

# Implementacija metode za određivanje stanja energetskog transformatora zasnovane na vremenu reverberacije na otvorenom hardveru

Marija Ratković, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković  
Katedra za Telekomunikacije, Laboratorija za Akustiku  
Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
rm223039m@student.etf.bg.ac.rs, bjelic@etf.rs, tm@etf.rs

Mileta Žarković  
Katedra za Elektroenergetske sisteme,  
Laboratorija za Visoki napon, Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
mileta@etf.rs

**Sažetak**—Energetski transformator je jako važan deo svakog elektroenergetskog sistema. Pouzdan rad energetskog transformatora je bitan i zavisi od njegovog stanja. Metode za detekciju kvara koje se uobičajeno koriste su relativno skupe i na osnovu njih se ne dobija numerički pokazatelj stanja transformatora. Zato je predložena nova metode koja se pored standardne SFRA metode bazira i na principima koji se koriste u akustici prostorija. Računanjem vremena reverberacije energetskog transformatora je moguće detektovati da li je energetski transformator u kvaru. Ovaj parametar će pouzdano pokazati i nivo kvara. Ovaj rad predstavlja mogućnost implementacije ove metode na otvorenom hardveru (DSP procesoru) što omogućava primenu metode u većim mernim sistemima jer hardver može da radi bez korišćenja računara i nije potrebno beleženje rezultata od strane čoveka.

**Ključne reči** – Bela hardver; električni transformator; obrada signala; vreme reverberacije

## I. UVOD

Energetski transformator (ET) je veoma bitan deo svakog elektroenergetskog sistema. Izuzetno je složena komponenta i na njegov rad utiču mehanički, električni, termički i hemijski procesi. Neki od ključnih delova transformatora su namotaji i njihova izolacija. Ukoliko dođe do deformacije namotaja bitno je registrovati kvar na ET. Metode koje se obično koriste za detektovanje kvara su analiza frekvencijskog odziva (FRA) i *sweep* analiza frekvencijskog odziva (SFRA). SFRA metoda podrazumeva poređenje frekvencijskih odziva transformatora koji su dobijeni uzastopnim testiranjem. Ako se frekvencijski odzivi ne razlikuju u značajnoj meri smatra se da se udruženi R, L i C parametri nisu promenili, odnosno da nije došlo do kvara ET. U radovima i standardima [1-14] su predstavljene metode FRA i SFRA. U [2] su prikazani rezultati razvoja akustičkog modela, gde je pokušano da se FRA metode dopune i povežu sa standardima [3]. Metoda koja grupiše rezultate simulacije FRA i predstavlja ih određenom vrstom kvara je opisana u [8]. U radovima [9, 10] su opisani eksperimenti na ET u uslovima kratkog spoja. Nova metoda za dijagnostiku kvara SFRA je opisana u [15, 16] i bazirana je na otkrivanju spoljnih kvarova kratkog spoja. Tumačenje SFRA rezultata se vrši vizualizacijom slika koje generiše poseban

visoko specijalizovan uređaj. Ovi uređaji su skupi i javlja se potreba za pouzdanim metodama za detekciju kvara ET.

U radu [17] je predložena nova metoda za detekciju kratkih spojeva na ET i određivanje njihove težine. Ova metoda je bazirana na određivanju vremena reverberacije [18]. Ovaj parametar se koristi za analizu akustike prostorije. Zaključak istraživanja bio je da je na osnovu vremena reverberacije moguće odrediti broj kratko spojenih namotaja. Eksperimenti koji su opisani u ovom radu su obuhvatili kratke spojeve sa različitim nivoima kratkog spoja. Do ovog rezultata se došlo korišćenjem audio kartice koja je korišćena kao merni uređaj za snimanje i reprodukciju signala. Merenje je izvršeno korišćenjem aplikacije realizovane u Matlab softverskom alatu. Da bi se izvršilo merenje kao i računanje vremena reverberacije neophodno je korišćenje laptop računara, softvera i audio kartice. Ovo može predstavljati prepreku ukoliko je potrebno implementirati metodu u neki veći merni sistem.

Kroz ovaj rad je pokazano da je moguće implementirati algoritam za računanje vremena reverberacije na Bela hardveru [19, 20] sa DSP procesorom koji može samostalno, bez korišćenja računara, da detektuje kvar na ET. Ukoliko je potrebno grafički prikaz rezultata potrebno je korišćenje računara. Čitav algoritam je implementiran na Bela platformi, reprodukcija i snimanje signala, kao i računanje parametra koji će biti pokazatelj da li je došlo do kvara. Kroz ovaj rad je izvršeno poređenje rezultata kada se koristi audio kartica i kada je algoritam implementiran na Bela hardveru. Poređenje rezultata je izvršeno kada ET nije u kvaru. Korišćenjem hardvera na kome se vrši računanje vremena reverberacije ET je omogućeno da ova metoda postane deo mernog sistema koji će detektovati ukoliko dođe do kvara energetskog transformatora.

Rad je organizovan u pet odeljaka, u odeljku 2 opisano kako se računa vreme reverberacije i dat je kratak opis korišćenog hardvera. U odeljku 3. je opisana eksperimentalna postavka. Rezultati koji su dobijeni korišćenjem Bela hardvera i njihovo poređenje sa rezultatima koji se dobijaju korišćenjem audio kartice su prikazani u odeljku 4. Zaključci istraživanja su prikazani u delu 5.

## II. METODOLOGIJA

### A. Impulsni odziv i vreme reverberacije

Ideja ovog rada je da se energetski transformator posmatra kao LTI sistem na osnovu čijeg impulsnog odziva se može detektovati kvar na energetskom transformatoru. Sistemi koji mogu biti opisani impulsnim odzivom su linearni vremenski invarijantni sistemi (LTI). Impulsni odziv se koristi u oblastima digitalne obrade signala, akustici, automatskog upravljanja itd. za jednoznačno opisivanje sistema. Ovakvim sistemom se u akustici smatra prostorija čije je akustičke osobine potrebno analizirati. Impulsni odziv prostorije se meri pomoću zvučnika i mikrofona, gde zvučnik predstavlja ulaz sistema, a mikrofoni izlaz. Pomoću impulsnog odziva prostorije moguće je odrediti većinu akustičkih parametara prostorije, gde je impulsni odziv funkcija položaja zvučnika i mikrofona u prostoru.

Impulsni odziv se račun tako što se na ulazu LTI sistema generiše Dirakov impuls. U praksi nije moguće generisanje ovakvog signala zbog potrebe da se reprodukuje velike energije u kratkom vremenskom intervalu. Potrebno je pobuditi sistem na drugi način nekom od indirektnih metoda. Pobuda sistema MLS sekvencom ili *sweep* signalom su neke od indirektnih metoda koje se najčešće koriste u akustici.

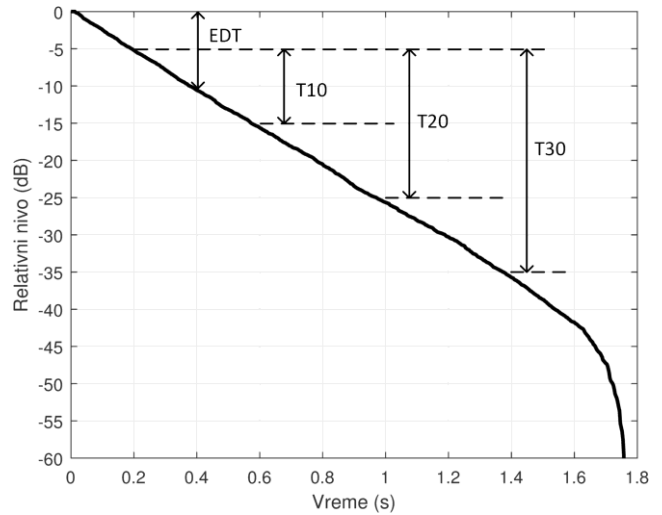
Često je potrebno sagledati samo globalni oblik obvojnice impulsnog odziva kako bi se analiziralo zvučno polje. Ova kriva opadanja je pokazatelj ukupnog vremenskog trajanja odziva i pokazatelj ukupne energije koju nosi impulsni odziv. Zato je osnovni način posmatranja impulsnog odziva preko krive opadanja koja se naziva i reverberaciona kriva. Osnovna odlika reverberacione krive su fluktuacije u toku opadanja i što otežava određivanje ocene brzine opadanja. Zato se uvodi Šrederova kriva koja rešava ovaj problem. Zasniva se na uvođenju krive opadanja  $L_R(t)$  koja se računa direktno iz impulsnog odziva  $h(t)$  i definisana je kao:

$$L_R(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt = \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt \quad (1)$$

Vreme reverberacije (T60) predstavlja vreme potrebno da reverberaciona kriva opadne za 60 dB u odnosu na početnu vrednost. Smatra se da nakon vremena reverberacije u prostoriji nema više zvučne energije. Često nije moguće dobiti dinamiku opadanja reverberacione krive od 60 dB, zato se definišu drugi parametri iz kojih se može izračunati vreme reverberacije. Ti parametri su  $EDT$ ,  $T10$ ,  $T20$  i  $T30$ , njihova definicija je ilustrovana na Sl. 1.

Na Sl. 2. je prikazana blok šema sistema. Na ulaz transformatora se dovodi poznati signal,  $x[n]$ , koji se propušta kroz ovaj LTI sistem. Na izlazu transformatora se čuva signal  $y[n]$ , poznavanjem ova dva signala digitalnom obradom signala moguće je odrediti impulsni odziv LTI sistema,  $h[n]$ . Korelacija između impulsnog odziva, ulaznog i izlaznog signala definisana je izrazom (2), odnosno  $y[n]$  je jednak konvoluciji između  $x[n]$  i  $h[n]$ .

$$y[n] = x[n] \otimes h[n] \quad (2)$$



Slika 1. Kriva opadanja i princip određivanja  $T10$ ,  $T20$  i  $T30$

Da bi se na osnovu ulaznog i izlaznog signala koji su poznati odredio impulsni odziv energetskog transformatora potrebno je uraditi linearnu dekonvoluciju nad tim signalima. U ovom radu je linearna dekonvolucija realizovana preko ciklične. Prvi korak je računanje Furijeove transformacije signala  $y[n]$  i  $x[n]$ , gde je  $M$  dužina signala na izlazu, dok je dužina signala na ulazu  $N_1$ . Po teoriji linearne konvolucije impulsni odziv je dužine:

$$N_2 = M - N_1. \quad (3)$$

Da bi ciklična dekonvolucija dala isti rezultat kao linearna potrebno je dopuniti signal  $x[n]$  nulama do dužine  $M_1$ .  $M_1$  je definisano kao najbliži broj broju  $M$  i koji je ujedno stepen dvojke. Nad ovako dopunjenim ulaznim i izlaznim signalom se računa diskretna Furijeova transformacija (DFT) u  $M_1$  tačaka.  $X[k]$  i  $Y[k]$  su DFT nizovi ulaznog i izlaznog signala dužine  $M_1$ . Da bi se dobio frekvencijski odziv LTI sistema,  $H[k]$ , čiji impulsni odziv treba odrediti potrebno je podeliti  $Y[k]$  i  $X[k]$ , kao što je prikazano u izrazu (4).

$$H[k] = \frac{Y[k]}{X[k]} \quad (4)$$

Da bi se dobio traženi impulsni odziv  $h[n]$  potrebno je izvršiti inverznu diskretnu Furijeovu transformaciju nad nizom  $H[k]$  koji je definisano u  $M_1$  tačaka. Ovako dobijen impulsni odziv je dužine  $M_1$ . Kao što je definisano u izrazu (3) potrebno je da  $h[n]$  bude dužine  $N_2$  što će se realizovati skraćivanjem signala do potrebne dužine.

### B. Implementacija na hardveru

Opisani algoritam za računanje impulsnog odziva implementiran je na hardveru sa DSP procesorom. Hardver koji je korišćen je platforma Bela, koja predstavlja računarski sistem namenjen za obradu audio signala, bazira se na *BeagleBone* platformi. Glavna karakteristika ovog procesora je malo kašnjenje kada se obrađuju audio signali. Razvojno okruženje bazirano je programskom jeziku C++. Brzina procesiranja je jedna od najvećih prednosti ovog hardvera. Korišćeni su dva analogna ulaza i jedan analogni izlaz koje Bela poseduje. Frekvencije odabiranja sa kojima Bela može da

radi su 22.05 kHz, 44.1 kHz i 88 kHz. U ovom radu je korišćena najveća frekvencija odabiranja. Sa izlaza se šalje *sweep* signal koji je sintetizovan na Beli. Ovaj signal je promenljive frekvencije i obuhvata opseg od 10 Hz do 44 kHz. Dva analogna ulaza služe kako bi se snimili signali na ulazu i izlazu ET koji se posmatra kao LTI sistem. Korišćenjem digitalnih ulaza na hardveru implementirano je dva tastera. Pritiskom na jedan taster počinje reprodukcija *sweep* signala na analogni izlaz i snimanje signala na analognim ulazima. Pritiskom na drugi taster računa se impulsni odziv sistema dekonvolucijom snimljenog izlaznog i ulaznog signala LTI sistema. Takođe, se od dobijenog impulsnog odziva računa Šrederova kriva i vreme reverberacije  $T60$ .

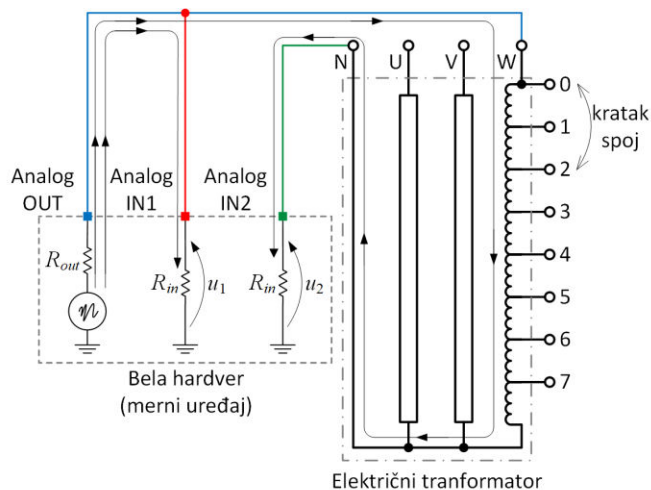
### III. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Na blok šemi na Sl. 2. je prikazana eksperimentalna postavka koja se koristi za testiranje algoritma. Merni uređaj u radu [17] predstavlja audio kartica *Steinberg UR22* [21], za računanje vremena reverberacije korišćena je aplikacija realizovana u Matlab softverskom alatu. Merni uređaj koji je testiran kroz ovaj rad predstavlja Bela hardver sa koga se reprodukuje *sweep* signal, na hardveru se vrši i snimanje kao i računanje vremena reverberacije. Frekvencija odabiranja zvučne kartice koja je korišćena je 192 kHz, dok je maksimalna frekvencija odabiranja sa kojom Bela hardver radi 88.2 kHz.

Energetski transformator nema kućište i koristi se u edukativne svrhe u Laboratoriji za visoki napon Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Parametri transformatora dati su u tabeli I. Ovaj transformator ima sedam dvostrukih namotaja faze  $W$ , koji označeni brojevima od 0 do 7 na Sl. 2. Radi se o 7 izvoda jednog namotaja faze  $W$ . Kratkim spajanjem ovih kontakata simulira se kvar transformatora. Ako nastane kratak spoj između kontakata 0 i 7 to će biti najveći kvar, a između susednih kontakata najmanji kvar. Namotaj  $W$  se pobuđuje pomoću izvora promenljive frekvencije, odnosno pomoću *sweep* signala koji se reprodukuje sa analognog izlaza Bela hardvera. Ulazni napon  $u_1$  se meri između faze  $W$  i zemlje, a napon  $u_2$  koji predstavlja izlaz sistema se meri između neutralne tačke  $N$  i zemlje. Ulazni i izlazni napon se snimaju pomoću dva analogna ulaza Bela hardvera. Na osnovu  $u_2$  i  $u_1$  se određuje impulsni odziv namotaja.

TABELA I PARAMETRI KORIŠĆENOG ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Parametar	Vrednost
Nazivni napon	10/0.4 kV/kV
Nazivna struja	23/557 A/A
Frekvencija	50 Hz
Tip veze	Ynyn0
Broj faza	3



Slika 2. Šematski prikaz eksperimentalne postavke

Nakon reprodukcije i snimanja ulaznog i izlaznog signala potrebna je obrada da bi se dobilo vreme reverberacije koje je pokazatelj da li je ET pokvaren. Pritiskom na drugi taster se obustavlja snimanje signala i vrši se obrada na Beli, računanje FFT transformacija snimljenih signala, njihovo deljenje i inverzna Furijeova transformacija. Dobija se impulsni odziv sistema na osnovu kog će biti izračunato vreme reverberacije. Izračunato vreme reverberacije će biti zapisano u .txt folder iz kog je moguće nakon merenja pročitati rezultate.

### IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu impulsnog odziva dobijenog dekonvolucijom od dva snimljena signala izračunato je vreme reverberacije ( $T60$ ). Za računanje  $T60$  korišćen je dinamički opseg od 20 dB, odnosno parametar  $T20$ . Vrednost vremena reverberacije koja se dobije kada je transformator ispravan korišćenjem audio kartice iznosi 0.588 s. Kada je algoritam realizovan korišćenjem Bela hardvera vreme reverberacije iznosi 0.593 s. Ova vrednost vremena reverberacije je približno ista kao kada je algoritam realizovan kroz aplikaciju iz rada [17]. Na Sl. 3. su prikazani frekvencijski odzivi ET kada nema kvara. Plava kriva predstavlja frekvencijski odziv dobijen merenjem pomoću softverske aplikacije i audio kartice, dok je crvenom bojom prikazan frekvencijski odziv dobijen na Beli. Kriva koja predstavlja frekvencijski odziv dobijen na Beli je kraća, odnosno frekvencijski odziv je definisan do oko 44.1 kHz. Zbog frekvencije odabiranja od 88.2 kHz frekvencijski odziv može biti meren do frekvencije koja je jednaka polovini frekvencije odabiranja. Zbog veće frekvencije odabiranja kada se koristi audio kartica frekvencijski odziv će biti definisan do oko 96 kHz. Uprkos ovoj razlici rezonantna frekvencija na oba frekvencijska odziva je oko 10 kHz i približno su istih nivoa. Kao što je pokazano rezultati dobijeni na ova dva načina su približno isti i moguće je pouzdano detektovati kvarove na ET predloženom metodom određivanja vremena reverberacije.

## V. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad je pokazana mogućnost upotrebe hardvera sa DSP procesorom za detekciju kvara ET transformatora. Metoda za detekciju kvara koja je implementirana na Bela hardveru je metoda predložena u radu [17]. Računanjem vremena reverberacije ( $T60$ ) se manifestuje da li je ET u kvaru. Hardver je bio zadužen za pravljenje *sweep* signala koji će biti reprodukovani na analogni izlaz, takođe za snimanje signala koji su na ulazu i izlazu transformatora. Celokupni proračun vremena reverberacije koji je pokazatelj da li postoji kratki spoj u ET ili ne je obavljen na hardveru. Pokazano je da rezultati koji su dobijeni u slučaju kada nema kvara na ET i transformator radi ispravno, korišćenjem audio kartice i Bela hardvera približno isti može se smatrati da se dobijaju pouzdani rezultati kada se umesto audio kartice i aplikacije realizovane u Matlab-u koristi Bela hardver.

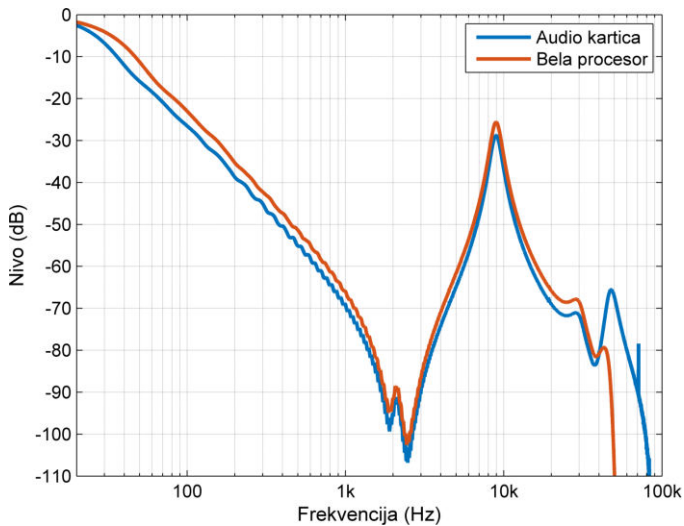
Kao i audio kartica tako i ovaj hardver ima znatno nižu cenu i kraće vreme potrebno za merenje i obradu signala u odnosu na SFRA analizatorima za periodičnu dijagnostiku ET, koji se koristi kako bi se dijagnostifikovao kvar na ET. Za razliku od audio kartice, kada je algoritam implementiran na Bela platformi nije neophodna upotreba računara, osim kada se je potrebno grafički prikazati rezultate. Ovakav način implementacije algoritma može naći primenu u većim mernim sistemima.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 i projekta III 42009, koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

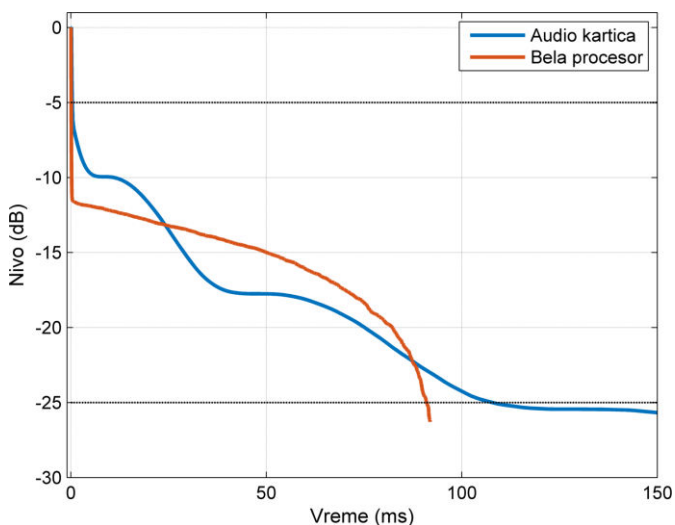
- [1] S. Ghani, Y. Thayoob, Y. Ghazali, M. Khair, I. Chairul, Distribution system performance evaluation accounting for data uncertainty, *Procedia Engineering*, vol.68, pp 469-476, 2013.
- [2] E. Kornatowski, S. Banaszak, Diagnostics of a Transformer's Active Part with Complementary FRA and VM Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, Berlin, pp 1398-1406, 2014.
- [3] IEEE PC57.149/D8, Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers, 2012.
- [4] IEC 60076-18, Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response, 2012.
- [5] CIGRE Working Group A2.26, "Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis", 2008.
- [6] CIGRE Working Group A2.53 "Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)", Reference 812, SeETember, 2020.
- [7] J.R. Secue, E. Mombello, Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers, *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1119-1128, 2008.
- [8] A. Abbasi, M. Mahmoudi, Diagnosis and Clustering of Power Transformer Winding Fault Types by Cross-Correlation and Clustering Analysis of FRA Results, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol: 12, pp. 4301-4309, 2018.
- [9] A. Pandya, B. Parekh, Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) trace for the open circuit and short circuit winding fault damages of the power transformer, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 890-896, 2014.
- [10] Akshay A. Pandya, B.R. Parekh, Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) traces for the open circuit and short circuit



Slika 3. Frekvencijski odziv dobijen pomoću audio kartice i Bela hardvera

Krive opadanja kada je transformator ispravan dobijene ovim dvema metodama su prikazane na Sl. 4. Kriva opadanja dobijena kada se koristi hardver i koja je proračunata na Beli je prikazana crvenom bojom. Dok je Šrederova kriva koja je dobijena korišćenjem audio kartice prikazana crvenom bojom. Ove dve krive se razlikuju jer dva *sweep* signala nisu istih frekvencija odabiranja, zbog različitih frekvencija odabiranja na kojim radi Bela hardver, odnosno audio kartica. Uprkos krivama koje se razlikuju one za slično vreme opadnu 20 dB, zato je i vreme reverberacije koje se dobija preko parametra  $T20$  slično.

Implementacijom algoritma na hardveru koji će dovoljno pouzdano detektovati greške, odnosno raditi približno dobro kao metoda prikazana u radu [17] će omogućiti da se ova metoda koristi u velikim mernim sistemima. Prednost implementacije algoritma na Bela hardveru u odnosu na korišćenje aplikacije realizovane u Matlab softverskom alatu je ta što nije neophodno koristiti laptop računar, već će hardver raditi nezavisno.



Slika 4. Krive opadanja impulsnog odziva transformatora.

- winding fault damages of the power transformer, vol. 62, pp. 890–896, 2014.
- [11] Jian Sun, Qing Yang, PeiyuSu, Shilin Wu, Song Chen, Lewei He, Diagnosis of winding fault in three-winding transformer using lightning impulse voltage, *Electric Power Systems Research*, vol. 175, pp. 1–9, 2019.
- [12] Ni Jianqiang, Zhao Zhongyong, Tan Shan, Chen Yu, Yao Chenguo, Tang Chao, The actual measurement and analysis of transformer winding deformation fault degrees by FRA using mathematical indicators, *Electric Power Systems Research*, vol. 184, pp. 1–11, 2020.
- [13] Ali Reza Abbasi, Mohammad Reza Mahmoudi, Application of statistical control charts to discriminate transformer winding defects, *Electric Power Systems Research*, vol. 191, pp. 1–11, 2021.
- [14] Reza Khalili Senobari, JavadSadeh, Hossein Borsi, Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review, vol. 155, pp. 172–183, 2018.
- [15] Janneth R. Secue, Enrique E. Mombello, New SFRA measurement interpretation methodology for the diagnosis of power transformers, *Electrical Engineering*, vol. 96, pp. 183–198, 2014.
- [16] Hossein Ahmadi, BehroozVahidi, Amin Foroughi Nematollahi, A simple method to detect internal and external short-circuit faults, classify and locate different internal faults in transformers, *Electrical Engineering*, vol. 96, pp. 183–198, 2014.
- [17] Milos Bjelić, Bogdan Brković, Mileta Žarković, Tatjana Miljković, Fault detection in a power transformer based on reverberation time, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137, 107825, May 2022.
- [18] M. R. Schroeder, New Method of Measuring Reverberation Time, *The Journal of the Acoustical Society of America* 37(6):409-412, March 1965, DOI: 10.1121/1.1909343.
- [19] A. McPherson and V. Zappi, “An environment for submillisecond latency audio and sensor processing on BeagleBone Black,” in *Proc. Audio Engineering Society Convention* 138, 2015, pp. 1-7.
- [20] Langer H, Manzke R. Embedded multichannel Linux audiosystem for musical applications. *Proc. Int. Audio Mostly Conf. Augmented Participatory Sound Music Experiences*, London, UK, 2017, p. 1-5.
- [21] Tehnička dokumentacija proizvođača UR22 Sound Card, dostupno na [http://download.steinberg.net/downloads\\_hardware/UR22/UR22\\_documentation/UR22\\_OperationManual\\_en.pdf](http://download.steinberg.net/downloads_hardware/UR22/UR22_documentation/UR22_OperationManual_en.pdf), pristupano 19.6.2021.

#### ABSTRACT

The power transformer is a very important part of every power system. The reliable operation of the power transformer is important and depends on its condition. Commonly used fault detection methods are relatively expensive and do not provide a numerical indication of the condition of the transformer. That is why a new method was proposed, which, in addition to the standard SFRA method, is also based on the principles used in room acoustics. By calculating the reverberation time of the power transformer, it is possible to detect whether the power transformer is faulty. This parameter will also reliably show the level of failure. This work presents the possibility of implementing this method on open hardware (DSP processor), which enables the application of the method in larger measurement systems because the hardware can work without the use of a computer and recording of results by a human is not required.

#### **Open-source Hardware Implementation of the Power Transformer Fault Detection Method Based on Reverberation Time**

Marija Ratković, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković, Mileta Žarković