odgovarajućih veličina. Međuizolacija između susednih 10 navojaka diskova NN i 15 navojaka diskova VN po radijalnom pravcu, debljine 1,2 mm, nije uzeta u obzir tj. smatra se bakrom. Svaki disk visokog napona podeljen je na dva dela po uspravnoj osi sa razmakom 1,2 mm, mada bi trebalo da ima 4 dela.

Pretpostavljeno je da je izvor parcijalnih pražnjenja postavljen u tački:  $I = [893,5 \ 435 \ 1118]$  mm. Nalazi se sa desne prednje strane srednjeg stuba jezgra, u srednjem delu 2. faze namotaja. Postavljen je između namotaja NN i VN, bliže namotaju NN, i to naspram 22. diska namotaja NN i naspram donjeg dela 22. diska namotaja VN. Najveće moguće rastojanje u sudu je 3728,86 mm, čemu odgovara kašnjenje elektromagnetskog talasa od 18,644 ns. Rastojanja između UHF izvora i UHF davača obično su kraća.

Izvor parcijalnih pražnjenja je širokopojasni impuls najmanje učestanosti 0 Hz a najveće učestanosti 1 GHz, amplitude 1 V.

Da bi se odredilo mesto izvora parcijalnih pražnjenja [9], neophodno je da se koristi raspodeljeni niz od tri ili više UHF davača radi istovremenog prijema signala parcijalnih pražnjenja i omogućavanja triangulacije. Snimljeni UHF signali sa UHF davača mogu da se obrade za određivanje vremenskih razlika dolaska signala između njih. Mesto izvora parcijalnih

pražnjenja tada može da se određuje iz tih vremenskih razlika pristizanja signala između davača [10,11].

Za četiri UHF davača mogu da se napišu sledeće četiri jednačine sa četiri nepoznate promenljive:

$$v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_I - x_1)^2 + (y_I - y_1)^2 + (z_I - z_1)^2} \quad (5)$$

$$v_u \cdot (T_1 + t_{21}) = \sqrt{(x_I - x_2)^2 + (y_I - y_2)^2 + (z_I - z_2)^2} \quad (6)$$

$$v_u \cdot (T_1 + t_{31}) = \sqrt{(x_I - x_3)^2 + (y_I - y_3)^2 + (z_I - z_3)^2} \quad (7)$$

$$v_u \cdot (T_1 + t_{41}) = \sqrt{(x_I - x_4)^2 + (y_I - y_4)^2 + (z_I - z_4)^2} \quad (8)$$

gde su:

$v_u = 20,23 \frac{cm}{ns}$  – brzina UHF signala u mineralnom ulju,

$x_I, y_I, z_I$  – koordinate izvora  $I$  parcijalnih pražnjenja,

$x_k, y_k, z_k$  – koordinate UHF davača  $k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ),

$T_1$  – vreme prispeća signala parcijalnih pražnjenja od izvora  $I$  do referentnog davača  $D_1$ ,

$t_{21}$  – razlika između signala u vremenima pristizanja od izvora  $I$  do davača  $D_2$  i referentnog davača  $D_1$ ,

$t_{31}$  – razlika između signala u vremenima pristizanja od izvora  $I$  do davača  $D_3$  i referentnog davača  $D_1$ ,

$t_{41}$  – razlika između signala u vremenima pristizanja od izvora  $I$  do davača  $D_4$  i referentnog davača  $D_1$ .

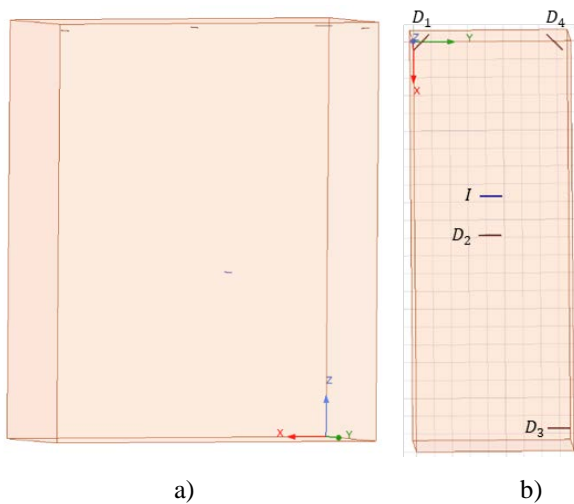
## VI REZULTATI SIMULACIJE

ANSYS HFSS kodom koristi se adaptivno umrežavanje, što znači da se postavlja početna mreža, rešava polje, a zatim se ponovo umrežava na osnovu toga gde polja imaju visoku koncentraciju i/ili gradijent. Svaki korak ponovnog umrežavanja naziva se „adaptivni prolaz“. Razlika između svaka dva adaptivna prolaza je  $\Delta S$ . Dakle, kako bi se osiguralo da je simulacija tačna, ANSYS HFSS kodom rade se adaptivni prolazi dok  $\Delta S$  ne padne ispod postavljenog praga. Ovim kodom rešavaju se Maksvelove jednačine u smislu S-matrice koja predstavlja procenete prenete ili odbijene snage.

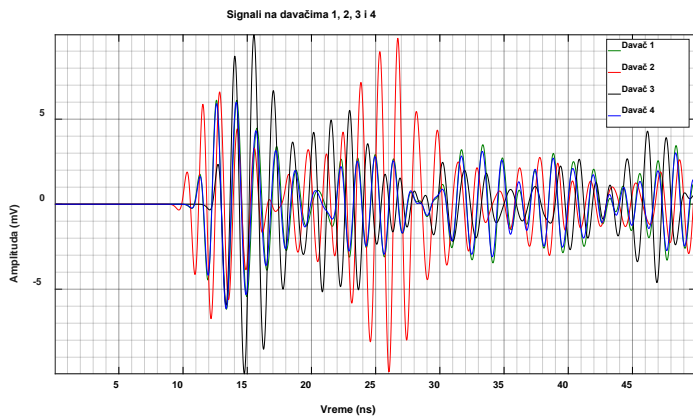
Na slici 5., za položaj izvora parcijalnih pražnjenja  $I$ , prikazan je pojednostavljeni model energetskog transformatora koji se sastoji iz suda od nerđajućeg čelika 304 ispunjenog izolacionim mineralnim uljem. Na slici 6. prikazani su u različitim bojama signali parcijalnih pražnjenja na odgovarajuće postavljanim UHF davačima na slici 5. Na slici 7., za položaj izvora parcijalnih pražnjenja  $I$ , prikazan je složeniji model energetskog transformatora koji se sastoji iz suda od nerđajućeg čelika 304 ispunjenog izolacionim mineralnim uljem i trostubnog jezgra od električnog čelika. Na slici 8. prikazani su u različitim bojama signali parcijalnih pražnjenja na odgovarajuće postavljanim UHF davačima na slici 7.

Na slici 8. primećuje se pad u amplitudama (slabljenje) snimljenih signala na UHF davačima u odnosu na stanje signala na slici 6. kada nema uticaja trostubnog jezgra. Na slici 9., za položaj izvora parcijalnih pražnjenja  $I$ , prikazan je tipični složeni model energetskog transformatora koji se sastoji iz suda od nerđajućeg čelika 304 ispunjenog izolacionim mineralnim uljem,

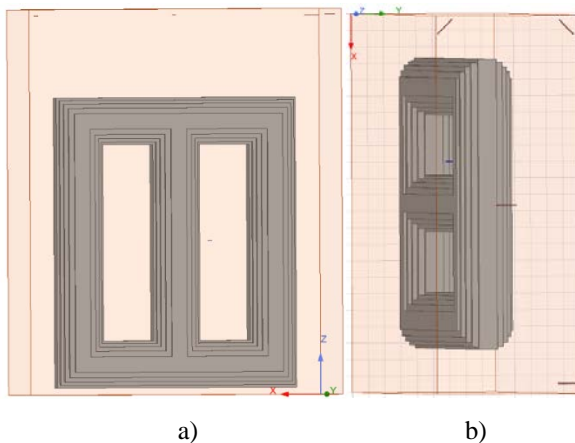
trostubnog jezgra od električnog čelika i trofaznih namotaja niskog i visokog napona napravljenih od bakra.



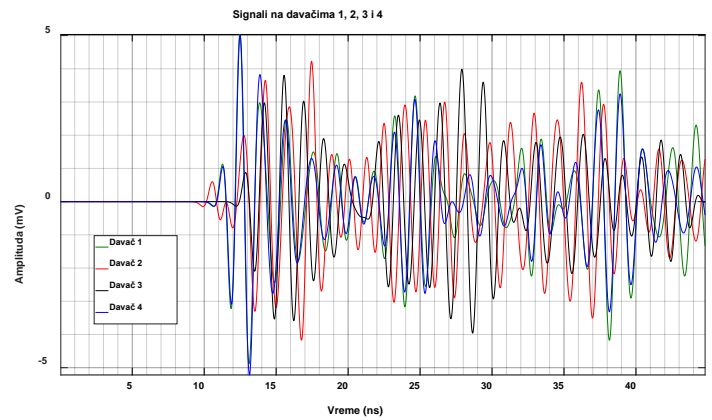
**Slika 5.** Uprošćeni model: Sud energetskog transformatora ispunjen mineralnim uljem. a) Pogled spreda. b) Pogled odozgo.



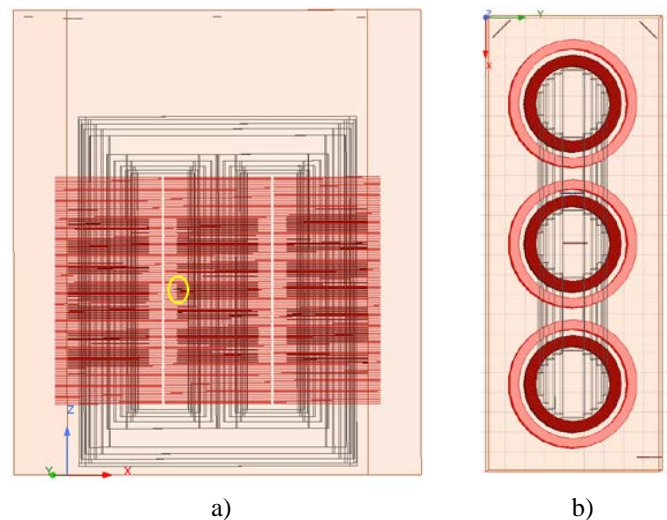
**Slika 6.** Prikazi signala parcijalnih pražnjenja na UHF davacima 1-4 sa slike 5. u različitim bojama (zelenom na  $D_1$ , crvenom na  $D_2$ , crnom na  $D_3$  i plavom na  $D_4$ ).



**Slika 7.** Složeniji model: Sud energetskog transformatora ispunjen mineralnim uljem sa trostubnim jezgrom. a) Pogled spreda. b) Pogled odozgo.

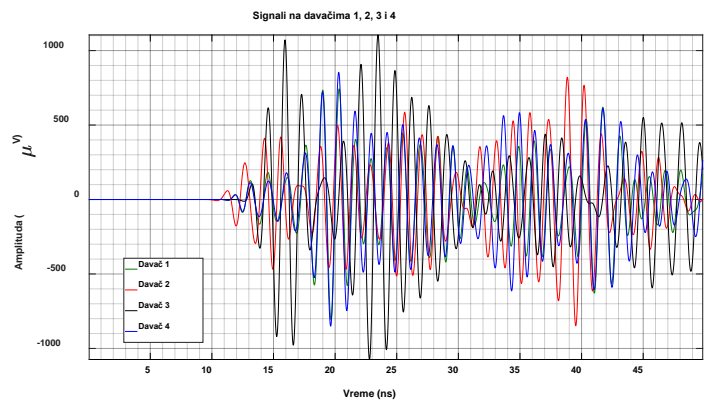


**Slika 8.** Prikazi signala parcijalnih pražnjenja na UHF davacima 1-4 sa slike 7. u različitim bojama (zelenom na  $D_1$ , crvenom na  $D_2$ , crnom na  $D_3$  i plavom na  $D_4$ ).



**Slika 9.** - Složeni model: Sud energetskog transformatora ispunjen mineralnim uljem sa trostubnim jezgrom i trofaznim namotajima. a) Pogled sa zadnje strane. b) Pogled odozgo.

Na slici 10. prikazani su izgledi signala parcijalnih pražnjenja u različitim bojama na zadato postavljnim davacima na slici 9.



**Slika 10.** Prikazi signala parcijalnih pražnjenja na UHF davacima 1-4 sa slike 9. u različitim bojama (zelenom na  $D_1$ , crvenom na  $D_2$ , crnom na  $D_3$  i plavom na  $D_4$ ).

Na slici 10. primećuje se dalji pad u amplitudama (slabljenje) snimljenih signala na UHF davačima u odnosu na stanje signala na slici 8. kada nema uticaja trofaznih namotaja.

Sa slika 6., 8. i 10. vidi se kako su oblici obvojnica amplituda pojedinih signala na UHF davačima različiti usled dejstava odbijanja od i difrakcije oko raznih metalnih prepreka.

U tabeli 1. dati su trenuci pojave prvog vrha signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 za tri primera simulacije konstrukcije energetskog transformatora.

**Tabela 1.** Trenuci pojave prvog vrha signala

Konstrukcija	$t_1$ [ns]	$t_2$ [ns]	$t_3$ [ns]	$t_4$ [ns]
metalni sud ( $\alpha$ )	10,671	9,678	12,07	10,694
+metalno jezgro ( $\beta$ )	10,646	9,929	12,223	10,682
+metal. namotaji ( $\gamma$ )	11,289	10,4	12,613	11,31

Iz rezultata u tabeli 1. vidi se da metalno jezgro takoreći ne utiče na putanje signala parcijalnih pražnjenja od izvora do UHF davača  $D_1$  i  $D_4$ , dok se do UHF davača  $D_2$  i  $D_3$  putanja signala produžava i oni kasnije stižu za 0,25 ns i 0,15 ns, respektivno. Trofazni namotaji uz trostubno jezgro utiču na kašnjenje signala od (0,54-0,72) ns, zavisno od položaja davača.

U tabeli 2. prikazane su razlike u vremenima pristizanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 za teorijski slučaj (bez prepreka i refleksija od suda) i tri primera simulacije konstrukcije energetskog transformatora. Davač  $D_1$  je uzet za referentni davač.

**Tabela 2.** Izračunate razlike u vremenima pristizanja signala

Konstrukcija	$dt_{21}$ [s]	$dt_{31}$ [s]	$dt_{41}$ [s]
idealni slučaj ( $\zeta$ )	-1,025E-09	1,399E-09	3,726E-11
+metalni sud ( $\alpha$ )	-9,927E-10	1,399E-09	2,256E-11
+metalno jezgro ( $\beta$ )	-7,169E-10	1,577E-09	3,584E-11
+met. namotaji ( $\gamma$ )	-8,891E-10	1,323E-09	2,068E-11

U tabeli 3. data su uzajamna odstupanja razlika u vremenima pristizanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 i srednja vrednost njihovih apsolutnih vrednosti za tri razmatrana primera simulacije energetskog transformatora u odnosu na teorijski - savršeni slučaj. Davač  $D_1$  je uzet za referentni davač.

**Tabela 3.** Uzajamna odstupanja razlika u vremenima pristizanja signala

Odstupanja razlika u vremenima prispeća	$D_2 - D_1$	$D_3 - D_1$	$D_4 - D_1$
$\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s]	3,244E-11	-5,457E-13	-1,47E-11
$ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s]	1,59E-11		
$\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s]	3,082E-10	1,778E-10	-1,421E-12

$ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s]	1,625E-10		
$\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s]	1,36E-10	-7,598E-11	-1,659E-11
$ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s]	7,619E-11		

Srednje odstupanje apsolutnih vrednosti razlika u vremenima pristizanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 u odnosu na idealni slučaj najveće je u 2. primeru simulacije, a najmanje u 1. primeru simulacije energetskog transformatora.

U tabeli 4. prikazani su izračunati položaji izvora parcijalnih pražnjenja za teorijski slučaj i tri primera oponašanja konstrukcije energetskog transformatora.

**Tabela 4.** Izračunati položaji izvora parcijalnih pražnjenja

Konstrukcija	$x$ [m]	$y$ [m]	$z$ [m]
idealni slučaj ( $\zeta$ )	8,935E-01	4,35E-01	1,118E+00
+metalni sud ( $\alpha$ )	8,869E-01	4,428E-01	1,08E+00
+metalno jezgro ( $\beta$ )	8,259E-01	4,377E-01	8,497E-01
+met. namotaji ( $\gamma$ )	8,815E-01	4,454E-01	8,944E-01

U tabeli 5. data su uzajamna odstupanja u izračunatim položajima izvora parcijalnih pražnjenja i srednja vrednost njihovih apsolutnih vrednosti za tri razmatrana oponašajuća primera energetskog transformatora u odnosu na teorijski - savršeni slučaj.

**Tabela 5.** Uzajamna odstupanja u izračunatim položajima izvora parcijalnih pražnjenja

Odstupanja u izračunatim položajima	$x$	$y$	$z$
$\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm]	-6,635E-01	7,834E-01	-3,762E+00
$ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm]	1,736E+00		
$\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm]	-6,761E+00	2,702E-01	-2,683E+01
$ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm]	1,129E+01		
$\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm]	-1,201E+00	1,042E+00	-2,236E+01
$ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm]	8,199E+00		

Srednje odstupanje apsolutnih vrednosti u izračunatim položajima izvora parcijalnih pražnjenja u odnosu na savršeni slučaj najveće je u 2. oponašajućem primeru konstrukcije energetskog transformatora, a najmanje u 1. simulacijskom primeru.

## VII ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je da se izvrši analiza uticaja realne konstrukcije energetskog transformatora na prostiranje UHF talasa parcijalnih pražnjenja u električnoj izolaciji u sudu

transformatora od mesta njihovog nastajanja do prijemnih UHF antena. Prostiranje elektromagnetskih talasa iz izvora parcijalnih pražnjenja je veoma složeno zbog skretanja oko metalnih prepreka i višestrukih odbijanja talasa u energetskom transformatoru.

Pomoću simulacije u HFSS-u omogućen je slikoviti prikaz primljenih UHF signala parcijalnih pražnjenja, obuhvaćene su sve refleksije i difrakcije signala na putu od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača. Posle određenog vremena, javljaju se u UHF signalima na davačima samo uticaji refleksija. U simulaciji, nedostatak je što je izvor parcijalnih pražnjenja oblikovan u vidu predajne dipolne antene. To znači da izvor nije tačkast, tj. ne zrači podjednako snagom zračenja u svim mogućim pravcima od izvora parcijalnih pražnjenja, što ima uticaja na oblike primljenih signala na različito postavljenim UHF davačima u zidu transformatorskog suda. Takođe nije uzet u obzir nijedan izvor šuma.

Slabljenje signala parcijalnih pražnjenja je utoliko veće ukoliko je veći broj i veličina prepreka na putu između izvora i UHF davača. Odbijeni talasi mogu da izobliče (smanje) prve vrhove i obvojnici prijemnog signala na UHF davaču ukoliko su prepreke veće i bliže predajnoj anteni (zbog odbijanja talasa od same antene) i ukoliko u većoj meri (po broju i veličini) prepreke stoje na putu prostiranja talasa od izvora do UHF davača.

Greška pri određivanju mesta izvora parcijalnih pražnjenja zavisi od tačnosti određenih razlika u vremenima prispeća signala do pojedinih UHF davača. Pojedina vremena prispeća signala zavise od broja metalnih prepreka na putu od izvora do UHF davača.

U simulaciji ne postoji merni uređaj (osciloskop) kojim se snimaju signali sa UHF davača, pa nema ni greške u vremenima prispeća signala do davača usled ograničene rezolucije odabiranja uzoraka signala pri njihovom pretvaranju iz analognog u digitalni oblik.

Razmatran je položaj izvora parcijalnih pražnjenja koji se gledano sproveda nalazi sa desne strane srednjeg stuba jezgra od električnog čelika ispod jarma, u srednjem delu 2. faze trofaznih bakarnih namotaja. Postavljen je između namotaja niskog napona i visokog napona, bliže namotaju niskog napona, i to naspram 22. diska namotaja niskog napona i naspram donjeg dela 22. diska namotaja visokog napona. U tom slučaju, kao i za zadati raspored UHF davača, srednja vrednost apsolutnih vrednosti odstupanja položaja izvora parcijalnih pražnjenja u odnosu na stvarni položaj najveća je kada se uzmu u obzir metalni sud i trostubno jezgro energetskog transformatora i iznosi 11,3 cm.

Kada se i trofazni namotaji uzmu u obzir srednja vrednost apsolutnih vrednosti odstupanja položaja izvora parcijalnih pražnjenja je 8,2 cm. Kada se razmatra samo metalni sud energetskog transformatora srednja vrednost apsolutnih vrednosti

odstupanja položaja izvora parcijalnih pražnjenja je 1,74 cm.

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dukanac, Đ. Otkrivanje i analiza signala parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru UHF metodom, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 96-101, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.096D>
- [2] Dukanac, D. Analysis of partial discharge signal detected by the UHF sensor in the power transformer, in *Proc. 3rd CIGRE SEERC Online-Conference Vienna 2021: Cooperation - Sustainability - Future*, Vienna, Austria, No. 1189, pp. 1-9, November 30, 2021. <https://e-cigre.org/publication/collaut2021-seerc-colloquium-2021>
- [3] 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, in *Proc. IEEE 8th Conference on Systems Process and Control (ICSPC) 2020*, pp. 196-201, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSPC50992.2020.9305753>
- [4] Thiviyathan, 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, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, Is 10, pp. 7697-7713, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.026>
- [5] Coenen, S., Tenbohlen, S., Strehl, T., Markalous, S., Fundamental characteristics of UHF PD probes and the radiation behavior of PD sources in power transformers, in *Proc. IEEE 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, South Africa, pp. 666-671, 2009. [https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009\\_ISH\\_Coenen\\_Fundamental\\_Ch aracteristics.pdf](https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009_ISH_Coenen_Fundamental_Ch aracteristics.pdf)
- [6] Coenen, S., *Measurement of Partial Discharges in Power Transformers Using Electromagnetic Signals*, University of Stuttgart, Germany, pp. 70-73, 2012.
- [7] Coenen, S., Tenbohlen, S., Markalous, S., Strehl, T. Sensitivity Limits of UHF PD Measurements on Power Transformers, in *Proc. IEEE 16th Int. Symp. H.V. Engineering (ISHVE)*, 2009, pp. 1034-1039. [https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009\\_ISH\\_Coenen\\_Sensitivity\\_Limit s.pdf](https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009_ISH_Coenen_Sensitivity_Limit s.pdf)
- [8] Beura C. P., Beltle M., Wenger P., Tenbohlen S., Experimental Analysis of Ultra-High-Frequency Signal Propagation Paths in Power Transformers, *Energies*, Vol. 15, 2766, pp. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15082766>
- [9] Dukanac, Đ., Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers, in *Proc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, Is 6, pp. 2266-2278, 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006996>
- [10] Dukanac, Đ., Lociranje parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru primenom UHF tehnike, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 73-78, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.73D>
- [11] Dukanac, Đ., Primena UHF davača za određivanje mesta parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru, in *Proc. Zbornik radova sa međunarodne konferencije „Energy and Ecology Industry“*, Beograd, str. 214-221, 10-13. oktobar 2018., ISBN: 978-86-7466-751-4 (AM).

AUTOR/AUTHOR

**Djordje Dukanac** - magistar elektrotehničkih nauka, Akcionarsko društvo "Elektromreža Srbije" Beograd, djordje.dukanac@ems.rs, ORCID [0000-0002-1090-3129](https://orcid.org/0000-0002-1090-3129)