

## Razvoj i verifikacija programskog alata za određivanje lokacije parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru akustičkom metodom

Vladimir Polužanski<sup>1</sup>, Uroš Kovačević<sup>2</sup>, Nenad Kartalović<sup>1</sup>, Dragan Kovačević<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, Beograd

<sup>2</sup> Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu  
11000 Beograd, Srbija  
[vladimir.poluzanski@ieent.org](mailto:vladimir.poluzanski@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu se razmatra razvoj i verifikacija programskog alata za određivanje lokacije parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru akustičkom metodom. Prikazana je, na početku, klasifikacija, sistematizacija fizičkih principa, metoda detekcije i ispitivanja parcijalnih pražnjenja u oblasti energetskih transformatora. Analizirane su mogućnosti primene akustičke metode za određivanje lokacije parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru i navedeni matematički modeli, algoritmi i realni problemi koji utiču na tačnost merenja. Opisan je razvoj i realizacija programskog alata za određivanje lokacije parcijalnog pražnjenja u energetsom transformatoru na osnovu neiterativnog matematičkog algoritma. Verifikacija rada i tačnost merenja realizovanog programskog alata izvršena je pomoću računarske simulacije ali i poređenja sa eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi.

**Ključne reči:** energetski transformator, lokacija parcijalnih pražnjenja, akustička metoda, aplikativni softver, Visual C#

### 1. Uvod

Energetski transformator predstavlja jednu od najvrednijih i najznačajnijih komponenti u elektroenergetskom sistemu. Kvarovi na energetsom transformatoru mogu dovesti do potpunog prekida napajanja i u velikoj meri uticati na pouzdanost celokupnog elektroenergetskog sistema. Održavanje elementa postrojenja na osnovu stanja ima niz pogodnosti, od kojih su najvažnije sledeće [1]:

-detekcijom kvarova u ranoj fazi, obim neophodnih kvarova se svodi na najmanju moguću meru, čime se snižava i cena vraćanja elementa u ispravno stanje,

-otklanjanje tehničke neispravnosti se može planirati, tako da se minimiziraju nepovoljni efekti prekida rada elementa,

-detekcijom kvarova u ranoj fazi, sprečava se oštećenje ostalih komponenti i nastanak kvarova koji bi doveli do oštećenja susjednih elemenata, čime se produžava vek eksploatacije transformatora. Na taj način se odlaže eventualna nabavka novog transformatora i omogućava da se po isteku planiranog veka eksploatacije obavi njegova revitalizacija, što u oba slučaja predstavlja znatne uštede.

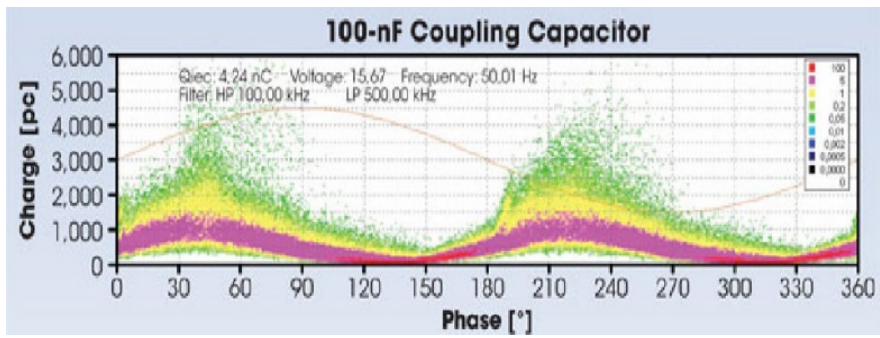
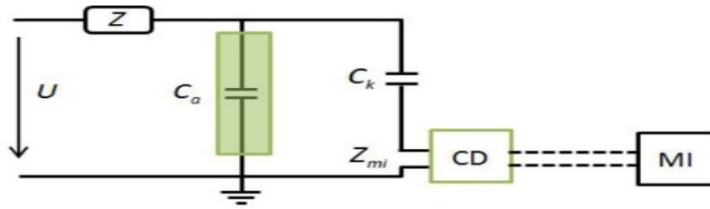
Razvoj i primena programskog alata za detekciju mesta parcijalnih pražnjenja akustičkom metodom u izolacionim sistemima energetskih transformatora, koji je predmet ovog rada, proširuje i poboljšava mogućnosti monitoringa i dijagnostike energetskih transformatora [1].

Parcijalna pražnjenja se smatraju glavnim uzrokom starenja i nastanka kvarova izolacionih sistema visokonaponske opreme, pa se stoga shvatanju suštine ovog procesa i merenju parcijalnih pražnjenja pridaje veliki značaj. Pri obradi rezultata merenja, kod monitoringa i dijagnostike stanja opreme u elektroenergetici koriste se i kompleksni programski alati [2].

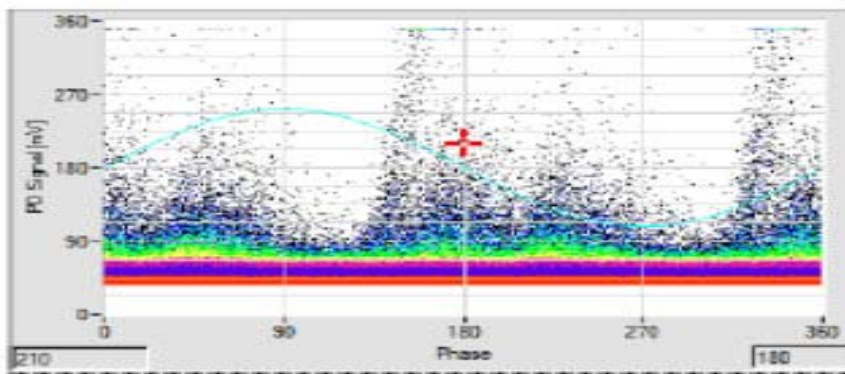
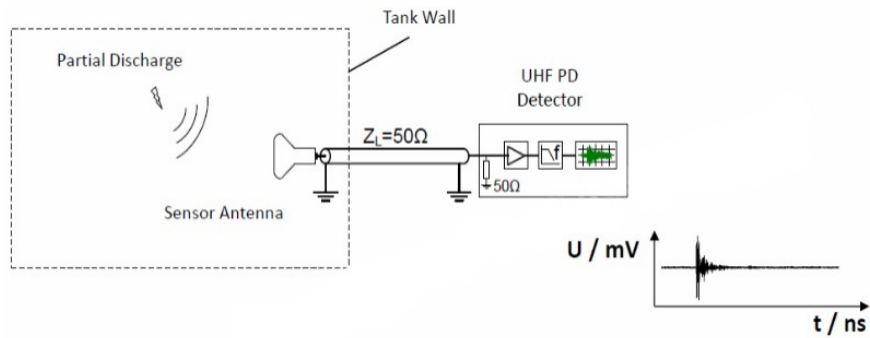
Detaljno je opisan razvoj i realizacija programskog alata, predstavljeni odgovarajući programski kodovi za neiterativnu metodu i objašnjena namena programa, tok proračuna i prikaz rezultata merenja. Realizovani programski alat primenjen je kod računarskih simulacija za proveru ispravnosti rada programskog koda u idealizovanom zamišljenom modelu transformatora sa pretpostavljenim poznatim lokacijama senzora, mesta parcijalnih pražnjenja i brzine prostiranja akustičkog talasa u ulju. Tačnost rezultata proračuna realizovanog programskog alata proverena je i na eksperimentalnim podacima dostupnim iz literature [3], i izračunate su i analizirane apsolutne greške merenja.

## **2. Akustička merenja parcijalnih pražnjenja**

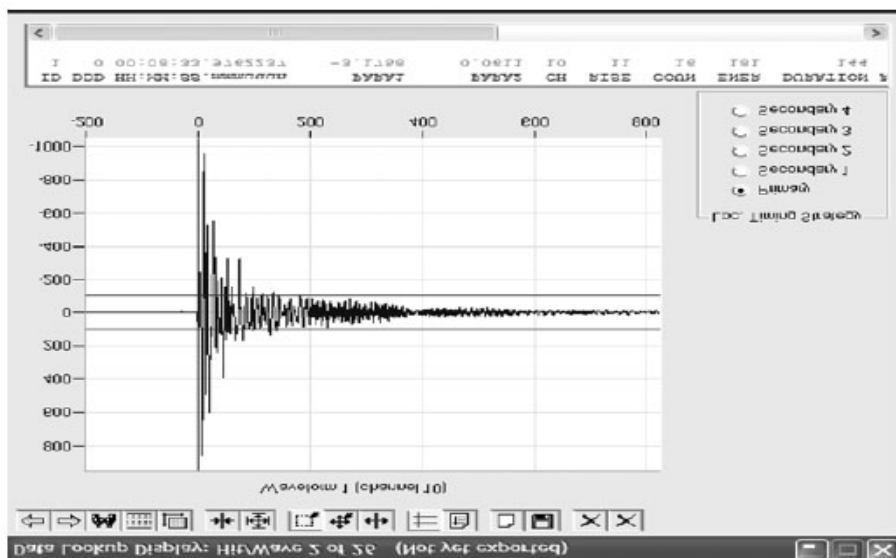
Pri parcijalnom pražnjenju unutar izolacionog sistema energetskog transformatora dolazi do pojave pratećih efekata kao što su: dielektrični gubici, promena u gasnom pritisku, hemijska promena u sastavu materijala, zvučna radijacija, optički efekti, termički efekti, elektromagnetska radijacija, pojava impulsa u strujnom kolu i pojava napona. Neki od ovih efekata su korisni pri lociranju pražnjenja, dok su drugi pogodni za određivanje intenziteta parcijalnog pražnjenja. Na Slici. 1 prikazani su električni (a), UHF (Ultra High Frequency) (b) i akustički (c) princip detekcije parcijalnog pražnjenja, kao i izgled signala dobijenog primenom ovih metoda.



(a)



(b)



(c)

Slika 1. Principi detekcije parcijalnih pražnjenja različitim metodama: (a) električna metoda, (b) UHF metoda, (c) akustička metoda

Slika 1(a) prikazuje mernu šemu električnog (konvencionalnog) načina merenja parcijalnih pražnjenja i izgled signala parcijalnog pražnjenja izražen u pC. Oznake na slici 1(a) predstavljaju respektivno U-napon napajanja, Z-filter (impedansu),  $C_a$ -kapacitivnost ispitivanog objekta, CD -sprežni uređaj, MI-merni instrument,  $C_k$ -kapacitivnost sprežnog kondenzatora i  $Z_m$ -ulaznu impedansu mernog sistema [4]. Na Slici 1 (b) prikazan je UHF princip merenja, baziran na detekciji elektromagnetnog zračenja prouzrokovanog parcijalnim pražnjenjem, i izgled signala snimljen ovom metodom. UHF princip koristi za merenje frekvencijski opseg od 300 MHz do 3 GHz, dok su signali smetnji uglavnom u nižim frekvencijskim opsezima do 250 MHz [5] [6]. Slika 1 (c) prikazuje piezo-električni senzor koji se koristi kod akustičkih merenja

parcijalnih pražnjenja i tipičan oblik akustičkog signala parcijalnog pražnjenja [5].

Električne metode detekcije parcijalnih pražnjenja odlikuju se visokim nivoom senzitivnosti pri merenju pražnjenja, dok su mane ovih metoda slaba imunost na smetnje elektromagnetnog karaktera i nemogućnost instalacije pod naponom. Neelektrične metode merenja parcijalnih pražnjenja obuhvataju akustičku, hemijsku i optičku metodu detekcije parcijalnih pražnjenja. Metod detekcije parcijalnih pražnjenja akustičkim principom odlikuje niski nivo osetljivosti na elektromagnetske smetnje, ali i slabija osetljivost pri merenju osnovnog signala u odnosu na električne metode. Akustička metoda za merenje koristi opseg od nekoliko desetina KHz do nekoliko stotina KHz. Prednost akustičke metode je i u mogućnosti montiranja akustičkih senzora na energetski transformator u pogonu bez prekida isporuke električne energije.

Akustičke metode mogu se podeliti na mešovite akustičke metode i čisto akustičke metode. Mešovite akustičke metode za trigerovanje (okidanje) signala koriste UHF ili električno detektovanje parcijalnih pražnjenja, tj. kada se UHF/električnom metodom detektuje pražnjenje započinju akustička merenja parcijalnih pražnjenja. UHF i električna merenja imaju znatno brži odziv na signal parcijalnog pražnjenja, od akustičkog merenja. Čisto akustičke metode koriste se u slučaju kada nisu dostupna električna ili UHF merenja parcijalnih pražnjenja na energetskom transformatoru i koriste samo akustička merenja.

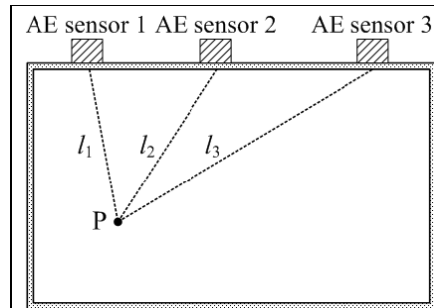
Postoje dva principa određivanja mesta nastanka parcijalnog pražnjenja u energetskom transformatoru akustičkom metodom:

- na osnovu amplitudno frekventne promene signala u toku prostiranja putanjom od izvora do senzora,

- na osnovu merenih vremena kašnjenja signala pri prostiranju od izvora pražnjenja do senzora.

Princip određivanja mesta nastanka parcijalnog pražnjenja na osnovu merenih vremena kašnjenja signala dominantno se primenjuje i daje dobre rezultate u praksi, stoga će biti detaljno analiziran u ovom radu. Ovaj princip može se primeniti na različite načine, tj. upotrebom različitih metoda za proračunavanje mesta pražnjenja od kojih su najrasprostranjeniji: metod apsolutnog vremena, metod vremenske razlike i pseudo-vremenski metod [3].

Navedeni metodi se baziraju na određivanju vremena prostiranja akustičkog signala kao što je prikazano na Slici 2. Polazeći od jednačina (1),(2) i (3), primenom matematičkih algoritama određuje se mesto nastanka parcijalnog pražnjenja u energetskom transformatoru.



Slika 2. Metod određivanja mesta nastanka parcijalnog pražnjenja na osnovu vremena kašnjenja akustičkog signala ( $P$ -mesto nastanka parcijalnog pražnjenja, AE-akustički senzori,  $l_1, l_2, l_3$ -rastojanja izvora parcijalnog pražnjenja do senzora 1,2,3)

$$I_1 = v \cdot t \quad (1)$$

$$I_2 = v \cdot (t + \Delta t_1) \quad (2)$$

$$I_3 = v \cdot (t + \Delta t_2) \quad (3)$$

U jednačinama od (1) do (3), promenljiva  $t$  predstavlja vreme dolaska akustičkog signala do senzora 1, dok  $\Delta t_1$  i  $\Delta t_2$  predstavljaju vremenska kašnjenja dolaska signala od izvora parcijalnog pražnjenja do senzora 2 i 3, relativno u odnosu na prvi senzor.

Konstrukcija transformatora, kao i materijali korišćeni za izradu delova unutar transformatora, mogu značajno uticati na način i brzinu prostiranja akustičkog talasa unutar transformatora.

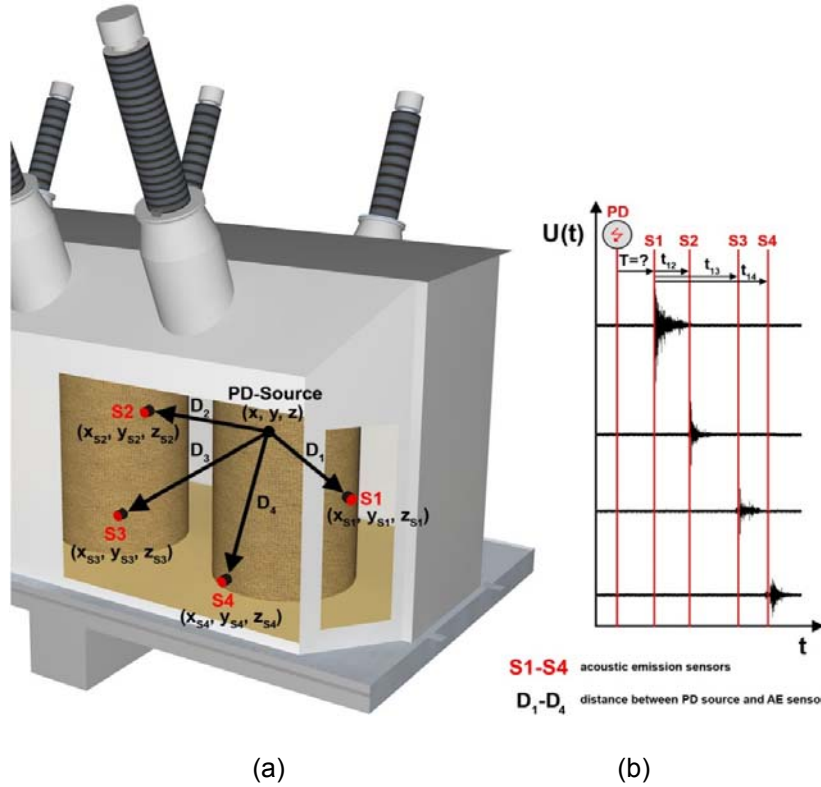
Često se pretpostavlja da je pravac prostiranja akustičkog talasa pravolinijski (direktan) od izvora do senzora. Međutim u većini slučajeva nije tako usled veoma kompleksnog prostiranja akustičkog talasa unutar transformatora zbog pojave refleksija i prelamanja u različitim materijalima. U slučaju da postoji prepreka na pravcu prostiranja talasa ka senzoru, može se desiti da se zvučni talas prostire zaobilaznom putanjom oko prepreke, što povećava vreme prostiranja talasa do senzora i unosi grešku u proračun lokacije izvora pražnjenja. U ovom slučaju može doći i do prostiranja akustičkog talasa kroz prepreku; pri ovakvom scenariju brzina zvučnog talasa bi se povećala što bi takođe uticalo na tačnost proračuna. U cilju prevazilaženja ovakvih problema neophodno je potvrditi dobijene rezultate lokacije izvora pražnjenja ponavljanjem postupka pri više različitih pozicija senzora na transformatoru.

Pri udaru akustičkog talasa u zid transformatora dolazi do kretanja talasa kroz zid i brzina talasa se povećava, ovaj problem u tehničkoj literaturi naziva se *structure-born problem* [7].

Longitudinalni talas koji emituje parcijalno pražnjenje kreće se kroz ulje konstantnom brzinom koja se smatra poznatom (1400m/s), međutim pri dodiru sa sudom transformatora dolazi do kretanja zvučnog talasa duž metalnog suda. S obzirom da je brzina prostiranja zvučnog talasa kroz metal (5900m/s longitudinalni i 3200m/s transverzalni) veća od brzine prostiranja kroz ulje može doći do greške pri merenju vremena dolaska talasa jer bi talas koji se kreće sudom mogao doći do senzora pre onoga koji se kreće kroz ulje. Naime, s obzirom da je brzina kretanja akustičkog talasa kroz zid transformatora veća od brzine pri prostiranju talasa kroz ulje dolazi do prerane aktivacije akustičkog senzora, merenja pogrešnog vremena kašnjenja akustičkog signala, a samim tim i do greške pri lociranju izvora pražnjenja.

### **3. Razvoj programskog alata za određivanje lokacije parcijalnog pražnjenja**

U ovom radu opisan je razvoj programskog alata za određivanje lokacije parcijalnog pražnjenja čisto akustičkom metodom, koja se bazira na matematičkoj obradi vremenskih razlika. Čisto akustička metoda određivanja parcijalnog pražnjenja zahteva upotrebu četiri akustička senzora koji se montiraju na zid transformatora kao što je prikazano na Slici 3 (a). Transformator se posmatra u Dekartovom koordinatnom sistemu, svaki senzor poseduje unapred poznate koordinate  $X_{Si}$ ,  $Y_{Si}$ ,  $Z_{Si}$ , ( $i=1,..4$ ), i smatra se da postoji parcijalno pražnjenje čija je lokacija označena koordinatama  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Brzina prostiranja akustičkog signala  $v$  smatra se konstantnom i zanemaruje se problem prostiranja akustičkog signala kroz druge materijale osim ulja. Na Slici 3 (b) prikazan je izgled akustičkih signala parcijalnog pražnjenja snimljenih sa četiri akustička senzora  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  $S4$  i ilustrovano je vremensko kašnjenje akustičkog signala  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{14}$  između senzora  $S1$  i  $S2$ ,  $S1$  i  $S3$ , kao i  $S1$  i  $S4$  [8].  $T$  predstavlja vreme od nastanka pražnjenja do reagovanja senzora  $S1$  i u principu nije poznato.



Slika 3. (a) 3D model transformatora sa prikazanim sensorima, izvorom parcijalnog pražnjenja i pravcima prostiranja akustičkog talasa, (b) vremensko kašnjenje akusutičkog signala do senzora S1, S2, S3 i S4.

Da bi se proračunale koordinate lokacije parcijalnog pražnjenja  $x$ ,  $y$  i  $z$  metodom vremenske razlike, potrebno je rešiti sistem nelinearnih jednačina od (4) do (7),

$$(x-x_{s1})^2 + (y-y_{s1})^2 + (z-z_{s1})^2 = (v_s \cdot T)^2, \quad (4)$$

$$(x-x_{s2})^2 + (y-y_{s2})^2 + (z-z_{s2})^2 = (v_s \cdot (T + t_{12}))^2, \quad (5)$$

$$(x-x_{s3})^2 + (y-y_{s3})^2 + (z-z_{s3})^2 = (v_s \cdot (T + t_{13}))^2, \quad (6)$$

$$(x-x_{s4})^2 + (y-y_{s4})^2 + (z-z_{s4})^2 = (v_s \cdot (T + t_{14}))^2. \quad (7)$$

Sistem nelinearnih jednačina od (4) do (7) može se rešiti iterativnim ili neiterativnim matematičkim metodom. Pri proračunu lokacije parcijalnog pražnjenja najčešći uzrok greške je netačno određivanje vremena dolaska



akustičkog signala do senzora. Kod iterativnog algoritma *metod vremenske razlike* za proračun mesta parcijalnog pražnjenja, uočene su neke mane [9]. Glavni problem je što konvergencija ovakvog algoritma zavisi od početnih uslova, i u nekim slučajevima se može dogoditi da nema razumnog rešenja. Zbog navedenih razloga razvijeni programski alat baziran je na neiterativnom postupku za rešavanje sistema nelinearnih jednačina od (4) do (7)[10]. Naime presekom bilo koje jednačine od (4) do (7) koje predstavljaju sfere dobija se polje u kome se nalazi izvor pražnjenja, zatim se dobijaju jednačine presečnih polja sfera, a eliminacijom nepoznate veličine  $T$  dobija se linija koja prolazi kroz izvor pražnjenja. Jasno je da se izvor parcijalnog pražnjenja nalazi u preseku linije i sfera. Neiterativnim metodom dobija se 20 koeficijenata koji se označavaju:  $k_1$  do  $k_{20}$ , gde je  $k_i = f(x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}, x_{S2}, y_{S2}, z_{S2}, x_{S3}, y_{S3}, z_{S3}, x_{S4}, y_{S4}, z_{S4}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, v)$ ,  $i=1, \dots, 20$ . S obzirom da postoje dve tačke preseka linije i sfera mora se usvojiti pravo rešenje. Rešavanjem jednačine (10) dobijaju se dva rešenja, odabir pogodnog rešenja vrši se zamenom  $A$  u jednačine (8) i (9). Rešenje se odbacuje ako se dobije da je vreme  $T$  negativno ili neka od koordinata parcijalnog pražnjenja  $x$ ,  $y$ ,  $z$  van granica transformatora ili negativna, dok se drugo rešenje prihvata. Tačno rešenje za  $A$  se ubacuje u jednačinu (8) i dobijaju se koordinate izvora parcijalnog pražnjenja  $x$ ,  $y$  i  $z$  u energetskom transformatoru,

$$z = A; x = k_{13}A; y = k_{14} - k_{15}A, \quad (8)$$

$$T = k_{16} - Ak_{17}. \quad (9)$$

$$A^2k_{18} + Ak_{19} + k_{20} = 0. \quad (10)$$

#### 4. Programski alat „UKVP” za određivanje mesta parcijalnog pražnjenja neiterativnom metodom

Na osnovu opisanog matematičkog proračuna u poglavlju 3 napravljen je program za određivanje lokacije parcijalnih pražnjenja unutar transformatora. Program ima sledeće funkcionalnosti:

- proračun lokacije parcijalnih pražnjenja,
  - proračun apsolutne greške,
  - tabelarni prikaz dobijenih vrednosti.
- Izvoz dobijenih podataka u Excel fajl.

Program je napisan u programskom jeziku Visual C# i razvijen pomoću alata Visual Studio 2008[11]. Korisnički interfejs programa je prikazan u obliku tri kartice od kojih jedna služi za unos ulaznih parametara i računanje položaja

parcijalnih pražnjenja, druga za prikupljanje, prikaz i izvoz rezultata u Excel datoteku a treća za grafički prikaz vrednosti (slika 4).

## 5. Testiranje i verifikacija programskog alata

Primeri primene realizovanih programskih alata izrađeni su na bazi računarskih simulacija sa podacima iz dostupne svetske literature iz razloga što su opisana istraživanja na samom početku pa rezultati realnih eksperimenata nisu dostupni.

Prednosti simulacije ogledaju se u činjenici da je to ekonomičniji način davanja odgovora u odnosu na sprovođenje eksperimenata [2]. Simulacije pomažu u korigovanju ili potvrdi *dobrog osećaja* za rešenje određenog tehničkog problema.

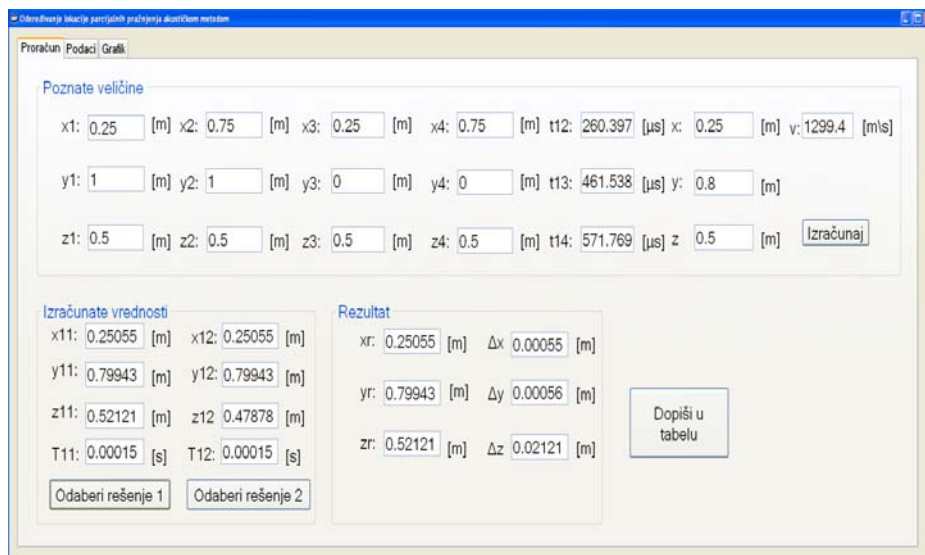
### 5.1. Računarske simulacije

Da bi se proverila funkcionalnost i karakteristike računarskog programa UKVP pristupilo se računarskoj simulaciji sa idealizovanim matematičkim podacima. Zamišljen je idealan energetski transformator dimenzija 1mX1mX1m ispunjen samo transformatorskim uljem za koje je usvojena brzina prostiranja zvuka 1299,4 m/s, usvojene su lokacije akustičkih senzora S1(0,25, 1, 0,5), S2(0,75, 1, 0,5), S3(0,25, 0, 0,5), S4(0,75, 0, 0,5). Proizvoljno su izabrane tri lokacije parcijalnih pražnjenja L1 (0,25, 0,8, 0,5), L2 (0,75, 0, 1), L3 (0,65, 0,1, 0,9). Proračunata su vremenska kašnjenja  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{14}$  i primenom programa UKVP određene su računarske vrednosti lokacije parcijalnog pražnjenja  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ . Na kraju su sračunate i apsolutne greške ovih simulacija.

#### Primer 1

Lokacija parcijalnog pražnjenja u primeru 1 bila je:  $x=0,25m$ ;  $y=0,8m$ ;  $z=0,5m$ .

Izračunate vrednosti vremena prostiranja akustičkog signala od izvora pražnjenja do senzora su:  $t_1=153,846 \mu s$ ,  $t_2=414,243 \mu s$ ,  $t_3=615,385 \mu s$  i  $t_4=725,615 \mu s$ . Vremenske razlike dolaska signala do senzora su:  $t_{12}=260,397 \mu s$ ,  $t_{13}=461,538 \mu s$ ,  $t_{14}=571,769 \mu s$ . Upotrebom programa UKVP dobijene su koordinate mesta nastanka parcijalnog pražnjenja:  $X_r=0,2505m$ ,  $Y_r=0,7994m$ ,  $Z_r=0,52125m$ . Apsolutna greške koordinata mesta parcijalnog pražnjenja, pri ovim simulacijama, su :  $\Delta x=0,0005m$ ,  $\Delta y=0,0006m$ ,  $\Delta z=0,02125m$ . Na Slici 4. prikazana je kompletna maska sa ulazno/ izlaznim podacima iz primera 1.



Slika 4. Izgled kompletne maske sa ulazno/ izlaznim podacima.

#### Primer 2

Lokacija parcijalnog pražnjenja u primeru 2 bila je:  $x=0,75\text{m}$ ;  $y=0\text{m}$ ;  $z=1\text{m}$ .

Izračunate vrednosti vremena prostiranja akustičkog signala od izvora pražnjenja do senzora su:  $t_1=384,6154 \mu\text{s}$ ,  $t_2=543,9277 \mu\text{s}$ ,  $t_3=860,0216 \mu\text{s}$  i  $t_4=725,615 \mu\text{s}$ . Vremenske razlike dolaska signala do senzora su:  $t_{12}=159,3123 \mu\text{s}$ ,  $t_{13}=475,4107 \mu\text{s}$ ,  $t_{14}=557,4923 \mu\text{s}$ . Upotrebom programa UKVP dobijene su korodinate mesta nastanka parcijalnog pražnjenja:  $X_r=0,7497\text{m}$ ,  $Y_r=0,0004\text{m}$ ,  $Z_r=0,9997\text{m}$ . Apsolutna greška je:  $\Delta x=0,0003\text{m}$ ,  $\Delta y=0,0004\text{m}$ ,  $\Delta z=0,0003\text{m}$

#### Primer 3

Lokacija parcijalnog pražnjenja u primeru 3 bila je:  $x=0,65\text{m}$ ;  $y=0,1\text{m}$ ;  $z=0,9\text{m}$ .

Izračunate vrednosti vremena prostiranja akustičkog signala od izvora pražnjenja do senzora su:  $t_1=326,3569 \mu\text{s}$ ,  $t_2=441,8892 \mu\text{s}$ ,  $t_3=761,4992 \mu\text{s}$  i  $t_4=817,7031 \mu\text{s}$ . Vremenske razlike dolaska signala do senzora su:  $t_{12}=115,5323 \mu\text{s}$ ,  $t_{13}=435,1423 \mu\text{s}$ ,  $t_{14}=491,3462 \mu\text{s}$ . Upotrebom programa UKVP dobijene su koordinate mesta nastanka parcijalnog pražnjenja:  $X_r=0,6498\text{m}$ ,  $Y_r=0,1003\text{m}$ ,  $Z_r=0,8996\text{m}$ . Apsolutna greška je:  $\Delta x=0,0002\text{m}$ ,  $\Delta y=0,0003\text{m}$ ,  $\Delta z=0,0004\text{m}$ .

Ove simulacije su pokazale da program izuzetno dobro radi, i da su greške nastale usled složenih računskih operacija u programu UKVP zanemarljivo male.

## 5.2. Simulacija sa eksperimentalnim rezultatima

U nedostatku sopstvenih eksperimentalnih rezultata program UKVP je testiran i upoređivan sa eksperimentalnim rezultatima iz dostupne svetske literature [10]. Pozicije senzora i vremenska kašnjenja i brzina prostiranja akustičkog signala u ulju takođe su preuzeti iz literature [10]. U Tabeli 1. prikazani su uporedni rezultati dobijeni iz rada [10] i originalno razvijenim programom UKVP u programskom jeziku C#. U drugoj vrsti navedene su tačne koordinate pozicije (mesta) parcijalnih pražnjenja, u trećoj vrsti su izmerena vremenska kašnjenja, u četvrtoj vrsti su rezultati proračunatih koordinata mesta parcijalnih pražnjenja i maksimalne vrednosti apsolutnih grešaka iz literature [10], a u petoj vrsti su rezultati proračunatih koordinata mesta parcijalnih pražnjenja i maksimalne vrednosti apsolutnih grešaka proračunate programom UKVP. Prikazano je ukupno deset merenja i redni broj merenja dat je u vrsti 1 Tabele 1.

Analize dobijenih rezultata ukazuju da tačnost određivanja mesta parcijalnih pražnjenja varira od 1 cm do maksimalno 15 cm u odnosu na tačnu lokaciju parcijalnog pražnjenja, ali i ukazuje na izuzetno dobro slaganje rezultata proračuna iz rada [10] i rezultata primene razvijenog programa UKVP (maksimalna razlika je 5cm).

Tabela 1. Uporedni prikaz dobijenih rezultata

1. Broj izvora	2. Pozicija izvora p.p. [cm]			3. Kašnjenja signala[ $\mu$ s]			4. Neiterativna metoda (rezultati iz [10])				5. Neiterativna metoda (rezultati dobijeni programom UKVP)			
	x	y	z	t12	t13	t14	x	y	z	Maksimalna apsolutna greška [cm]	x	y	z	Maksimalna apsolutna greška [cm]
1	30	45	30	20	103	116	31	44	31	1	30	45	25	5
2	30	45	30	36	107	118	32	44	28	2	30	45	23	7
3	20	45	30	119	131	215	21	44	31	1	21	44	31	1
4	20	45	30	125	129	208	22	45	34	4	22	44	34	4
5	40	45	30	109	188	251	43	42	32	3	44	43	35	5
6	40	45	30	108	183	288	47	46	45	15	47	46	45	15
7	40	15	30	139	220	305	45	418	28	5	45	18	28	5
8	20	15	30	153	183	273	19	11	31	4	17	16	31	3
9	40	15	30	113	224	259	44	23	38	8	45	23	38	8
10	30	15	30	77	128	156	34	18	38	8	34	17	38	8

## 6. Zaključak

Savremena merenja i dijagnostika parcijalnih pražnjenja akustičkom metodom ubrzano se razvijaju zahvaljujući razvoju i podršci elektronskih komponenti, informatičkih tehnologija odnosno softverskih rešenja kao i razvoju saznanja i dijagnostike parcijalnih pražnjenja. U odnosu na električne metode detekcije merenje parcijalnih pražnjenja akustičkim principom odlikuje

niski nivo osetljivosti na elektromagnetne smetnje, ali i slabija osetljivost pri merenju osnovnog signala. Prednost akustičke metode je i u tome što je moguće u pogonu, bez prekida isporuke električne energije, montirati akustički senzor na energetski transformator. Analize dobijenih rezultata ukazuju da tačnost određivanja mesta parcijalnih pražnjenja varira od 1 cm do maksimalno 15 cm u odnosu na tačnu lokaciju parcijalnog pražnjenja, ali i ukazuje na izuzetno dobro slaganje rezultata proračuna iz rada [10] i rezultata primene razvijenog programa UKVP (maksimalna razlika je 5cm). Verifikacija rezultata koja je urađena u odnosu na dostupne informacije iz svetske literature pokazuje da se realizovani softver može koristiti za detekciju mesta nastanka parcijalnog pražnjenja u laboratorijskim uslovima za razvoj mernog sistema koji bi se koristio za merenja na terenu u realnim uslovima. Nastavak razvoja u ovoj oblasti odnosi se na integraciju realizovanog softvera sa senzorskim i elektronskim podsistemima za obradu signala.

## 7. Literatura

- [1] Uroš Kovačević, "Kontinualni monitoring energetskih transformatora", master rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2011.
- [2] Zlatan Stojković, *Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici - primena programskih alata*, monografija, Elektrotehnički Fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [3] Uroš Kovačević, "Razvoj i primena programskog alata za detekciju mesta parcijalnih pražnjenja akustičkom metodom u izolacionim sistemima energetskih transformatora", seminarski rad, doktorske studije, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2014.
- [4] IEC 60 270 High-voltage test techniques-Partial discharges measurements. 2000.
- [5] IEC 62 478 High voltage test techniques-Measurements of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods, draft version, 2011.
- [6] IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors C57.127-2007
- [7] S. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , vol.15, no.6, pp.1576,1583, December 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660

- [8] Wojciech Sikorski and Krzysztof Walczak, Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method, Acoustic Emission - Research and Applications, Dr. Wojciech Sikorski (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/55211. Available from: <http://www.intechopen.com/books/acoustic-emission-research-and-applications/power-transformer-diagnostics-based-on-acoustic-emission-method>, 2013.
- [9] Dae-Won Park, Hyang-Eun Cho, Sang-Wook Cha and Gyung-Suk Kil, "Positioning of Partial Discharge Origin by Acoustic Signal Detection in Insulation Oil", *Journal of International Council of Electrical Engineering*, The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.2, no.1. 2012. Korea Maritime University, Korea
- [10] Prasanta Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha, „A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques“, *Applied Acoustics*, vol. 70 (11-12) p. 1378-1383, 2009.
- [11] *Visual C# Programming Guide*, Microsoft, Visual Studio 2013.

**Abstract:** This paper discusses the development and verification of software tool for determining the location of partial discharge in a power transformer with the acoustic method. Classification and systematization of physical principles and detection methods and tests of partial discharge in power transformers are shown at the beginning of this paper. The most important mathematical models, features, algorithms, and real problems that affect measurement accuracy are highlighted. This paper describes the development and implementation of a software tool for determining the location of partial discharge in a power transformer based on a no iterative mathematical algorithm. Verification and accuracy of measurement are proved both by computer simulation and experimental results available in the literature.

**Key words:** power transformer, location of partial discharge, acoustical method, application software

## **Development and Verification of a Software Tool for the Acoustic Location of Partial Discharge in a Power Transformer**

Rad primljen u uredništvo 18.11.2013. godine  
Rad prihvaćen 02.10. 2014. godine

