

Otkrivanje i analiza signala parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru *UHF* metodom

Detection and analysis of a partial discharge signal in the power transformer using *UHF* method

mr Đorđe Dukanac, dipl.inž.el.

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, Srbija
djordje.dukanac@ems.rs

Sažetak- U ovom radu predstavljeno je praktično otkrivanje signala parcijalnih pražnjenja pomoću *UHF* davača montiranog na energetskom transformatoru i izvršena je detaljna analiza signala. U prvom delu rada, opisani su mogući izvori parcijalnih pražnjenja u energetskim transformatorima, *UHF* metoda i *UHF* davač.

U drugom delu rada, razmatran je primljeni signal na *UHF* davaču. Da bi se tačno odredila jačina parcijalnih pražnjenja, posebno ako je položaj izvora parcijalnih pražnjenja daleko od mesta *UHF* davača, potrebno je da se razdvoji signal od okolnog šuma. To je jedino moguće u razmacima između pojedinih izbijanja posmatranih parcijalnih pražnjenja. Razmatran je spektralni sastav primljenog signala i utvrđena metoda za odvajanje prisutnog šuma od komponenata korisnog signala parcijalnog pražnjenja. Procenjen je mogući glavni uzrok parcijalnih pražnjenja.

Ključne reči- energetski transformator, parcijalna pražnjenja, spektralni sastav, otkrivanje signala, *UHF* davač.

Abstract- This paper presents the practical detection of partial discharge signals using a *UHF* sensor mounted on a power transformer and then the detailed analysis of a signal is done. The first part of the paper describes possible partial discharge sources in power transformers, *UHF* method and *UHF* sensor. In the second part of the paper, received signal at *UHF* sensor is considered. In order to accurately determine the magnitude of the partial discharge signal, especially if the location of the partial discharge source is far from the location of the *UHF* sensor, it is necessary to separate the signal from the background noise. This is only possible at intervals between individual bursts of the observed partial discharges. The spectral composition of the received signal is considered and a method for separating the present noise from the useful components of the partial discharge signal is established. The presumable main cause of partial discharges is evaluated.

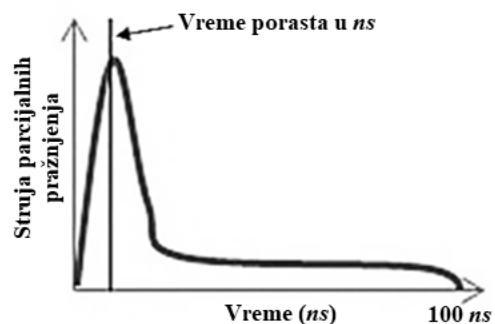
Key words- power transformer, partial discharge, signal detection, spectral content, *UHF* sensor.

I. UVOD

Parcijalna pražnjenja su posledica sakupljanja lokalnog električnog naelektrisanja (napreznja, opterećenja) na površini izolacije ili u samoj izolaciji. To je u stvari iskrenje u okviru oštećenja u izolaciji npr. u šupljini, koja može da bude ispunjena vazduhom ili gasovima.

Parcijalna pražnjenja nastaju u početnoj fazi oštećenja visokonaponske izolacije i smatraju se najboljim početnim pokazateljem propadanja elektroizolacije. Uopšte, takva pražnjenja se pojavljuju kao impulsi koji imaju trajanje mnogo manje od $1\mu s$.

Kada započnu parcijalna pražnjenja, pojaviće se visokofrekventni prelazni strujni impulsi (slika 1) i trajaće od par nanosekundi do mirosekunde, a onda će da nestanu i ponovo će da se pojave uzastopno kada naponski sinusni talas prolazi kroz nulu. Pošto se elektroni kreću brzinom bliskoj brzini svetlosti, tj. izuzetno brzo duž malog rastojanja, impuls ima veoma kratko trajanje, obično nekoliko mikrosekundi. Elektroni nose naelektrisanje, tako da svako pojedinačno pražnjenje stvara strujni impuls ($i = \frac{dq}{dt}$).

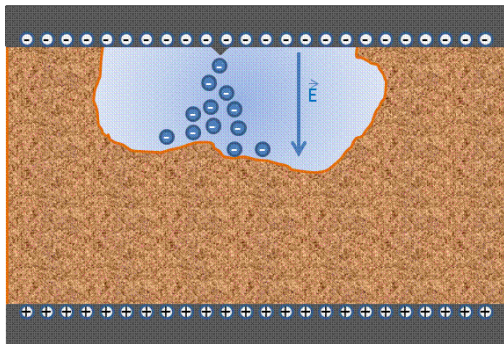


Slika 1 – Jedan teorijski predviđen strujni impuls parcijalnih pražnjenja, koji ima vreme porasta i širinu impulsa u nanosekundnom opsegu praćen sa dugotrajnim impulsom male amplitude.

Kada se pojavi impuls parcijalnih pražnjenja, postoji veoma brz protok elektrona sa jedne strane gasom napunjene šupljine ka

drugoj strani (slika 2). Parcijalna pražnjenja se dešavaju blizu vršnog napona i pozitivnog i negativnog.

Kako se proboj izolacije pogoršava, interval između kraja izbivanja i početka sledećeg izbivanja će da se skрати, usled događanja proboda pri nižim naponima. Struja parcijalnih pražnjenja je određena pomoću amplitude i , što je važnije, pomoću vremena porasta strujnih impulsa.



Slika 2 – Proces pražnjenja u pripojenoj šupljini.

Parcijalno pražnjenje predstavlja samo delimičan proboj izolacije. U parcijalna pražnjenja ne spada npr. električni luk koji u potpunosti premošćuje izolaciju između provodnika.

Parcijalna pražnjenja (izbijanja) se javljaju u:

1. izolatorima od čvrstog materijala,
2. tečnostima (npr. transformatorsko ulje) i
3. gasovima (npr. vazduh, gas SF_6).

S obzirom na pouzdanost električne mreže, energetski transformatori mogu da se smatraju glavnim delom postrojenja za proizvodnju električne energije, prenosnih sistema i velikih industrijskih postrojenja. Pouzdan rad energetskih transformatora je važan za sigurnost napajanja i u velikoj meri zavisi od stanja električne izolacije.

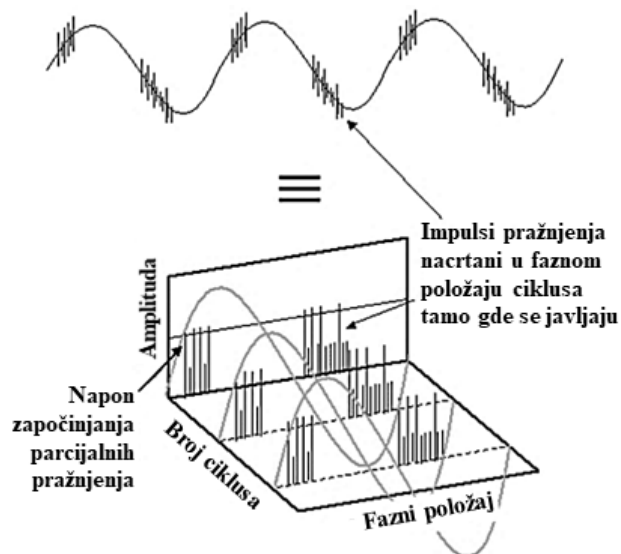
Pouzdanost električne izolacije energetskog transformatora zavisi od uslova starenja izazvanih radnim električnim naprežanjem, toplotnim naprežanjem usled preopterećenja, mehaničkim naprežanjem usled elektro-magnetskih vibracija namotaja i jezgra transformatora, kao i od svih zagađivača (provodnih ili neprovodnih) prisutnih u tečnoj izolaciji, što može da prouzrokuje električno prenaprežanje izolacionog sredstva putem započinjanja lokalnih parcijalnih pražnjenja.

II OTKRIVANJE PARCIJALNIH PRAŽNENJA

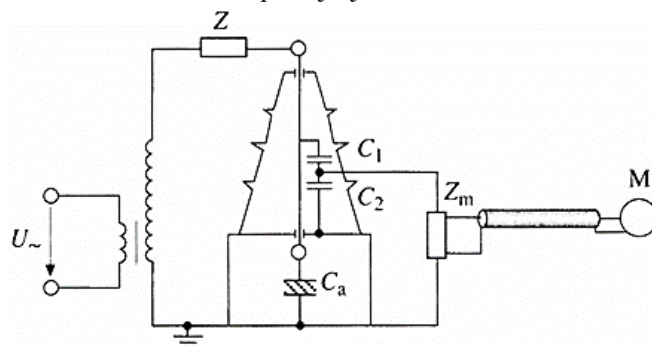
Otkrivanje parcijalnih pražnjenja je veoma rasprostranjena tehnika procene stanja električne izolacije energetskog transformatora. Čak i pri nazivnim naponima, ove mikroskopske jonizacije dovode do malih strujnih impulsa koji mogu da se otkriju u energetskom transformatoru. Stoga su parcijalna pražnjenja takođe nagoveštaj starenja energetskog transformatora. Pored toga, energija koju oslobađaju parcijalna pražnjenja može da izazove dalje pogoršanje stanja električne izolacije.

Ako oštećenja električne izolacije ne budu otkrivena i popravljena, početni kvarovi mogu da prouzrokuju da energetski transformator radi izvan svojih nazivnih parametara, što na kraju dovodi do katastrofalnog kvara [1-3] koji neće da uzrokuje samo oštećenje okolne opreme i postrojenja, nego će takođe da ima za posledice: propisane kazne, gubitak prihoda i nezadovoljstvo kupaca.

Samo je električna metoda na nižim učestanostima neposredna metoda merenja parcijalnih pražnjenja, što znači da se pomoću nje dobijaju tačni podaci o ispitnim pojavama, tj. vrednost prividnog naelektrisanja. Za ovo klasično otkrivanje parcijalnih pražnjenja pomoću dijagrama fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja (slika 3) zahtevaju se električne veze za ispitnu opremu (slika 4) i ono je osetljivo na mnoge izvore šuma [4]. Za prevazilaženje ovih problema predlaže se ispitivanje tehnikom ultra visoke učestanosti.



Slika 3 – Dijagram fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja.



Slika 4 – Merenje na izvodu izvodnog izolatora:

U_{\sim} – izvor naizmeničnog napona, Z – zaprečna impedansa po izboru, C_k – sprežni kondenzator, Z_m – merna impedansa, M – merni instrument i C_a – uopšteni objekat ispitivanja.

Mogućnosti umreženog nadgledanja parcijalnih pražnjenja u pogonu, ispitivanja signala parcijalnih pražnjenja na mestu

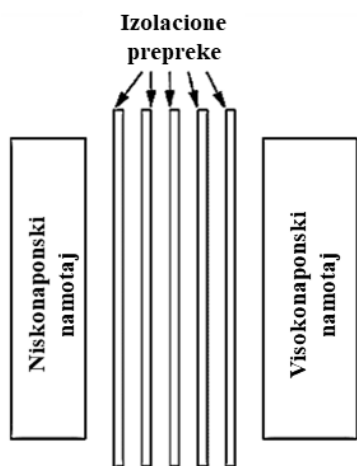
ugradnje i određivanja mesta izvora parcijalnih pražnjenja [5, 6] u izolaciji energetskog transformatora najvažnije su prednosti nekonvencionalne UHF metode u poređenju s konvencionalnim električnim metodama zasnovanim na standardu IEC 60270.

Veoma važna osobina analize parcijalnih pražnjenja je prepoznavanje izvora parcijalnih pražnjenja. Opšte je prihvaćeno da se značajna pomoć u utvrđivanju kvara posredstvom parcijalnih pražnjenja može da dobije odgovarajućim prepoznavanjem izvora parcijalnih pražnjenja [7,8].

III. MOGUĆI UZROCI PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

U moguće nedostatke koji bi mogli da prouzrokuju štetna parcijalna pražnjenja u energetskom transformatorima spadaju:

- 1) *Korona u ulju (zbog metalne oštre ivice (šiljka))*. Nedostatak može da bude oštra neravnina (šiljak) na metalnom delu ili namotaju transformatora koji je načinjen tokom proizvodnje ili održavanja. On će lokalno da prouzrokuje veću jačinu električnog polja i da dovede do parcijalnih pražnjenja [9].
- 2) *Površinsko pražnjenje u ulju*. Prešpan se često koristi u energetskim transformatorima kao izolacija. Između namotaja visokog napona i niskog napona postoji procep koji je dalje podeljen na više uljnih kanala pomoću čvrstih izolacionih prepreka-barijera (slika 5). Ovo kombinovanje ulja i prešpana daje veću dielektričnu čvrstoću nego njihova pojedinačna primena. Međutim, usled složenosti konstrukcije transformatora postoje mesta gde je komponenta električnog polja paralelna sa površinom izolacije. Ovo značajno umanjuje dielektričnu čvrstoću i mogu da se jave površinska pražnjenja.



Slika 5 – Kanal između namotaja različitih naznačenih napona izdvojen pomoću izolacionih prepreka.

- 3) *Metalni deo na slobodnom „plivajućem“ potencijalu*. Parcijalna pražnjenja usled ovog nedostatka se javljaju u zazoru između dva provodna dela sa razlikom u potencijalima, kao rezultat kapacitivne sprege.

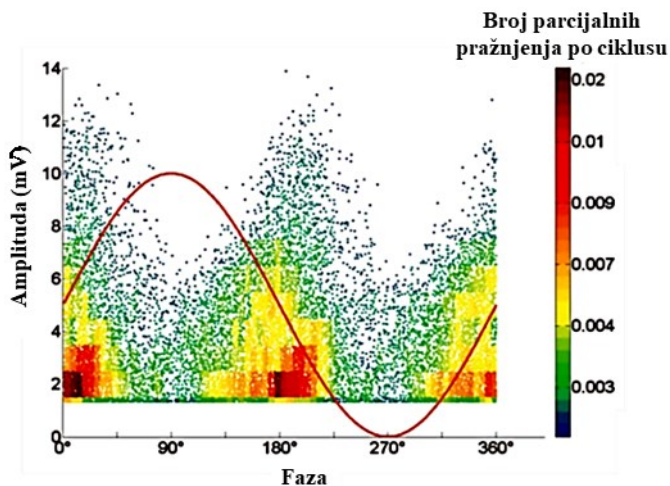
- 4) *Šupljine, stvaranje pukotina u čvrstoj izolaciji (papiru ili prešpanu), ili raslojavanje međupovršina čvrste izolacije*. Šupljine unutar čvrste izolacije (između slojeva papira ili prešpana) mogu da se pojave usled loše proizvodnje ili usled starenja izolacionog materijala. Obično je električno polje unutar šupljine jače nego električno polje u okolnom izolacionom materijalu. Dejstvo parcijalnih pražnjenja u šupljini tokom vremena postepeno pogoršava stanje izolacije.
- 5) *Slobodni mehurići u ulju*. Mineralna ulja imaju važnu ulogu kao rashladna i izolaciona sredstva u visokonaponskim transformatorima. Kada temperatura unutar izvodnog izolatora poraste usled opterećenja, azot iz prostora za širenje ulja se rastvara u ulju. Ako se opterećenje ukloni i izvodni izolator se brzo ohladi, ulje postaje prezasićeno sa azotom i u ulju mogu da se razviju mehurići. Prisustvo ovih mehurića u ulju ima uticaja na smanjenje dielektrične čvrstoće ulja.
- 6) *Male slobodne metalne i nemetalne čestice u ulju*. Neprovodne čestice su obično mikrovlakna i prah nastao od površina izolacije od prešpana ili papira. One slabe dielektričnu čvrstoću ulja usled njihove veće relativne dielektrične propustljivosti u odnosu na ulje i higroskopne prirode. S druge strane, provodne čestice kao što su npr. od čelika, alumunijuma, bakra i druge mogu da budu najštetnije čestice u uljnoj izolaciji transformatora. Ove provodne čestice mogu da budu uvedene u transformatorsko ulje tokom proizvodnje ili održavanja ili zbog habanja metalnih delova unutar sistema za hlađenje ulja tokom rada transformatora [10,11].

IV. UHF METODA

Tehnološki napreci i istraživanja doveli su do metode za ispitivanje parcijalnih pražnjenja pomoću elektro-magnetskih UHF davača [12]. Glavne osobine nekonvencionalne UHF metode su procena i analiza pojava parcijalnih pražnjenja u izolacionom sistemu energetskog transformatora na mestu ugradnje pod naznačenim uslovima rada u pogonu.

Sa ovom metodom se dobija odziv na pojedinačne impulse parcijalnih pražnjenja i sa njom je moguće da se koriste ustanovljene metode analize parcijalnih pražnjenja, kao što su one zasnovane na dijagramima fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja (slika 6).

UHF metoda ispitivanja u suštini ima odziv na pokretačku silu (dinamiku) naelektrisanja strujnih impulsa parcijalnih pražnjenja. UHF davač ima odziv na elektro-magnetske talase odaslate od strane parcijalnih pražnjenja, kao rezultat naglog ubrzanja ili usporavanja naelektrisanja pod uticajem električnog polja na mestu parcijalnih pražnjenja. Prema tome, signali primljeni pomoću UHF davača su obično srazmerni vremenskom izvodu struje parcijalnih pražnjenja, koji je određen pomoću količine naelektrisanja u pojedinačnim impulsima i što je važnije pomoću vremena porasta strujnih impulsa.



Slika 6 - Primer dijagrama fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru naznačene snage 120 MVA i prenosnog odnosa 110/10 kV.

U praktičnim primenama se uglavnom koriste dve tehnologije davača UHF signala za otkrivanje parcijalnih pražnjenja u unutrašnjosti energetskih transformatora.

Najčešće su u upotrebi:

- 1) *Ventilski UHF davač* [13], tzv. transformatorska UHF sonda, za ugradnju kroz uljni propusni ventil, čak i kada je transformator u radu u pogonu (slika 7). Usled ograničenja koje se nameće pomoću uljnog propusnog ventila za prečnik sonde, ovaj uređaj je prosta jednopolna antena.
- 2) *Unutrašnji UHF davač*, tzv. prozorski UHF davač, koji naknadno može da se ugradi u unapred obezbeđenom prozoru od dielektrika na zidu transformatorskog suda i koji sadrži antenu konstruisanu u obliku Arhimedove spirale antene ili Hilbertove fraktalne antene.

Najčešći oblik je četvrt-talasna jednopolna antena, za koju je dužina antene četvrtina talasne dužine UHF talasa ($L = 0,25 \cdot \lambda$). Na taj način, ako su rezonantne učestanosti jednopolne antene 500 MHz i 1 GHz, onda bi njene dužine radi korišćenja u ulju trebale da budu 100 mm i 50 mm, respektivno.



Slika 7 – Ventilski UHF davač signala parcijalnih pražnjenja u ulju korišćen u nadalje opisanom ogledu.

V. OGLED OTKRIVANJA PARCIJALNIH PRAŽNENJA

S obzirom na moguća ograničenja konvencionalne metode ispitivanja na mestu ugradnje prema standardu IEC 60270, koja je osetljiva na spoljni šum, metoda ispitivanja pri ultra visokim

učestanostima je povoljna za nadziranje i ispitivanje signala parcijalnih pražnjenja na mestu ugradnje usled njene velike otpornosti na spoljne elektromagnetske smetnje, zbog viših opsega učestanosti na kojima se javljaju VHF i UHF signali u odnosu na smetnje.

Cilj izvršenog ogleda bio je otkrivanje signala parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru (slika 8) pomoću ugrađene UHF antene u obliku sonde u uljno-propusnom ventilu, snimanje signala u zavisnosti od vremena i analiza tako dobijenog signala parcijalnih pražnjenja.



Slika 8 – Blok transformator naznačene snage 725 MVA.

Mernu opremu (slika 9) su sačinjavali UHF davač za otkrivanje parcijalnih pražnjenja u obliku sonde i digitalni osciloskop za naznačeni analogni propusni opseg 1 GHz, brzinu porasta impulsa 350 ps, brzinu uzimanja uzoraka 10 GS/s i vremensku rezoluciju 100 ps. Za vezu između UHF antene i digitalnog osciloskopa korišćen je koaksijalni kabl (dužine 30 cm).



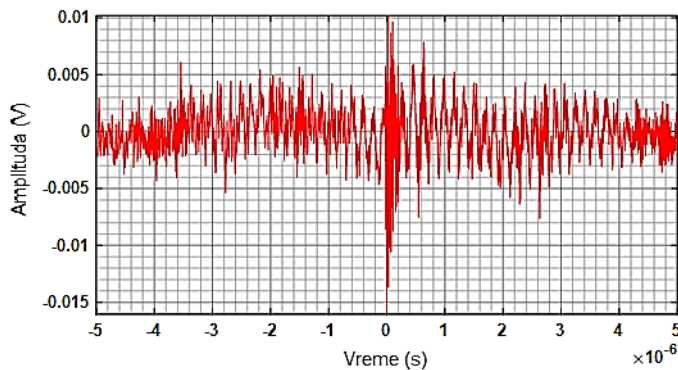
Slika 9 – Merna oprema korišćena prilikom izvođenja ogleda otkrivanja parcijalnih pražnjenja.

Prilikom ispitivanja parcijalnih pražnjenja, impedanse UHF antene i koaksijalnog kabla od po 50 Ω bile su usklađene sa impedansom digitalnog osciloskopa od 50 Ω. Usaglašavanjem impedansi ispitne opreme sa karakterističnom impedansom kabla

smanjuju se odbijanja signala (tj. ona se potpuno uklanjaju ako je usaglašenost savršena) i prenos snage signala je najveći mogući.

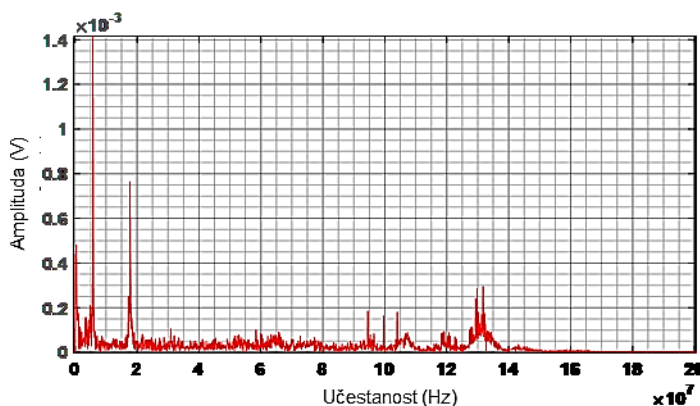
VI. ANALIZA PARCIJALNIH PRAŽNENJA

Na slici 10 prikazan je snimljeni signal parcijalnih pražnjenja u prisustvu smetnji, u trajanju od $10 \mu s$, iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta, u kome su parcijalna pražnjenja najveće amplitude sa početkom u blizini $x = 0$ i u kome su pri tome trenuci pojavljivanja amplituda signala ostali nepromenjeni.



Slika 10 – Signal parcijalni pražnjenja iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta.

Na slici 11 prikazan je amplitudni spektar primljenog signala sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta.

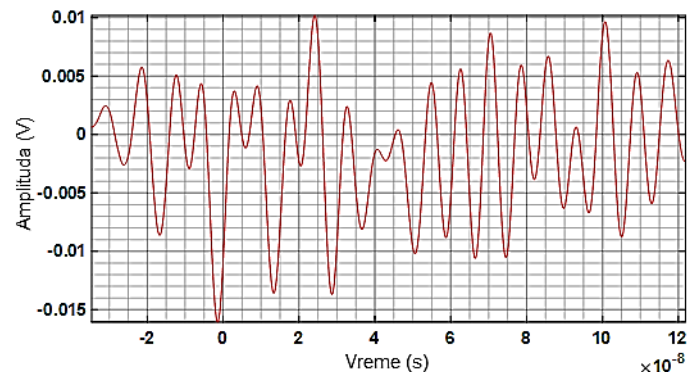


Slika 11 – Amplitudni spektar signala parcijalnih pražnjenja sa prethodne slike 10.

Sa slike 11 vidi se da znatno preovladava komponenta signala na učestanosti $5,7 \text{ MHz}$. Zatim prema veličini amplitude slede komponente na učestanostima $17,7 \text{ MHz}$, 400 kHz , 100 kHz , $17,2 \text{ MHz}$ i $17,4 \text{ MHz}$, respektivno. U delu signala u trajanju od $10 \mu s$, $67,2 \%$ srednje snage nalazi se u opsegu $(0 - 20) \text{ MHz}$, dok se preostalih $32,8 \%$ nalazi u opsegu $(20 - 200) \text{ MHz}$.

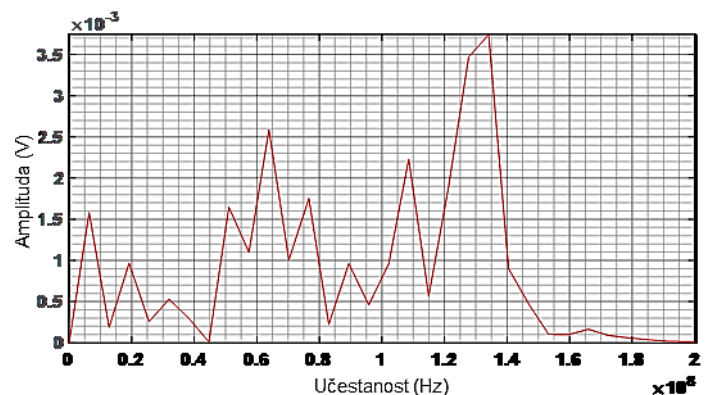
Na slici 12 prikazan je deo primljenog signala sa slike 10, u trajanju od $156,5 \text{ ns}$, iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta i u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja, a na slici 13 odgovarajući amplitudni spektar. U delu signala $83,3$

% srednje snage nalazi se u opsegu $(20 - 200) \text{ MHz}$, dok se preostalih $16,7 \%$ nalazi u opsegu $(0 - 20) \text{ MHz}$.



Slika 12 – Srednji deo primljenog signala sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta, a u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja u trajanju od $156,5 \text{ ns}$.

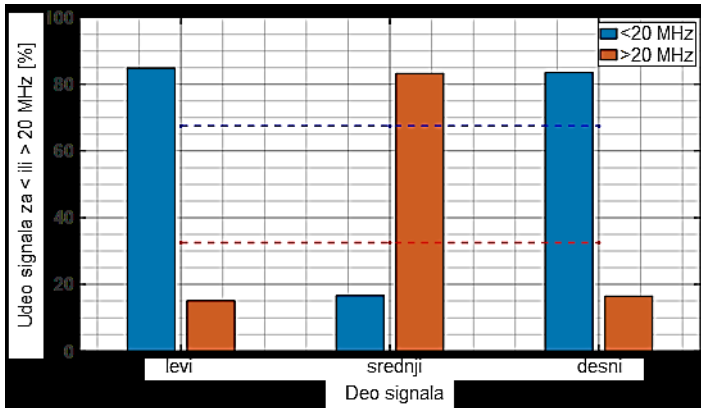
Sa slike 13 vidi se da preovladava komponenta signala na učestanosti $134,1 \text{ MHz}$. Zatim prema veličini amplitude slede komponente na učestanostima $63,86 \text{ MHz}$, $108,6 \text{ MHz}$, $76,63 \text{ MHz}$, $51,09 \text{ MHz}$, $6,386 \text{ MHz}$, $19,16 \text{ MHz}$ i $89,4 \text{ MHz}$, respektivno.



Slika 13 – Amplitudni spektar dela primljenog signala u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja.

U odnosu na amplitudni spektar potpunog signala sa slike 10, vidi se više nego desetostruki porast komponenti signala na učestanostima u blizini $134,1 \text{ MHz}$, $108,6 \text{ MHz}$, $76,63 \text{ MHz}$, $63,86 \text{ MHz}$, $51,09 \text{ MHz}$, itd. Vidi se i četiri i po puta veća komponenta na učestanosti u blizini $31,92 \text{ MHz}$, što znači da ima veze sa spektrom u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja. Komponente signala na učestanostima 100 kHz i 400 kHz su zanemarljive.

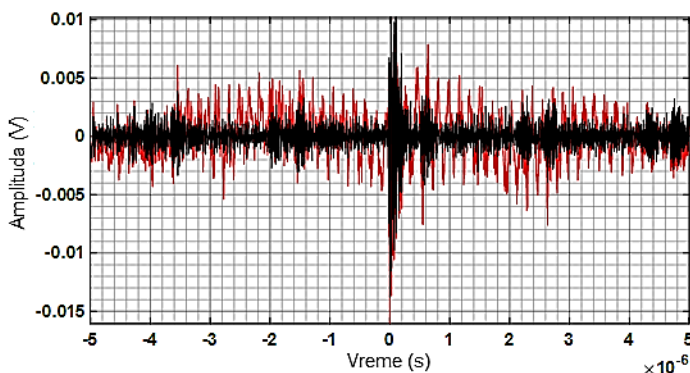
Na slici 14 dati su procentualni udeli srednje snage u ukupnoj srednjoj snazi, u opsezima: 1) ispod 20 MHz i 2) iznad 20 MHz , za primljeni signal sa slike 10 u njegovom levom, srednjem i desnom delu, respektivno.



Slika 14 – Procentualni udeli srednje snage u ukupnoj srednjoj snazi primljenog signala, u opsezima: 1) ispod 20 MHz i 2) iznad 20 MHz, u periodima levo od, u okviru i desno od oblasti najjačeg parcijalnog pražnjenja. Isprekidanim linijama su date vrednosti za ukupan signal sa slike 10 u trajanju od 10 μ s.

Sa slike 14 vidi se da je jedan deo smetnji sa udelom manjim od 20% ostao prisutan u delu sa najjačim parcijalnim pražnjenjima. S druge strane, u delovima primljenog signala u kome prevladavaju smetnje udeo signala na učestanostima većim od 20 MHz je takođe manji od 20%.

Na slici 15 prikazan je uporedo signal (crvene boje) sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta i isti signal (crne boje) iz koga su uklonjene sve komponente ispod 20 MHz. Primećuje se značajna razlika u izgledu signala.



Slika 15 – Crvenom bojom prikazan je signal sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta, a crnom bojom isti signal sa slike 10 najviše amplitude -13,79 mV iz koga su uklonjene sve komponente učestanosti ispod 20 MHz.

VII. ZAKLJUČAK

Bilo je potrebno da se utvrdi opseg vremena u kome se javlja najjače parcijalno pražnjenje i razdvoji šum od korisnog signala radi procene stvarne jačine korisnog signala i njegovog spektralnog sastava. Pri razmatranju pojave najjačeg dejstva signala parcijalnih pražnjenja u ovom primeru, utvrđeno je da mogu da se zanemare komponente primljenog signala pomoću UHF davača koje su ispod 20 MHz, a koje se smatraju smetnjama nastalim npr. zbog pražnjenja korone izvan transformatora. Najjača parcijalna pražnjenja (koja jasno

prevazilaze dejstvo smetnji) u svom spektru imaju znatno prevladavajuću komponentu na veoma visokoj učestanosti najveće amplitude 134,1 MHz.

Veoma je teško da se sa potpunom sigurnošću proceni od koje vrste oštećenja u električnoj izolaciji potiču parcijalna pražnjenja dobijena u ogledu, pošto se obično dobijaju slični oblici signala koji mogu da potiču od raznih vrsta oštećenja električne izolacije. Prema dosadašnjim istraživanjima oblika signala čiji su uzrok razna oštećenja izolacije i koja mogu da se nađu kod drugih autora, grubo posmatrajući, ovaj oblik i opseg učestanosti korisnog signala dobijenog u ogledu najverovatnije potiču od kretanja slobodne čestice u ulju. S druge strane, sa jednim davačem signala ultra visokih učestanosti ne može da se proceni položaj izvora parcijalnih pražnjenja, za šta je potrebno više davača (obično četiri).

LITERATURA

- [1] M. Wang, A. J. Vandermaar and K. D. Srivastava, "Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 6, pp. 12-25, 2002.
- [2] C. J. Ribeiro, A. P. Marque, C. H. B. Azevedo, D. C. P. Souza, B. P. Alvarenga, R. G. Nogueira, "Faults and Defects in Power Transformers – A Case Study," IEEE Electr. Insul. Conf.(EIC), pp. 142-145, 2009.
- [3] S. T. Jan, R. Afzal, and A. Z. Khan, "Transformer Failures, Causes & Impact," Int. Conf. Data Mining, Civil and Mechanical Engineering, 2015.
- [4] V. Sokolov, V. Mayakov, G. Kuchinsky, A. Golubev, "On-Site Partial Discharge Measurements on Power Transformers," 67th Annu. Int. Conf. Doble Clients, 2000.
- [5] Đ. Dukanac, „Primena UHF davača za određivanje mesta parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru“, Zbornik radova sa međunarodne konferencije „Energy and Ecology Industry“, Beograd, str. 214-221, 10-13. oktobar 2018., ISBN: 978-86-7466-751-4 (AM).
- [6] Đ. Dukanac, „Efekti poboljšane UHF metode pronalaženja mesta parcijalnih pražnjenja energetskog transformatora“, Zbornik radova sa VII regionalne konferencije IEEP '19 „Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern European Countries“, Zlatibor, str. 263-270, 19-22. jun 2019., ISBN 978-86-7877-033-3.
- [7] Li, J., T. Jiang, R. F. Harrison, and S. Grzybowski, "Recognition of ultra high frequency partial discharge signals using multi-scale features," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 4, 1412-1420, 2012.
- [8] Kunicki M., Cichoń A., Nagi Ł, "Statistics based method for partial discharge identification in oil paper insulation systems," Electric Power Systems Research, Vol. 163, Part B, pp. 559-571, 2018.
- [9] R. Sarathi and G. Koperundevi, "Understanding the Discharge Activities in Transformer Oil under AC and DC Voltage Adopting UHF Technique", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 49 – 56, 2008.
- [10] R. Sarathi and R. Umamaheswari, "Understanding the partial discharge activity generated due to particle movement in a composite insulation under AC voltages," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 48, pp. 1-9, 2013.
- [11] R. Mishra, H. Muthukrishnan, A. Ramanan and R. Sarathi, "Understanding partial discharge activity in GIS due to particle movement under high frequency AC voltage adopting UHF technique" 6th International conference on Industrial and Information Systems, ICIIIS 2011, pp. 93-97, Sri Lanka, Aug. 16-19, 2011.
- [12] H. Y. Lee, J. R. Jung, Y. M. Kim and H. J. Yang, "A UHF PDM (Partial Discharge Monitoring) System for High Voltage Power Transformer," IEEE Int. Conf. Condition Monitoring and Diagnosis (ICCMD), pp. 1021-1024, 2014.
- [13] R. Albarracín, J. A. Ardila-Rey and A. A. Mas'ud, "On the Use of Monopole Antennas for Determining the Effect of the Enclosure of a Power Transformer Tank in Partial Discharges Electromagnetic Propagation," Sensors (Basel), vol. 16, no. 2, 2016.