

Uticaji refleksija i difrakcija talasa i modelovanog izvora i UHF davača pri lociranju parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru

Đorđe Dukanac

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd

Rezime - U ovom radu je pomoću šest simulacijskih modela energetsog transformatora ispunjenih mineralnim uljem detaljno analizirano prostiranje UHF elektromagnetskih (EM) talasa i određivanje mesta parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru. Ispitano je pet modela različite složenosti u Ansys HFSS-u i jedan pojednostavljeni model u MATLAB-u. Na osnovu rezultata njihovog poređenja izvedeni su odgovarajući zaključci. U modelima u Ansys HFSS-u uzeti su različiti činioci u obzir, uključujući broj i vrstu prisutnih komponenti transformatora. Ovi činioci bili su: 1) refleksije talasa od čeličnog suda, 2) refleksije talasa od i difrakcije oko magnetnog jezgra, 3) refleksije talasa od i difrakcije oko i kroz trofazne namotaje i 4) međusobni položaji i orijentacije prijemnih antena prema predajnoj anteni. Oni su uticali na: a) izobličenja, veličine i kašnjenja prvih vrhova, i b) amplitude prvih paketa signala na različito postavljena četiri UHF davača, u odnosu na zamišljeni model kada je sud energetsog transformatora providan. Za izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davače korišćene su dipolne antene. U modelu u MATLAB-u izvor je tačkast, dok su davači predstavljeni svojim faznim centrima. Pomoću modela u MATLAB-u procenjen je uticaj nesavršenih međusobnih položaja i prostorno nesimetričnih dijagrama ukupnih dobitaka predajne antene i prijemnih antena u modelima u Ansys HFSS-u, u pogledu dodatnog slabljenja prijemnih signala na davačima. Dimenzije suda i položaji izvora parcijalnih pražnjenja i UHF davača u modelima u Ansys HFSS-u bili su isti kao oni u MATLAB modelu.

Ključne reči - parcijalna pražnjenja, prostiranje signala, energetski transformator, UHF davač, prvi vrh, položaj izvora

1 UVOD

Energetski transformatori spadaju u kritične elemente postrojenja za proizvodnju električne energije, sistema za prenos električne energije i velikih industrijskih postrojenja. Potrebno je da se vrši stalno nadziranje stanja energetskih transformatora, pre svega njegove električne izolacije, da bi se izbegli katastrofalni kvarovi transformatora, produžio njihov vek trajanja i obezbedilo neprekidno snabdevanje potrošača električnom energijom. Tokom uobičajenih uslova rada, izolacioni sistem, koga čini izolaciono ulje i izolacioni papir, podleže različitim reakcijama usled toplotnog i električnog naprežanja u energetsom transformatoru. Među tim reakcijama su: oksidacija, hidroliza, piroliza, parcijalna pražnjenja i varničenje. Parcijalna pražnjenja tokom dužeg vremenskog perioda mogu da oslabe kvalitet električne izolacije do te mere

da dođe do potpunog kvara transformatora. Iz tog razloga, trebalo bi da se što je pre moguće odrede svi tipovi oštećenja unutrašnje izolacije u energetsom transformatoru. Istovremeno, pojava parcijalnih pražnjenja može da se koristi za procenu stanja električne izolacije u energetsom transformatoru i određivanje mesta nedostatka u izolaciji. Parcijalna pražnjenja uopšte mogu da nastanu na naponima većim od 5 kV.

Otkrivanje parcijalnih pražnjenja pomoću Ultra-High Frequency (UHF) metode je važno sredstvo za procenu stanja kvaliteta visokonaponske izolacije energetsog transformatora [1–3] i određivanje mesta nedostatka u električnoj izolaciji [4,5]. Ona ima neke prednosti u odnosu na konvencionalnu metodu kao što su: 1) širok opseg učestanosti, 2) suzbijanje šuma i 3) signali na izlazu UHF davača nisu galvanski povezani za vod pod visokim naponom. Na signal na izlazu UHF davača utiču: a) oblik strujnog impulsa izvora parcijalnih pražnjenja, b) položaji izvora i prijemnih UHF antena u sudu transformatora, c) slabljenje signala na putu prostiranja od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača i d) frekventni odziv UHF davača.

U [6] je opisan izvedeni eksperiment na energetsom transformatoru snage 300 MVA i 420 kV radi procene slabljenja signala na putu od predajne antene (ugrađenog veštačkog izvora parcijalnih pražnjenja) do prijemne antene, u slučaju njihovih različitih međusobnih položaja, kako bi se pronašli optimalni položaji UHF davača. Da bi se isto postiglo, u radu [7], opisane su simulacije izvedene uz pomoć Monte Karlo metode i softvera CST (Computer Simulation Technology) microwave studio.

Da bi uporedili rezultate simulacije i eksperimenta, autori su u radu [8] koristili distributivni transformator snage 630 kVA, da prikažu svoju tehniku modelovanja širenja elektromagnetskih (EM) talasa unutar transformatora korišćenjem softvera CST microwave studio. Ustanovili su razumno slaganje u vremenima prostiranja, kumulativnim energijama i amplitudama signala.

U [9] su simulirani napreci u prostiranju UHF signala parcijalnih pražnjenja od pobudnog izvora u obliku sonde do dve prijemne tačke korišćenjem FDTD (Finite Difference Time Domain) tehnike u modelu monofaznog energetsog transformatora.

U [10], za simulaciju širenja EM talasa parcijalnih pražnjenja unutar malog distributivnog transformatora, napravljeni su algoritmi u softveru C++ zasnovani na FDTD metodi koji su pokazali dobro slaganje sa rezultatima dobijenim korišćenjem CST softvera. Primljeni UHF signali su imali niže energije i vršne vrednosti za impulse parcijalnih pražnjenja sa strmijim

vremenima čela impulsa, iako je najveća vrednost pobudnog impulsa ostala ista.

Trofazni transformator 230/69 kV, 180 MVA je trodimenzionalno (3D) modelovan u [11]. Korišćeni su CST softver, četiri sonde električnog polja i metod binarne optimizacije rojem čestica za lociranje izvora parcijalnih pražnjenja u transformatoru.

Zaključak izvučen u [12] je da će količine električnog polja dostići maksimum na uglovima suda zbog superpozicije višestrukih (sa više putanja) EM talasa. Shodno tome, ovi uglovi su najbolja mesta za postavljanje UHF davača za povećanje osetljivosti otkrivanja EM talasa emitovanih iz izvora parcijalnih pražnjenja.

U radu [4], korišćenjem MATLAB-a u pojednostavljenom modelu energetskog transformatora sa četiri UHF davača, pod pretpostavkom da je dielektrična permitivnost mineralnog ulja 2,2 u sudu transformatora, simulirani su granični talasni oblici parcijalnih pražnjenja koji iz izvora dospevaju na davače i određivan je položaj izvora. Pretpostavljeni su uticaji: prosečnog slabljenja signala u ulju, Gausovog belog šuma i odabiranja signala digitalnim osciloskopom.

U radovima [13–16] vršena su poređenja rezultata sa grafikama snimljenih signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima i na osnovu njih dobijenih grešaka položaja izvora. Pretpostavljen je pobudni signal učestanosti od [0–1] GHz za tri modela energetskog transformatora različite složenosti u Ansys HFSS-u.

U ovom radu:

- Razmatra se 5 modela energetskog transformatora različite složenosti u Ansys HFSS-u i jedan uprošćeni model u MATLAB-u, istih dimenzija suda i položaja izvora i UHF davača, u smislu analize signala i određivanja mesta parcijalnih pražnjenja. Svi modeli su sa mineralnim uljem u sudu. Upoređuju su modeli i daju njihove prednosti i mane;
- Posmatra se transparentni sud u prvom uprošćenom modelu energetskog transformatora u Ansys HFSS-u prema kome mogu da se odrede tačna trajanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1–4. Razlog tome je što nema odbijenih talasa od metalnog suda i aktivnih delova, kao ni difrakcije talasa kroz ili oko aktivnih delova energetskog transformatora koji se superponiraju pri prijemu signala na davačima, kao što je to slučaj u ostala četiri modela transformatora u Ansys HFSS-u složenije konstrukcije;
- U 4. modelu u Ansys HFSS-u, razmatra se posebno i kombinovani uticaj metalnog suda, magnetnog jezgra i niskonaponskog (NN) namotaja energetskog transformatora na prijemne signale i određivanje mesta parcijalnih pražnjenja;
- Pretpostavlja se drugo mesto nedostatka u električnoj izolaciji koje dovodi do parcijalnih pražnjenja, a koje se nalazi između diskova NN namotaja naspram magnetnog jezgra;
- Uzima se veći opseg učestanosti pobudnog signala parcijalnih pražnjenja od [0–1,5] GHz;
- 3D dijagram ukupnog dobitka dipolne antene se određuje za veće rastojanje, u zapremini kocke stranice 2 m koja okružuje antenu u centru kocke;

- Vršiti se poređenje oblika pobudnih impulsa predajne antene (izvora) u različitim modelima u Ansys HFSS-u;
- Vršiti se poređenje S_{11} parametara refleksije izvorne antene i S_{21} parametara prenosa signala od izvorne antene prema prijemnim UHF antenama 1–4 u različitim modelima u Ansys HFSS-u;
- U Ansys HFSS-u razmatra se i uticaj refleksija i difrakcija talasa zbog elemenata konstrukcije transformatora na veličine prvih vrhova signala 1–4 koji su presudni pri određivanju mesta parcijalnih pražnjenja;
- Poredi se 1. uprošćeni model u Ansys HFSS-u sa modelom u MATLAB-u radi procene uticaja slabljenja signala na davačima usled specifičnog uzajamnog položaja i usmeravanja izvora u obliku antene u odnosu na prijemne antene.

II ELEMENTI KORIŠĆENIH MODELA U SIMULACIJAMA PROSTIRANJA UHF SIGNALA PARCIJALNIH PRAŽNjenja I ODREĐIVANJA MESTA IZVORA

U ovom poglavlju će biti predstavljeni pretpostavljeni izvor parcijalnih pražnjenja i četiri UHF davača koji su u pet modela energetskog transformatora u Ansys HFSS-u različitog oblika u odnosu na model u MATLAB-u, radi simulacija prenosa UHF signala parcijalnih pražnjenja od njihovog izvora do UHF davača 1–4 i određivanja mesta izvora. Biće razmatrani modeli različite složenosti malog trofaznog energetskog transformatora snage 5 MVA, sa odnosom transformacije 66/11 kV. Dimenzije suda transformatora su: 2300 mm x 880 x 2800 mm.

II.1 Modeli za simulacije u Ansys HFSS-u

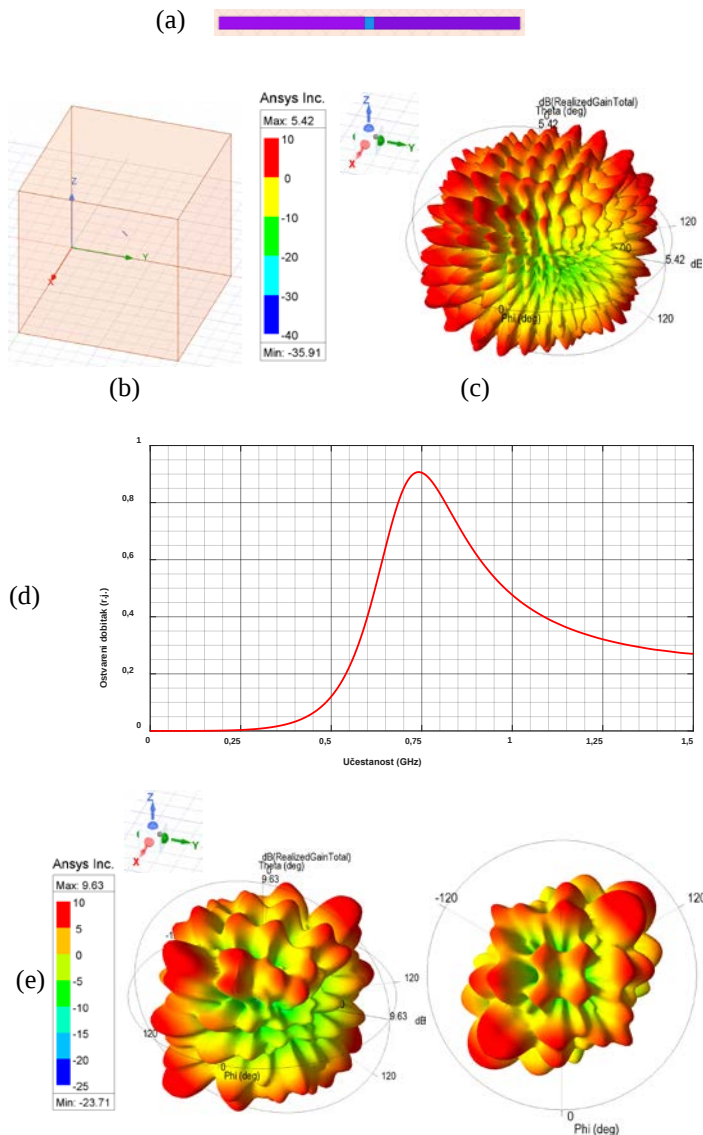
U ovom odeljku će biti predstavljeni izvor parcijalnih pražnjenja i četiri UHF davača koji su primenjivani u pet različitih modela energetskog transformatora različite složenosti u Ansys HFSS-u. Usvojeni položaji (centralne tačke) prijemnih UHF antena su: $A_1=(65; 65; 2750)$ mm, $A_2=(1150; 440; 2758)$ mm, $A_3=(2235; 815; 2755)$ mm i $A_4=(70; 810; 2760)$ mm [13–16].

Pretpostavljen je izvor parcijalnih pražnjenja u tački: $G = (1985; 295; 1485)$ mm. Nalazi se sa zadnje strane 1. stuba jezgra, u gornjem delu 1. faze namotaja. Postavljen je između namotaja niskog napona (NN) i magnetnog jezgra, bliže namotaju NN i to dosta zalazeći između 37. i 38. diska namotaja NN.

II.1.1 Izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davači u simulacijama u Ansys HFSS-u

U Ansys HFSS-u, dipolnom antenom, prikazanom na slici 1a), simuliraju se izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davači za potrebe pobude i prijema signala parcijalnih pražnjenja, respektivno. Krakovi antene su sastavljeni od bakra i imaju dimenzije 60 mm sa 5 mm [13–16]. Na slici 1b) prikazana je opisana dipolna antena čije je proračunavano zračenje ograničeno kockom transparentnih zidova, dužine stranice od 2 m, koja je napunjena mineralnim uljem dielektrične konstante $\epsilon_r = 2,2$. Položaj antene je (1; 1; 1) m. Izvor parcijalnih pražnjenja je oponašan širokopojasnim Gausovim impulsom u opsegu učestanosti [0–1,5] GHz i sa amplitudom od 1 V. Na slici 1c) prikazan je polarni dijagram ukupnog dobitka UHF dipolne antene sa slike 1b), izražen u decibelima [dB], pri 1,5 GHz. Na slici 1d) prikazan je dvodimenzionalni dijagram ostvarenog

dobitka antene u zavisnosti od učestanosti sa maksimumom 0,907 r.j. pri 740,65 MHz, što je 3,36 puta veće nego za 1,5 GHz. Ostvareni dobitak antene se izračunava uzimajući u obzir ukupnu efikasnost antene, zajedno sa njenom usmerenošću. Efikasnost antene je odnos snage zračenja prema ulaznoj snazi. Dobitkom prijemne antene opisuje se koliko dobro antena pretvara radio talase koji stižu ka njoj iz određenog pravca u električnu snagu i obrnuto za predajnu antenu. Na slici 1e) prikazani su 3D polarni dijagrami ukupnog dobitka antene, u [dB], pri 740,65 MHz, u trimetrijskom izgledu i pri pogledu odozgo. Centar antene je u središtu 3D dijagrama.



Slika 1. (a) Dipolna antena dimenzija 124 x 5 mm [13–16].
 (b) Zadana dipolna antena u kocki za ograničavanje zračenja sa trimetrijskom orijentacijom. (c) 3D polarni dijagram ukupnog dobitka antene u [dB] pri 1,5 GHz u trimetrijskom izgledu.
 (d) Ostvareni dobitak antene u zavisnosti od učestanosti.
 (e) 3D polarni dijagrami ukupnog dobitka antene, u [dB], pri 740,65 MHz, u trimetrijskom izgledu i pri pogledu odozgo

Sa slika 1c) i 1e) jasno je da obe snage zračenja na

odgovarajućim učestanostima koje emituje ili prima dipolna antena nisu jednake po svim pravcima u odnosu na središte antene. Vidi se, za obe učestanosti, da 3D dijagrami ukupnih dobitaka oko dipolne antene, koja simetrično prolazi kroz njihovo središte, značajno odstupaju od idealnog sfernog oblika. Izuzetno su geometrijski neujednačeni i prilično spljošteni duž uzdužne ose antene, u pravcu koje je na površini oba dijagrama ukupni dobitak minimalan. Primećuju se niži intenziteti ukupnog dobitka antene označeni većim brojem svetlo narandžastih i svetlo zelenih zona na polarnim dijagramima, posebno na površinama dijagrama s prednje, odnosno zadnje strane.

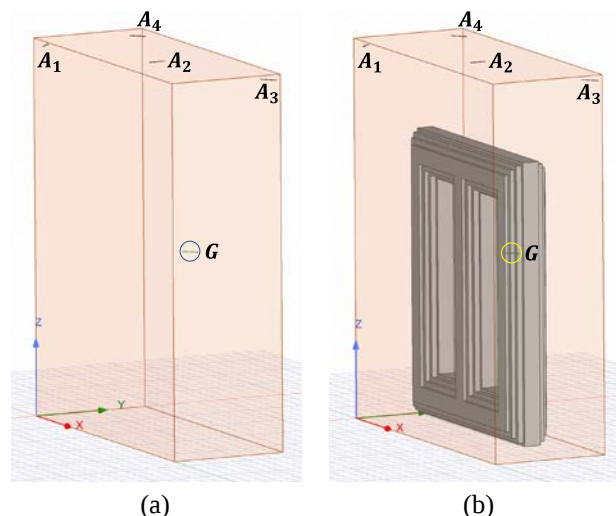
Na prvi pogled, ima više svetlo narandžastih i svetlo zelenih zona na 3D dijagramu pri 740,65 MHz nego pri 1,5 GHz, ali su skale ukupnih dobitaka različite. Na 3D dijagramu pri 740,65 MHz te zone su u opsegu [-5–5] dB, pri čemu je maksimum ukupnog dobitka 9,63 dB, a minimum -23,71 dB. Na 3D dijagramu pri 1,5 GHz te zone su u opsegu [-20–0] dB, pri čemu je maksimum ukupnog dobitka 5,42 dB, a minimum -35,91 dB.

II.1.2 Pet različitih modela malog trofaznog energetskog transformatora u Ansys HFSS-u

Razmatraju se sledeći modeli malog energetskog transformatora u Ansys HFSS-u: uprošćeni, prost, složeniji, složeni i tipični, kako bi se procenio i analizirao uticaj stvarne konstrukcije energetskog transformatora na prostiranje UHF signala od izvora parcijalnih pražnjenja do prijemnih UHF antena i utvrdilo mesto izvora u svakom od tih modela. Na slici 2a), sud transformatora napunjen mineralnim uljem predstavlja:

- 1) prvi uprošćeni model energetskog transformatora sa spoljnim transparentnim površinama suda, ali uzetim za granicu zračenja zbog proračuna, i
- 2) drugi prost model energetskog transformatora sa spoljnim površinama zidova suda od nerđajućeg čelika 304.

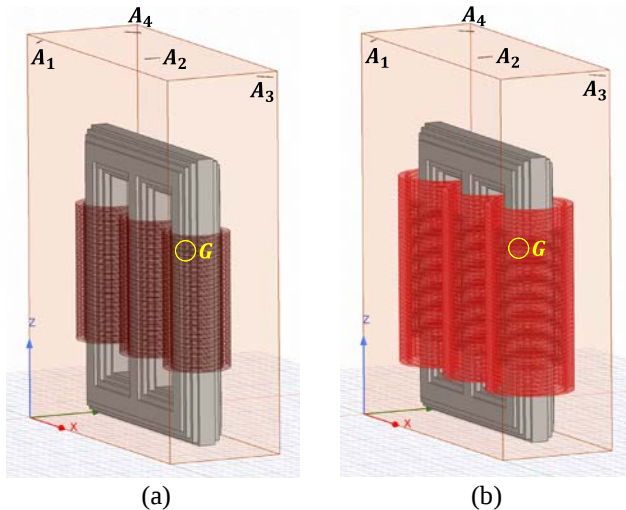
Na slici 2b) prikazan je treći složeniji model energetskog transformatora. Predstavljen je sa sudom transformatora od nerđajućeg čelika 304, koji je ispunjen mineralnim uljem i u kome se nalazi trostubno magnetno jezgro.



Slika 2. (a) Prvi uprošćen, odnosno drugi prost model transformatora, ali sa odgovarajućim zidovima suda, providnim odnosno čeličnim. (b) Treći složeniji model transformatora

Na slici 3a) prikazan je četvrti složeni model energetskog transformatora. U odnosu na model na slici 2b) sadrži i trofazni bakarni NN namotaj obmotan oko stubova jezgra.

Na slici 3b) prikazan je peti tipični model energetskog transformatora. U odnosu na model na slici 3a) sadrži i trofazni bakarni VN namotaj obmotan oko stubova jezgra i NN namotaja.



Slika 3. (a) Četvrti složeni model transformatora.
(b) Peti tipični model transformatora

II.1.3 POJEDNOSTAVLJENJA I OGRANIČENJA 4. I 5. SIMULACIJSKOG MODELA U ANSYS HFSS-U

Zbog ograničenih mogućnosti računara (prvenstveno procesora i memorije sa slučajnim pristupom) i softvera Ansys HFSS, neophodna pojednostavljenja i ograničenja 4. i 5. modela energetskog transformatora su:

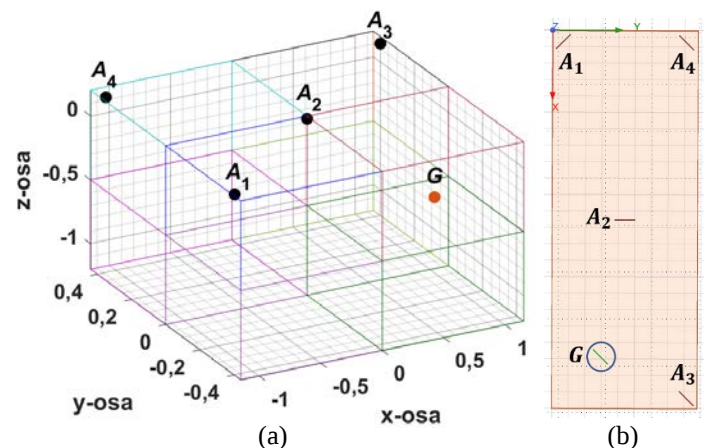
- 1) Pošto su i papirna izolacija i prešpanska međuizolacija trofaznih namotaja NN i VN impregnirani uljem, što smanjuje dielektričnu konstantu tih izolacija, njihova stvarna dielektrična konstanta se zamenjuju onom od mineralnog ulja.
- 2) Međuizolacija između susednih navoja svakog od 42 odgovarajuća NN ili VN diska u radialnom pravcu, debljine 1,2 mm, ne uzima se u obzir i smatra se da je bakar. Svaki VN disk je podeljen na dva dela duž vertikalne ose sa razmakom od 1,2 mm, iako bi trebalo da bude sastavljen od četiri dela.
- 3) Zbog nedostatka preciznih podataka i dodatnog uslozljavanja konstrukcije energetskog transformatora, ne uzimaju se u obzir manje prisutni i uticajni: a) izolacioni delovi kao što su: izolacioni odstojnici, trake, čaure itd. i b) metalni delovi, uključujući: zavrtnje, delove za pričvršćivanje namotaja, okvire za stezanje jezgra, izlazne vodove na namotajima, itd.

Slabljenje signala je nešto veće kada se dva razmaka od 1,2 mm po vertikalnom pravcu u svakom disku VN namotaja zanemare. 1,2 mm je mali otvor za EM talas u mineralnom ulju (sa $\epsilon_r = 2,2$) koji ima talasnu dužinu od 27,31 cm pri 740,65 MHz, a 13,48 cm pri 1,5 GHz. Zbog difrakcije talasa na tako malom otvoru, talasni snop koji prolazi kroz njega gubi intenzitet u različitim pravcima u odnosu na sam otvor, odnosno snaga signala opada u pravcu koji je najbliži datom UHF davaču.

II.2 Model za simulacije u MATLAB-u

Na slici 4a), prikazan je uprošćeni model energetskog transformatora u MATLAB-u, gde sud napunjen mineralnim uljem ima iste dimenzije kao u bilo kom Ansys HFSS modelu. Pored toga, položaji četiri UHF davača i izvora u odnosu na sud su isti, ali se njihove koordinate razlikuju od onih kod Ansys HFSS modela, jer se koordinatni početak ne nalazi na istom mestu. Umesto u prednjem levom temenu donje strane suda, on se nalazi u središtu suda u MATLAB modelu, pa je: $A_1 = (-1,085; -0,375; 1,35)$ m, $A_2 = (0; 0; 1,358)$ m, $A_3 = (1,085; 0,375; 1,355)$ m, $A_4 = (-1,08; 0,37; 1,36)$ m i $G = (0,835; -0,145; 0,085)$ m. Izvor parcijalnih pražnjenja je tačka, što je najbliže stvarnom slučaju. UHF antene su približno predstavljene samo svojim faznim centrima. Tačne udaljenosti od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača 1–4 su: 2,311 m, 1,529 m, 1,395 m i 2,358 m.

Na slici 4 b) prikazan je pogled odozgo na prvi uprošćeni model transformatora u Ansys HFSS-u. Izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davači predstavljeni su dvopolnim antenama.



Slika 4. (a) Uprošćeni model transformatora u MATLAB-u.
(b) Pogled odozgo na prvi uprošćeni model transformatora u Ansys HFSS-u

III ANALIZE SIMULACIJA PROSTIRANJA TALASA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA I DOBIJENIH SIGNALA NA UHF DAVAČIMA

U ovom odeljku će biti predstavljeni rezultati simulacija prostiranja talasa parcijalnih pražnjenja od izvora G do UHF davača $A_1 - A_4$ i analizirani signali na UHF davačima primenom Ansys HFSS i MATLAB modela energetskog transformatora.

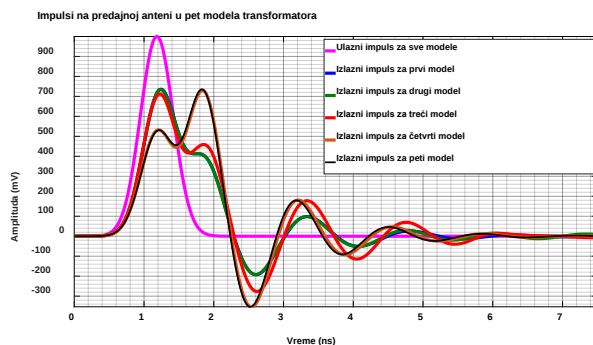
III.1 Simulacije zasnovane na modelima u Ansys HFSS-u

U Ansys HFSS-u koristi se metod konačnih elemenata (FEM). Ovo je numerička tehnika koja se koristi da se približno odredi rešenje diferencijalnih jednačina sa graničnim vrednostima. Osnovni zadatak koji se ovde postavlja je problem visoke frekvencije, a ne niskofrekventni ili kvazistatički problem. Za svaki model transformatora su vršene punotalasne EM simulacije stvaranja, prenošenja i prijema EM UHF talasa parcijalnih pražnjenja.

U Ansys HFSS modelima uzimaju se u obzir sve moguće refleksije i difrakcije EM talasa iz izvora parcijalnih pražnjenja, izazvane uticajima metalnih delova energetskog transformatora.

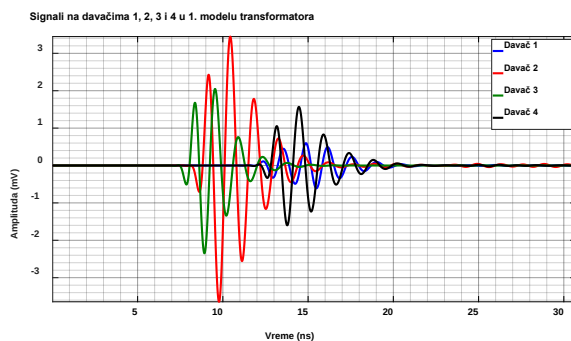
Tačnije rečeno, uzimaju se u obzir sva odbijanja talasa od zidova suda, trofaznog magnetnog jezgra i trofaznih namotaja NN i VN. Obuhvaćene su i sve difrakcije (savijanja) talasa oko aktivnih metalnih komponenti (jezgra i namotaja) i kroz male procepe između metalnih delova namotaja NN i VN.

Na slici 5 su prikazani izlazni pobudni impulsi predajne antene koji se više ili manje razlikuju, ali njen prikazani ulazni pobudni impuls ostaje nepromenjen za svih pet modela transformatora u Ansys HFSS-u: uprošćeni, prosti, složeniji, složeni i tipični. Zbog blizine metalnih komponenti, tj. diskova NN namotaja predajnoj anteni i refleksija od njih, maksimumi izlaznih pobudnih signala četvrtog i petog modela kasne za oko 0,59 ns u odnosu na izlazne pobudne impulse prvog, drugog i trećeg modela transformatora.



Slika 5. Pobudni ulazni impuls i pobudni izlazni impulsi predajne antene za različite modele transformatora

Na slici 6 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u raznim bojama za prvi uprošćeni model energetskog transformatora, koji je prethodno prikazan na slici 2a) u obliku suda sa mineralnim uljem i sa providnim zidovima sa zadatim rasporedom izvora i davača. Sa slike 6 može da se primeti da, od trenutka pojave do prigušenja u blizine nule, signali parcijalnih pražnjenja na davačima imaju trajanje od oko 9 ns.

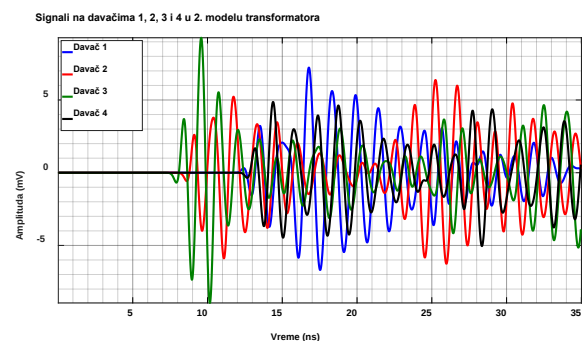


Slika 6. Izlazni signali na UHF davačima 1–4 u različitim bojama, za prvi uprošćeni model energetskog transformatora u obliku suda gde granicu zračenja čine providni zidovi

Na slici 7 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u raznim bojama za drugi prosti model energetskog transformatora u obliku suda sa metalnim zidovima koji je napunjen mineralnim uljem i koji je već predstavljen sa zadatim rasporedom izvora i davača na slici 2a).

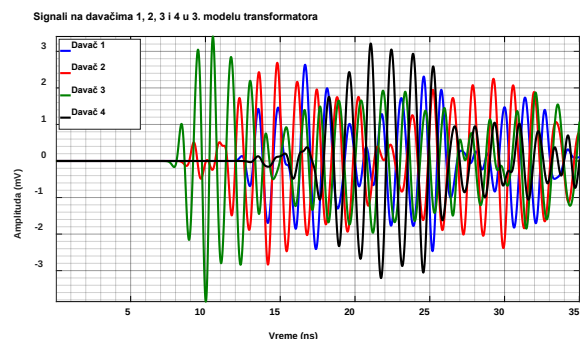
Sa slike 7, primećuju se dejstva EM talasa parcijalnih pražnjenja

koji se odbijaju od strana suda od nerđajućeg čelika u drugom prostom modelu transformatora. U poređenju sa slikom 6 može da se zaključi da, posle približno 9 ns od početka signala na svakom davaču, više ne vredi da se analiziraju direktni signali od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima, i da ostaju samo efekti indirektno nastalih signala na davačima. U prvom paketu svakog signala može da se primeti povećanje njihove maksimalne amplitude, što je posebno veliko kod davača 1 11,87 puta, a zatim kod davača 3 i 4 (3,95 i 3,04 puta), kao rezultat odbijanja EM talasa od metalnog suda. Povećanje najveće amplitude u prvom paketu signala od 1,62 puta kod davača 2 znači da je najmanji uticaj čeličnih zidova suda na prijemni signal za taj davač. Mnogo su manji uticaji odbijenih EM talasa parcijalnih pražnjenja na prvi vrh signala na svakom davaču, jer je potrebno određeno vreme da mnogi odbijeni talasi stignu na mesto svakog od davača (najveći je uticaj opet na 1. davaču).



Slika 7. Izlazni signali na UHF davačima 1–4 prikazani u različitim bojama, za drugi prosti model energetskog transformatora sa zidovima od nerđajućeg čelika

Na slici 8 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u nizu boja za treći složeniji model energetskog transformatora sa čeličnim sudom napunjenim mineralnim uljem i sa trostubnim magnetnim jezgrom, koji je prethodno predstavljen sa zadatim rasporedom izvora i davača na slici 2b).

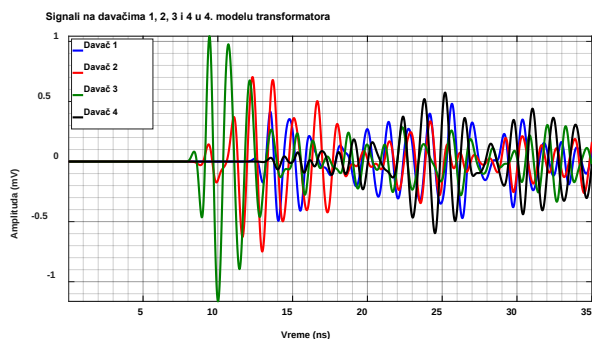


Slika 8. Izlazni signali na UHF davačima 1–4, predstavljeni u različitim bojama, za treći složeniji model transformatora koji u odnosu na drugi model sadrži i trostubno magnetno jezgro

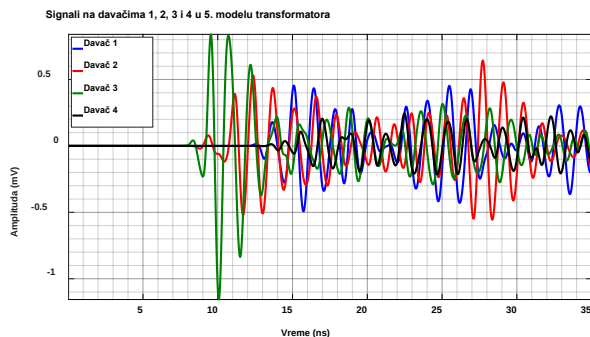
Na slici 8 je prikazan dodatni uticaj magnetnog jezgra na izgled izlaznih signala na davačima 1–4, u odnosu na drugi prosti model energetskog transformatora, što je uzrokovano povećanim refleksijama (odbijanjima) od, kao i pojavom difrakcija (skretanja, savijanja) talasa oko sastavnih delova magnetnog

jezgra. Kao rezultat toga, u poređenju sa slikom 7, na slici 8 može da se vidi smanjenje maksimalne amplitude u prvom paketu svih signala u opsegu od 1,51 put za 4. signal, do 2,74 puta za 1. signal.

Na slici 9 predstavljeni su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u nizu boja za četvrti složeni model energetskog transformatora sa čeličnim sudom, trostubnim magnetnim jezgrom i trofaznim NN namotajem, koji je prethodno prikazan na slici 3a). Sa slike 9 mogu da se vide pojačani efekti slabljenja signala na davačima 1–4 usled dejstva NN namotaja u poređenju sa prethodnim trećim složenijim modelom energetskog transformatora, pri čemu dolazi do dodatnih pojačanih refleksija od i difrakcija oko i kroz metalne komponente NN namotaja. Zbog toga je 13,91 put manja amplituda prvog paketa signala 4. Ostala slabljenja amplituda prvih paketa signala 1, 2 i 3 su 5,34, 3,78 i 3,31 puta. Ovolika slabljenja signala su posledica položaja predajne antene koja je postavljena dosta zalazeći između 37. i 38. diska NN namotaja, naspram magnetnog jezgra. Pri tome dolazi do odbijanja talasa parcijalnih pražnjenja od tih diskova nazad ka anteni na bliskom rastojanju, što dovodi do stvaranja kontra elektromotornih sila u anteni i slabljenja intenziteta izlaznog impulsa. Na prethodnoj slici 5 vidi se pomeranje glavnog maksimuma izlaznog impulsa za 0,59 ns, dok je prvi maksimum posle 1,24 ns za 180 mV slabiji nego u 3. modelu transformatora.



Slika 9. Različito obojeni izlazni signali na UHF davačima 1–4, za četvrti složeni model energetskog transformatora koji u odnosu na treći model sadrži i trofazni NN namotaj



Slika 10. Izlazni signali u različitim bojama na UHF davačima 1–4, za peti tipični model energetskog transformatora koji u odnosu na četvrti model sadrži i trofazni VN namotaj

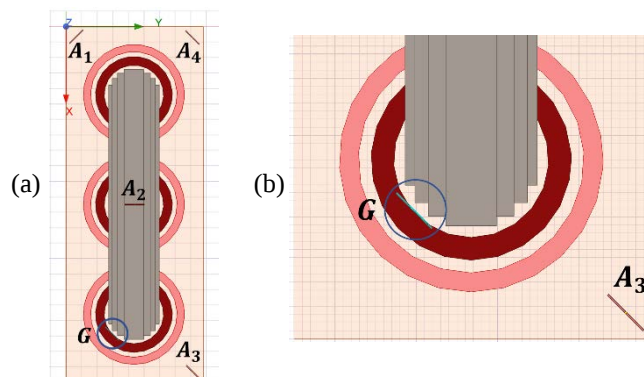
Na slici 10 predstavljeni su snimljeni izlazni signali na UHF

davačima 1–4 u različitim bojama za peti tipični model energetskog transformatora sa čeličnim sudom, trostubnim magnetnim jezgrom i trofaznim namotajima NN i VN, koji je prethodno prikazan na slici 3b). Sa slike 10 može da se vidi mali uticaj VN namotaja na slabljenja maksimalnih amplituda u prvim paketima signala na davačima 1, 3 i 4 od 1–1,13 puta u poređenju sa prethodnim četvrtim modelom energetskog transformatora. Veći uticaj je zabeležen pri slabljenju maksimuma prvog paketa signala na 2. davaču 1,41 put.

U Tabelama 1–3 sažeto su prikazani trenuci pojava i vrednosti prvih vrhova, kao i amplitude prvih paketa signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1–4, sa slika 6–10, za pet modela energetskog transformatora u Ansys HFSS-u.

Tabela 1. Trenuci pojava prvih vrhova signala parcijalnih pražnjenja na davačima 1–4 za pet modela transformatora

Model	t_1 [ns]	t_2 [ns]	t_3 [ns]	t_4 [ns]
model 1	12,3694	8,6217	7,8640	12,6049
model 2	12,4178	8,6167	7,9171	12,6510
model 3	12,4360	8,7401	7,9070	12,9965
model 4	12,5037	8,8367	8,4159	13,0297
model 5	12,5985	8,8163	8,3419	13,0729



Slika 11. Položaj antene izvora u odnosu na NN namotaj u petom tipičnom modelu transformatora prikazanom: (a) pri pogledu odozgo i (b) sa uvećanim detaljem mesta izvora.

Tabela 2. Prve vršne vrednosti signala parcijalnih pražnjenja na davačima 1–4, za pet modela energetskog transformatora

Model	U_{p1} [mV]	U_{p2} [mV]	U_{p3} [mV]	U_{p4} [mV]
model 1	0,1102	-0,7044	-0,5077	-0,3318
model 2	0,3140	-0,5757	-0,6802	-0,3502
model 3	0,1339	-0,1337	-0,1648	-0,0308
model 4	0,0265	-0,0302	0,0823	-0,0042
model 5	0,0169	-0,0208	0,0410	-0,0014

Na slici 11 se vidi da je VN namotaj od manjeg uticaja na prijemne signale na davačima nego samo magnetno jezgro ili posebno magnetno jezgro i NN namotaj, jer je udaljeniji od antene izvora u odnosu na jezgro i NN namotaj između čijih diskova ona dosta zalazi. Pritom su svi davači postavljeni u gornjem delu suda.

Tabela 3. Amplitude prvih paketa signala parcijalnih pražnjenja na davačima 1–4 za pet modela transformatora

Model	U_{m1} [mV]	U_{m2} [mV]	U_{m3} [mV]	U_{m4} [mV]
model 1	-0,6091	-3,6444	-2,3484	-1,5985
model 2	7,2270	-5,8901	9,2772	4,8664
model 3	2,6341	-2,8360	-3,8485	3,2148
model 4	-0,4937	-0,7493	-1,1636	-0,2311
model 5	-0,4928	0,5310	-1,1564	0,2048

Utjecaji međusobnih položaja i usmeravanja prijemnih antena prema predajnoj anteni, u prvom modelu, mogu da se vide na primerima signala na UHF davačima 4 i 1 u tabeli 3. Iako se rastojanja od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača 4 i 1 (2 i 3) malo razlikuju 1,02 (1,1) put, najveće amplitude u prvim paketima signala na ovim davačima se razlikuju 2,62 (1,55) puta a prvi vrhovi 3,01 (1,39) puta. Ovo ukazuje da zbog svoje nepravilne orijentacije u odnosu na predajnu antenu (izvor parcijalnih pražnjenja), UHF davač 1 (davač 3) prima znatno manju snagu signala od davača 4 (davača 2) iako je na bližem rastojanju od izvora. Pomoću prethodno prikazanih slika 1e), 2a) i 4b) može da se zaključi da su predajni talasni frontovi antene izvora sa jačim dobitkom bliži prijemnoj anteni 4 (2) i njenim prijemnim talasnim frontovima sa jačim dobitkom, nego anteni 1 (3).

U 2. modelu, uz dodatak metalnog suda transformatora, javljaju se efekti izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 1, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1, 3 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred za oko 0,5 ns (0,484 ns, 0,531 ns i 0,461 ns) a za signal 2 je prvi vrh pomeren unazad za 0,005 ns. Zbog refleksije, u tabeli 2, prvi pikovi su mogli da budu veći 2,84, 1,34 i 1,06 puta za signale 1, 3 i 4 ili je prvi pik mogao da bude manji 1,22 puta za signal 2 u modelu 2 u odnosu na model 1.

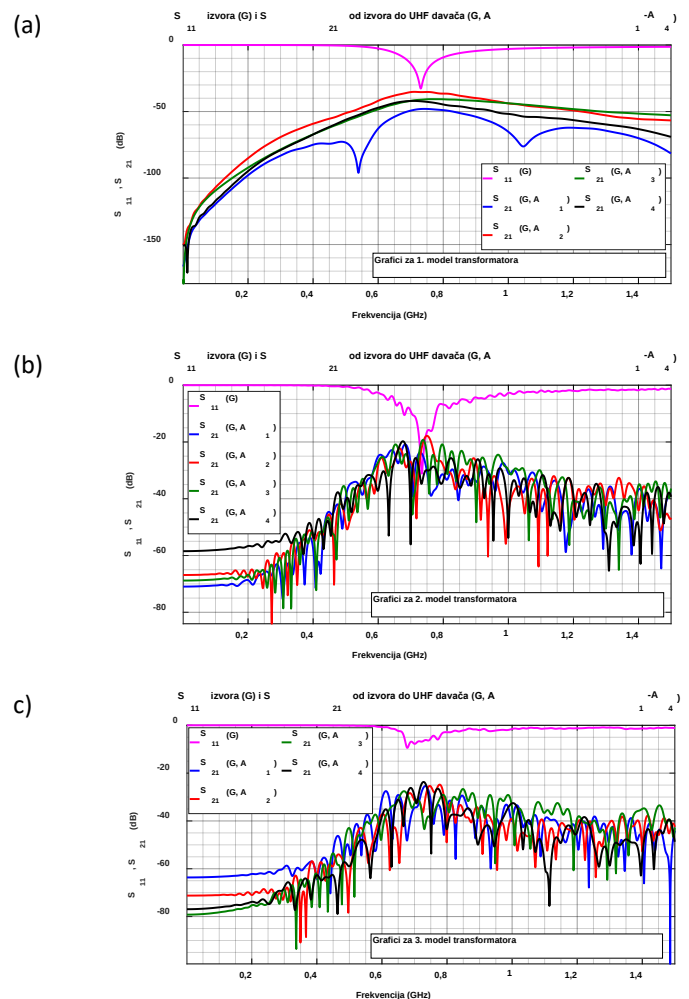
U 3. modelu, uz dodatak trostubnog jezgra transformatora, postoje nova dejstva na izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 2, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1, 2 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred (0,018 ns, 0,123 ns i 0,345 ns), a za signal 3 je prvi vrh pomeren unazad za 0,01 ns. Najveća odstupanja su za signale 4 i 2, a najmanja za signale 3 i 1. Zbog difrakcija i dodatnih refleksija EM talasa u odnosu na model 2, u tabeli 2, prvi vrh se očekivano najviše smanjio za signal 4 11,37 puta, a zatim za signale 2, 3 i 1: 4,31, 4,13 i 2,34 puta. Magnetno jezgro ima najmanji uticaj na slabljenje prvog vrha, ali i najveći uticaj na maksimum prvog paketa signala koji dolazi do 1. davača, dok je za signal davača 4 obrnuto (videti opis slike 8, tj. tabelu 3).

U 4. modelu, uz dodatak trofaznog NN namotaja, javljaju se novi efekti izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 3, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1, 2, 3 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred (0,068 ns, 0,097 ns, 0,5089 ns i 0,033 ns). Najveće je odstupanje za signal 3. Zbog difrakcija i dodatnih refleksija EM talasa u odnosu na model 3, u tabeli 2, prvi vrh se očekivano najviše smanjio za signal 4 7,333 puta, a zatim za signale 1, 2 i 3: 5,053, 4,427 i 2,002 puta. U istom poretku se javljaju i utjecaji na maksimume

prvih paketa signala na davačima (videti opis slike 9, tj. tabelu 3).

U 5. modelu, uz dodatak trofaznog VN namotaja, javljaju se novi efekti izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 4, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred (0,095 ns i 0,043 ns), a za signale 2 i 3 su prvi vrhovi pomereni unazad (0,020 ns i 0,074 ns). Zbog difrakcija i dodatnih refleksija EM talasa u odnosu na model 4, u tabeli 2, prvi vrh se najviše smanjio za signal 4 3 puta, a zatim za signale 3, 1 i 2: 2,007, 1,570 i 1,452 puta.

S_{11} parametar za izvor parcijalnih pražnjenja i S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4 prikazani su na slici 12 za 1., 2. i 3. model, a na slici 13 za 4. i 5. model u Ansys HFSS-u.

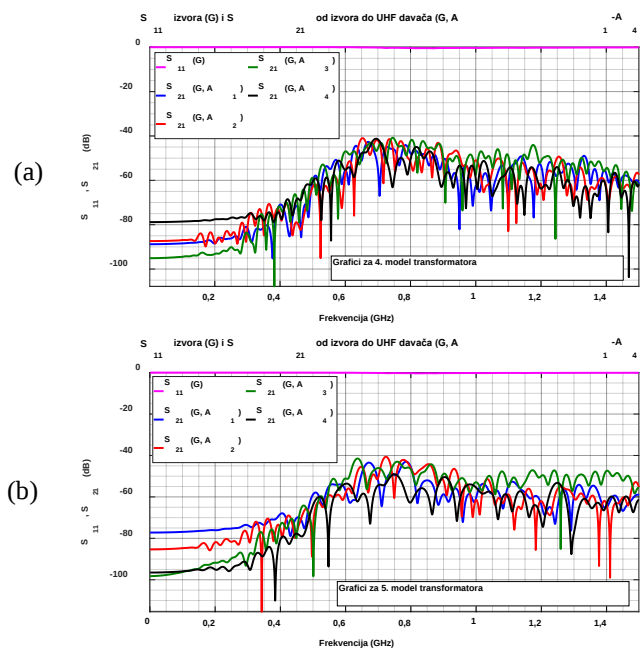
**Slika 12.** Parametar S_{11} za izvor parcijalnih pražnjenja i S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4 za (a) 1., (b) 2. i (c) 3. model transformatora u Ansys HFSS-u

Za 1. model, sa slike 12 a) može da se vidi da se maksimumi krivih za S_{21} parametre signala ne poklapaju, tj. najveći je maksimum za 2. davač -35,19 dB pri 711 MHz, a najmanji za prvi davač -48,02 dB pri 742,5 MHz. Maksimalne vrednosti

parametara S_{21} za signale 1, 2, 3 i 4, u odnosu na vrednosti S_{21} pri 1,5 GHz, veće su za 33,49 dB, 21,48 dB, 12,14 dB i 27,03 dB, tj. 47,26, 11,86, 4,05 i 22,46 puta, respektivno. Najmanja vrednost S_{11} parametra iznosi -32,7 dB, pri 731,25 MHz. Sa slika 12b) i 12a) može da se vidi da za 2. model u odnosu na 1. model transformatora postoje povećane maksimalne vrednosti parametara S_{21} signala, zbog pojačanih efekata reflektovanih talasa od čeličnog suda koji se superponiraju pri prijemu na davačima. Ovo povećanje amplituda je od 17,35 dB (7,37 puta) za signal 2 do 27,13 dB (22,74 puta) za signal 1 u zajedničkom opsegu učestanosti [675,75–765] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra je neznatno veća -31,14 dB, pri 734,25 MHz.

Na slikama 12 c) i 12 b) primećuju se za 3. model u odnosu na 2. model transformatora slabljenja maksimalnih vrednosti S_{21} parametara signala, zbog pojačanih efekata odbijenih talasa od magnetnog jezgra i njihovih difrakcija oko jezgra koji se superponiraju pri prijemu na davačima. S_{21} se smanjuje od 3,94 dB (1,57 puta) za signal na davaču 4 do 7,39 dB (2,34 puta) za signal na davaču 3 u zajedničkom opsegu učestanosti [675,75–849] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra se zbog blizine jezgra predajnoj anteni znatno povećala za 21,70 dB (12,17 puta).

Sa slika 13a) i 12b) može da se vidi da za 4. model u odnosu na 3. model transformatora postoje značajna smanjena maksimalnih vrednosti S_{21} parametara signala, zbog pojačanih dejstava reflektovanih talasa od i njihovih difrakcija oko i kroz metalne delove NN trofaznog namotaja. S_{21} se smanjuje od 14,18 dB (5,12 puta) za signal na davaču 3 do 17,55 dB (7,54 puta) za signal na davaču 4 u zajedničkom opsegu učestanosti [653,25–849] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra se zbog blizine diskova NN namotaja predajnoj anteni povećala za 8,96 dB (2,81 put).



Slika 13. Parametar S_{11} za izvor parcijalnih pražnjenja i S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4 za (a) 4. i (b) 5. model energetskog transformatora u Ansys HFSS-u

Sa slika 13b) i 13a) može da se vidi da za 5. model u odnosu na 4. model transformatora postoji manje smanjenje maksimalnih vrednosti S_{21} parametara signala 1, 2 i 4, zbog dejstva odbijenih talasa od i njihovih difrakcija oko i kroz metalne delove VN trofaznog namotaja. S_{21} se osetno smanjuje samo za signal na davaču 4 za 7,8 dB (2,45 puta), a za signal na davaču 3 se čak povećava za 0,379 dB (1,04 puta) u zajedničkom opsegu učestanosti [636,75–785,25] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra je ostala približno ista, povećala se svega 1,02 puta.

III.2 SIMULACIJE ZASNOVANE NA MODELU U MATLAB-U

Što se tiče neposrednog širenja EM talasa od izvora parcijalnih pražnjenja do sva četiri UHF davača, bez dejstava odbijanja i difrakcija talasa, model u MATLAB-u sličan je prvom modelu u Ansys HFSS-u. Razlike su u pravljenju modela izvora i prijemnih davača.

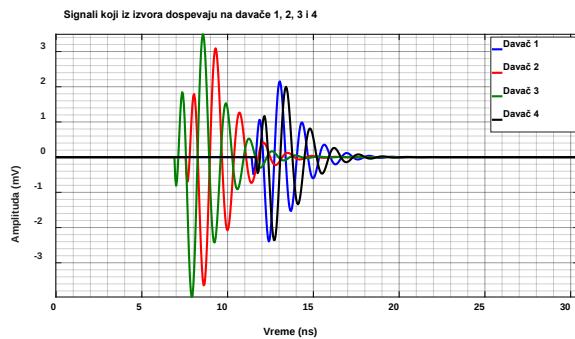
U modelu u MATLAB-u, pošto su izvor i davači tačkasti, a sud prazan i providan, na amplitude primljenih signala na davačima je uticalo samo njihovo slabljenje u ulju, a ne i položaji prijemnih antena prema predajnoj anteni kao u 1. modelu u Ansys HFSS-u. Prvo je procenjeno da antenski davač 2 u 1. modelu u Ansys HFSS-u ima najbolji prijem signala, amplitude od -3,64 V, tj. da je za njega najmanji uticaj međusobnog položaja i usmeravanja u odnosu na predajnu antenu. Zatim je pretpostavljeno da i signal na tačkastom davaču 2 u modelu u MATLAB-u ima istu amplitudu i približno isti talasni oblik. Prema talasnom obliku signala na davaču 2 u Ansys HFSS-u, u simulacijama u MATLAB-u pretpostavljaju se dvostruko eksponencijalno opadajući oscilatorni UHF signali, koji polaze od izvora parcijalnih pražnjenja, pri $t = 0$, ka odgovarajućim davačima 1–4, sa amplitudom napona $U_m = 63,69 \text{ mV}$ i odgovarajućim prosečnim učestanostima $f_j = (742,5; 711; 765; 708) \text{ MHz}$, kao što sledi u jednačini (1):

$$U_j(t) = A \cdot U_m \cdot \left(d_1 \cdot e^{-\frac{r_1 \cdot (t - T_j)}{\tau_1}} - d_2 \cdot e^{-\frac{r_2 \cdot (t - T_j)}{\tau_2}} \right) \cdot \sin \left(2\pi \cdot f_j \cdot 10^6 \cdot (t - T_j) \right) \quad (1)$$

gde je j oznaka za odgovarajući davač ($j = 1, 2, 3$ ili 4); A je srednji odnos gubitka napona od 0,8 po metru u mineralnom ulju u sudu transformatora, što odgovara slabljenju signala od -2 dB/m ; T_j je vreme za koje signal iz izvora stiže na davač j (gde je $t \geq T_j$); f_j je učestanost signala na davaču j ; konstante su $d_1 = 0,95$, $d_2 = 1,05$, $r_1 = 3,99$ i $r_2 = 3,79$; vremenske konstante opadanja su $\tau_1 = 4,35 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ i $\tau_2 = 2,79 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

Na slici 14 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u raznim bojama za uprošćeni model energetskog transformatora u MATLAB-u, koji je prethodno predstavljen na slici 4a). Na osnovu slika 6 i 14, grubo je procenjeno koliko su u 1. modelu u Ansys HFSS-u amplitude signala na davačima 1, 3 i 4 manje usled uticaja međusobnih položaja i usmeravanja ovih prijemnih antena u odnosu na predajnu antenu, u poređenju sa modelom u MATLAB-u gde tog uticaja nema. Tako je dobijeno da je smanjenje amplitude signala za davač 1 3,93 puta, za davač 3 1,69 puta, a za davač 4 1,47 puta. Ovi rezultati pokazuju da davač 1 ima najnepovoljniju orijentaciju i položaj u prostoru u

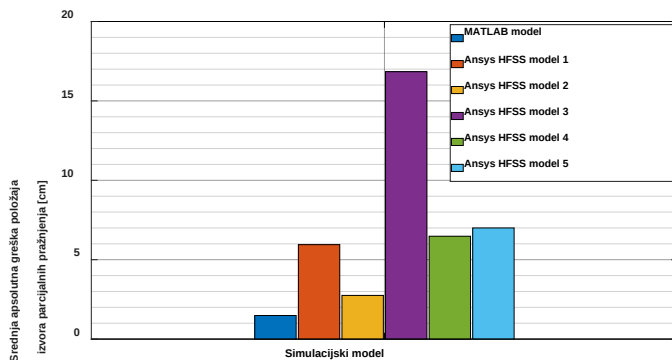
odnosu na izvor parcijalnih pražnjenja u Ansys HFSS modelima transformatora.



Slika 14. Različito obojeni izlazni signali na UHF davačima 1–4, postavljeni u uprošćenom modelu transformatora u MATLAB-u

IV POREĐENJA GREŠAKA U LOCIRANJU IZVORA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA U RAZMATRANIM MODELIMA TRANSFORMATORA

Na slici 15 prikazane su srednje apsolutne greške položaja izvora parcijalnih pražnjenja za model u MATLAB-u i pet modela energetskog transformatora u Ansys HFSS-u.



Slika 15. Srednje apsolutne greške položaja izvora parcijalnih pražnjenja za MATLAB model modele transformatora u Ansys HFSS-u

Kao što se sa slike 15 vidi, najveća greška u položaju izvora je za treći model transformatora u Ansys HFSS-u. Ona je 2,83, 6,12, 2,6 i 2,41 put veća nego za 1., 2., 4. i 5. model transformatora u Ansys HFSS-u, respektivno, kao i 11,33 puta veća nego u MATLAB modelu. Može da se zaključi, da magnetno jezgro u 3. modelu u Ansys HFSS-u dovodi do najvećih grešaka među vremenima pristizanja signala do prijemnih antena u odnosu na sve ostale modele transformatora, i kada ima još više i kada ima još manje metalnih prepreka i kada su izvor i antene tačkasti.

Greška položaja izvora parcijalnih pražnjenja u modelu 1 u Ansys HFSS-u je 4 puta veća, zbog uticaja međusobnih usmerenja i položaja prijemnih antena u odnosu na predajnu antenu, nego u modelu u MATLAB-u. Greška položaja izvora u modelu 1 je 2,16 puta veća nego u modelu 2 u Ansys HFSS-u, uprkos dodatnom uticaju odbijenih talasa sa metalnih zidova suda na ukupne signale na prijemnim antenama, zbog povoljnijih

vrednosti vremenskih razlika u prispelosti signala na UHF davačima 1–4. Vidi se da je trofazni VN namotaj uticao na povećanje greške položaja izvora za 1,08 puta u 5. modelu u odnosu na 4. model u Ansys HFSS-u.

V ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je da se ispituju:

- 1) konstrukcija energetskog transformatora koja utiče na odbijanja, difrakcije, a time i slabljenje i izobličenje talasa parcijalnih pražnjenja koji dospevaju na UHF davače;
- 2) nesavršene orijentacije i položaji prijemnih antena u odnosu na predajnik (izvor), koji utiču na dodatna slabljenja EM talasnih oblika parcijalnih pražnjenja primljenih na UHF davačima u modelima transformatora u Ansys HFSS-u, jer nije moguće ravnomerno dobro da se usmeri predajnik ka svakoj od četiri prijemne antene tako da primljeni signali na ovim antenama imaju optimalnu jačinu; i
- 3) kombinacija svih ovih činilaca, koji utiču na tačnost određivanja mesta izvora parcijalnih pražnjenja.

Zbog svih ovih činilaca trebalo je da se, u modelima transformatora u Ansys HFSS-u, analiziraju: (1) kašnjenja i vrednosti prvih vrhova signala na davačima 1–4, (2) amplitude prvih paketa signala na UHF davačima 1–4, (3) S_{11} parametar refleksije za izvor parcijalnih pražnjenja i (4) S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4. Što se tiče tumačenja ili procene stanja električne izolacije usled pojave parcijalnih pražnjenja, može da se zaključi da prikazani rezultujući signali na UHF davačima mogu da budu dodatno oslabljeni kada se koristi tipični Ansys HFSS model, najpribližniji stvarnoj konstrukciji transformatora, jer je izvor parcijalnih pražnjenja modelovan kao antena, a ne kao tačka sa ujednačenim UHF EM zračenjem u svim pravcima u odnosu na stvarno stanje koje bi moglo da nastane u transformatoru pri radu u postrojenju. Međutim, ako se odredi i mesto izvora parcijalnih pražnjenja, slabljenja primljenih signala na davačima mogu da se preciznije procene korišćenjem MATLAB simulacije za uprošćeni model transformatora.

Stvarna merenja na energetskom transformatoru sa istim osobinama nisu bila na raspolaganju za vrednovanje simulacija u ovom radu. Za izvođenje ovakvih eksperimenata na stvarnom energetskom transformatoru, veštački izvor mora biti generator impulsa velike snage ili antena koje je teško privremeno postaviti u namotaje zbog njihove složene čvrste strukture i mineralnog ulja u sudu. Pored toga, UHF davači bi bili u fiksnim pozicijama i ne bi mogli da budu usklađeni sa odgovarajućim pravcima najjačih EM talasa.

Za razliku od Ansys HFSS simulacija, u realnom energetskom transformatoru na terenu, iako je izvor parcijalnih pražnjenja tačkasti izvor sa ujednačenim zračenjem u svim pravcima, njegov položaj i tip nisu unapred poznati. Zbog toga su simulacije odličan način da se istražuju oblici, amplitude prvih vrhova i amplitude prvih paketa i slabljenja signala parcijalnih pražnjenja, i odredi položaj njihovog izvora, za različito postavljene UHF davače i pretpostavljeni izvor u modelu energetskog transformatora, jer bi to bilo teško da se uradi na stvarnom energetskom transformatoru u postrojenju ili oglednom transformatoru u laboratoriji.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dukanac, Đ. Otkrivanje i analiza signala parcijalnih pražnjenja u energetske 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, Austria, pp. 1–9, paper no. 1189, 30 November, 2021.
- [3] Dukanac, D. Extraction of partial discharge signal in predominant VHF range in the presence of strong noise in power transformer, *Electrical Engineering*, Vol. 105, No. 5, pp. 3001-3018, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01855-x>
- [4] Dukanac, D. Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 6, pp. 2266-2278, 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006996>
- [5] Dukanac, Đ. Lociranje parcijalnih pražnjenja u energetske transformatoru primenom UHF tehnike, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 73-78, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.73D>
- [6] Beura, C. P., Beltle, M., Tenbohlen S. Positioning of UHF PD Sensors on Power Transformers Based on the Attenuation of UHF Signals, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 34, No. 4, pp. 1520-1529, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2909588>
- [7] Jangjoo, M.A., Allahbakhshi, M., Mirzaei, H.R. UHF sensors positioning on the power transformer tank to enhance the partial discharge localization accuracy, *Electric Power Systems Research*, Vol. 218, Article 109174, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109174>
- [8] Umemoto, T., Tenbohlen, S. Novel Simulation Technique of Electromagnetic Wave Propagation in the Ultra High Frequency Range within Power Transformers, *Sensors*, Vol. 18, No. 12, pp. 4236, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18124236>
- [9] Xu, B., Li, Y., Zhao, J., Wang, X., Zhang, R. Simulation of propagation characteristic of ultra high frequency signals in power transformers using finite difference time domain method, in *Proc. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Changsha, China, pp. 1591-1594, 26-29 November 2015. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432496>
- [10] Shirdel, N., Akbari, A., Mirzaei, H.R., Abrishamian, M.S. Three-Dimensional Simulation of UHF Signal Propagation in Transformer using FDTD Method, in *Proc. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Torremolinos (Málaga), Spain, pp. 1–6, 11-13 May 2011. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2011.6036463>
- [11] Nobrega, L. A. M. M., Costa, E. G., Serres, A. J. R., Xavier, G. V. R., Aquino, M. V. D. UHF Partial Discharge Location in Power Transformers via Solution of the Maxwell Equations in a Computational Environment, *Sensors*, Vol. 19, No. 15, pp. 3435-3448, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19153435>
- [12] Liu, M., Li, Y., Zhou, Q., Yan, N., Zou, J. Study of EM Wave Propagation for Transformer PD Monitoring Using FDTD Method, *Advanced Materials Research*, Vol. 614/615, pp. 1153-1157, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.614-615.1153>
- [13] Dukanac, D. Determination of the Location of Partial Discharges in the Power Transformer Model Using UHF Sensors, in *Proc. 4th CIGRE SEERC Conference*, Istanbul, Türkiye, pp. 192-202, Art. ID: 87, 11-12 October 2023.
- [14] Dukanac, Đ. Power Transformer Numerical Modelling to Locate Partial Discharge Source Using the UHF Technique, *B&H Electrical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 24–31, 2023. <https://sciendo.com/pl/article/10.2478/bhee-2023-0009> [pristupljeno 06.03.2024]
- [15] Dukanac, Đ. Analiza uticaja aktivnih delova energetskeg transformatora na prostiranje signala od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 74-80, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.74D>
- [16] Dukanac, Đ. Numeričko modelovanje energetske transformatora u svrhu procene mesta parcijalnih pražnjenja UHF metodom, in *Proc. 16. savjetovanje BH K/O CIGRE*, Neum, Bosna i Hercegovina, strane 1–10, R.A2.01., 22–25.10.2023.

AUTOR/AUTHOR

Đorđe Dukanac – doktor elektrotehnike i računarstva, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, djordje.dukanac@ems.rs, ORCID [0000-0002-1090-3129](https://orcid.org/0000-0002-1090-3129)

Influences of Reflections and Diffractions of Waves and the Modelled Source and UHF Sensors When Locating Partial Discharges in a Power Transformer

Abstract – In this paper, the propagation of ultra-high frequency (UHF) electromagnetic (EM) waves and the determination of the location of partial discharges (PDs) in the power transformer were analysed in detail using six simulation models of the power transformer filled with mineral oil. Five models of varying complexity were tested in Ansys HFSS and one simplified model in MATLAB. Based on the results of their comparison, appropriate conclusions were drawn. Various factors were taken into account in the models in Ansys HFSS, including the number and type of transformer components present. These factors were 1) wave reflections from the steel tank, 2) wave reflections from and diffractions around the magnetic core, 3) wave reflections from and diffractions around and through the three-phase windings, and 4) mutual positions and orientations of the receiving antennas to the transmitting antenna. They affected: a) the distortions, values and delays of the first peaks, and b) the amplitudes of the first signal packets at the four UHF sensors placed differently, in relation to the imaginary model when the tank of the power transformer is transparent. Dipole antennas were used for the PD source and UHF sensors. In the MATLAB model, the source is a point, while the sensors are represented by their phase centres. Using the model in MATLAB, the influence of imperfect mutual positions and spatially non-symmetrical total gain diagrams of the transmitting antenna and receiving antennas in the models in Ansys HFSS, in terms of additional attenuation of the received signals at the sensors, was evaluated. The dimensions of the tank and the position of the PD source and UHF sensors in the models in Ansys HFSS were the same as those in the MATLAB model.

Index terms – Partial discharges (PDs), Signal propagation, Power transformer, Ultra-high frequency (UHF) sensor, First peak, Source location