



Slepa ekvalizacija kanala za prenos signala parcijalnih pražnjenja

Aleksandar Žigić¹ , Nenad Kartalović¹ , Uroš Radoman¹ ,
Uroš Kovačević² 

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, , Koste Glavinića
8a, 11000 Beograd, Srbija

² Univerzitet u Beogradu. Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, , Kraljice Marije
16, 11000 Beograd, Srbija

azigic@ieent.org

Kratak sadržaj: Kod signala parcijalnih pražnjenja, dobijenih pri "on-line" monitoringu ili „off-line“ ispitivanjima visokonaponskog objekta, često se javlja interferencija između direktnog i reflektovanih signala. Takođe, javljaju se i smetnje pri prostiranju signala kroz medijum odnosno strukturu kojom se signal prenosi do mernog terminala ili detektora. U radu je opisana primena metode "slepe ekvalizacije" kanala prenosa signala parcijalnih pražnjenja za koju je pokazano da se, putem dekorelacije direktnog i reflektovanih signala, može koristiti za određivanje pozicije direktnog signala parcijalnih pražnjenja u slučaju preklapanja sa reflektovanim signalima. Termin "slepa" označava ekvalizaciju kod koje karakteristike kanala (prenosnog medijuma) nisu poznate, već se procenjuju simulacijom. Impulsi parcijalnih pražnjenja u ovom radu su dobijeni u kontrolisanim eksperimentalnim uslovima, a računarske simulacije su izvršene u programskom paketu MATLAB.

Ključne reči: parcijalna pražnjenja, analiza signala, slepa ekvalizacija, dekorelacija, direktni signal, reflektovani signal, superpozicija

1. Uvod

Za procenu stanja izolacionog sistema visokonaponskih objekata (transformatori, generatori, izolatori i dr.) koristi se niz "on-line" (monitoring) i „off-line“ metoda, pri čemu su merenja parcijalnih pražnjenja (PP) najzastupljenija. Akvizicija i analiza signala PP je povezana sa nizom problema. Kao prvo, direktna merenja originalnog strujnog i naponskog impulsa

pražnjenja (impuls varnice) nisu moguća, stoga je neophodno vršiti posredna merenja uz pomoć distanciranog detektora PP [1]. Na putanji od mesta generisanja pražnjenja do detektora, signal PP pretrpi niz promena. Pored amplitudno-frekventnih promena, na signal se često superponiraju refleksije, smetnje i šum. Smetnje i šumovi na detektoru mogu poticati od različitih izvora i imati razne raspodele (npr. sinusnu, periodičnu, Gausovu ili stohastičku [2,3,4]). U literaturi su do sada predložene različite metode detekcije i izdvajanja korisnog dela signala PP. Ovo je, na primer, moguće ostvariti korišćenjem kratko-vremene Furijeove transformacije (Short-Term Fourier Transform - STFT) [5] ili talasne transformacije (wavelet transform) [3,4]. Nedostatak predložene metode STFT je u tome što nije adaptivna, dok je nedostatak metode koja koristi wavelet transformaciju u tome što njena efikasnost zavisi od izbora wavelet funkcija. Naime, detektor „vidi“ svaki izvor PP kroz različitu impedansu (kanal), čija vrednost zavisi od mesta izvora, tako da je za analizu neophodno koristiti adaptivne algoritme. Generalno, neophodno je imati u vidu da neadekvatan izbor metode može dovesti do degradacije performansi detektora [5,6,7].

Postoje brojni komercijalni i laboratorijski sistemi koji pomoću vrlo sofisticiranih softvera rešavaju problem izdvajanja informacija o PP. Međutim, nisu dostupna rešenja koja izdvajaju osnovni impuls PP iz kompozitnog signala nastalog njegovom superpozicijom sa bliskom refleksijom ili smetnjama na različitim mestima u objektu. U ovom radu razmatrana je metoda „slepe ekvalizacije“ (Blind Equalization - BE) (predložena u [2]). Metoda je iskorišćena za određivanje karakteristika impulsa PP, tj. za određivanje trenutaka događaja parcijalnog pražnjenja i refleksije. Metoda BE koristi algoritam sopstvenih vektora „EVA algoritam“ (Eigenvector algorithm – EVA). Pri tome se koristi iterativni postupak za podešavanje koeficijenata linearnog filtra ekvalizatora (Finite Impulse Response – FIR). Tom prilikom, prvo se vrši procena karakteristika kanala, a tek nakon toga se podešavaju koeficijenti ekvalizatora na osnovu procenjenih karakteristika kanala [8,9]. Rezultati navedenog postupka daju mogućnost da se korišćenjem dostupnih metoda u „otkrivenim“ trenucima izvrši izdvajanje originalnog signala PP na efikasniji način.

2. Slepa ekvalizacija

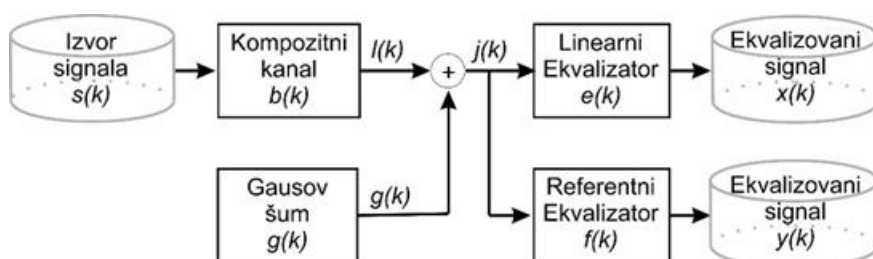
Kanal prenosa signala PP do detektora je nepoznat i promenljiv u prostoru. Za identifikovani problem pogodno je koristiti BE za digitalnu obradu signala u kojoj se originalni signal izdvaja iz primljenog signala, pri čemu se koristi samo statistika prenetog signala. Druga pogodnost je što metoda BE ne koristi „trening sekvencu“ za identifikaciju kanala. Na slici 1 je prikazana šema modela sistema za prenos signala PP koji koristi BE i EVA algoritam [2]. Izvor signala (slika 1) predstavlja slučajnu promenljivu ne-Gausove raspodele $s(k)$ i koja se može opisati kumulantima drugog c_2 , trećeg c_3 i četvrtog c_4 reda:

$$c_2 = E[s^2(k)] \quad (1)$$

$$c_3 = E[s^3(k)] \quad (2)$$

$$c_4 = E[s^4(k)] - 3 \cdot \{E[s^2(k)]\}^2, \quad (3)$$

gde $E(x)$ predstavlja matematičko očekivanje slučajne promenljive x . Kumulanti se mogu koristiti kao alternativa opisivanju funkcije raspodele umesto momenata. Kumulanti sadrže informacije o magnitudama signala i funkcijama raspodele posmatranih slučajnih promenljivih u odnosu na Gausovu raspodelu [2,8,9]. Tako je npr. kumulant drugog reda povezan sa varijansom, kumulant trećeg reda sa asimetrijom funkcije raspodele, a kumulant četvrtog reda sa kurtozismom odnosno sa "šiljatošću" funkcije raspodele.



Slika 1. Šema modela sistema za prenos signala PP koji koristi BE i EVA algoritam.

Signal PP, od mesta izvora do detektora, prolazi kroz kompozitni kanal nepoznatih karakteristika, za koji važi pretpostavka da je vremenski nepromenljiv sistem koji ima konačni impulsni odziv $b(k)$, i može se modelovati FIR filtrom n -tog reda:

$$b(k) = [b(0), \dots, b(n)] \quad (4)$$

Direktni signal PP sa izvora $s(k)$ postaje $l(k)$ nakon linearnog izobličavanja u kanalu i delimičnog preklapanja sa reflektovanim signalom. Na njega se zatim dodaje Gausov šum nulte srednje vrednosti $g(k)$, koji je statistički nezavisan od izvornog signala tako da na prijemu (detektoru) imamo signal $j(k)$:

$$j(k) = l(k) + g(k) = b(k) * s(k) + g(k) \quad (5)$$

gde je sa $*$ označen operator konvolucije. Da bi se izvršila rekonstrukcija $x(k)$ originalnog direktnog signala $s(k)$ koristi se linearni FIR ekvalizator impulsnog odziva $e(k)$ n -tog reda, kao i referentni ekvalizator $f(k)$ kojim se vrši rekonstrukcija pomoćnog signala $y(k)$ za sprovođenje iterativnog postupka:

$$e(k) = [e(0), \dots, e(n)] \quad (6)$$

$$x(k) = e(k) * j(k). \quad (7)$$

$$y(k) = f(k) * j(k) \quad (8)$$

Za tačnu rekonstrukciju direktnog signala kombinovani impulsni odziv kanala i ekvalizatora treba da sadrži samo jednu komponentu jedinične amplitude [2]:

$$u(k) = b(k) * e(k) = \delta(k - k_0) \quad (9)$$

gde je $u(k)$ kombinovani impulsni odziv, k_0 je vremensko kašnjenje a δ je Dirakova delta funkcija. Kao kriterijum za podešavanje koeficijenata ekvalizatora uzima se minimizacija srednje-kvadratne greške (Mean-Square-Error - MSE) [2]:

$$MSE(e, k_0) = E\{[x(k) - s(k - k_0)]^2\} \quad (10)$$

3. Algoritam sopstvenih vektora EVA za BE

Postoji više algoritama obrade signala pomoću kojih se može rešiti BE problem [2,8,9]. U ovom radu je korišćen algoritam predložen u [2] u kome je ekvalizacija bazirana na maksimizaciji apsolutne vrednosti unakrsnog kumulanta četvrtog reda između signala na izlazu iz linearnog ekvalizatora $x(k)$ i signala na izlazu iz referentnog ekvalizatora $y(k)$ (slika 1):

$$\max |c_4^{xy}| \quad (11)$$

Ako se signal $x(k)$ zameni sa signalom $j(k)$ na ulazu u detektor (slika 1) onda se jednačina (11) svodi na:

$$\max |e^* \cdot C_4^{yj} \cdot e| \quad (12)$$

gde je sa $*$ označena konjugovana transpozicija, a sa C_4^{yj} je Hermitska unakrsno kumulatna matrica:

$$C_4^{yj} = E\{|y(k)|^2 \cdot j(k) \cdot j^*(k)\} - E\{|y(k)|^2\} \cdot E\{j(k) \cdot j^*(k)\} - E\{y(k) \cdot j(k)\} \cdot E\{y^*(k) \cdot j^*(k)\} - E\{y^*(k) \cdot j(k)\} \cdot E\{y(k) \cdot j^*(k)\} \quad (13)$$

Iz jednačina (12) i (13) sledi generalizovana jednačina (algoritam) sopstvenih vektora EVA:

$$C_4^{yj} \cdot e_{EVA} = \lambda \cdot R_{jj} \cdot e_{EVA} \quad (14)$$

gde je sa R_{jj} označena auto-korelaciona matrica signala na detektoru $j(k)$. Koeficijenti ekvalizatora dati su kao:

$$e_{EVA} = [e_{EVA}(0), \dots, e_{EVA}(n)]^T \quad (15)$$

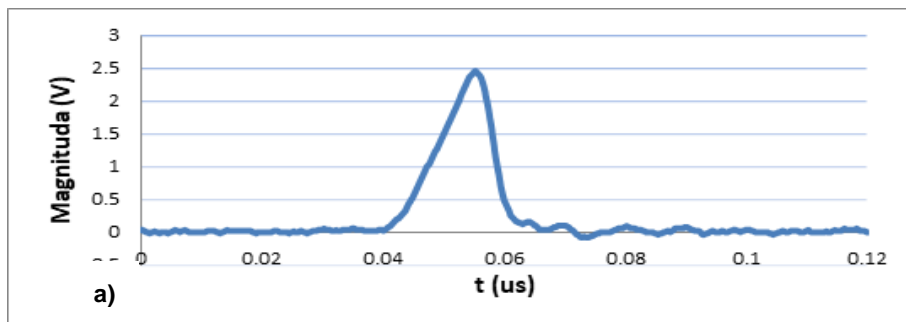
(gde je n broj koeficijenata ekvalizatora) i mogu se dobiti tako što se uzme sopstveni vektor matrice $R_{jj}^{-1} \cdot C_4^{yj}$ za maksimalnu sopstvenu vrednost λ [2].

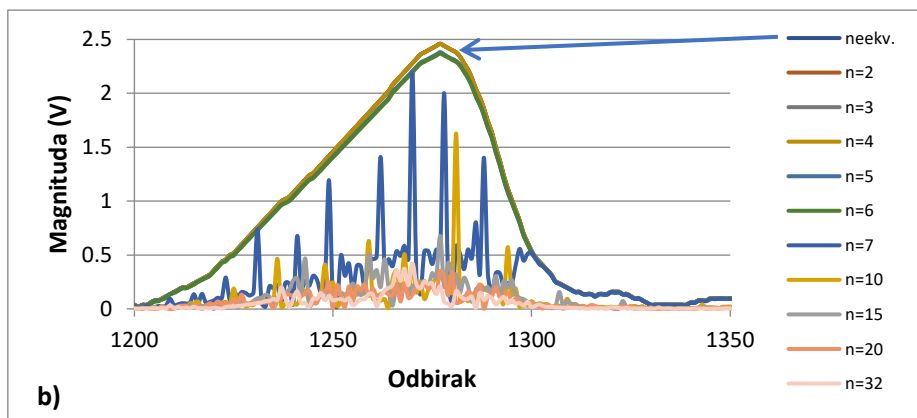
4. Rezultati

Provera algoritma sopstvenih vektora (EVA) za BE primenjena za dekorelaciju signala parcijalnih pražnjenja na detektoru izvršena je tako što su simulirani neki karakteristični slučajevi. Osnovni slučaj analizira detekciju signala koji se sastoji samo od direktnog impulsa, tj. izostala je reflektovana komponenta. U ovom slučaju ne treba da dođe do izobličenja signala na filtru. Zatim se analiziraju slučajevi sa prisustvom reflektovanih impulsa sa različitim vremenima kašnjenja (udaljenostima) označeni kao udaljeni („dugi“) i manje ili više preklapljeni označeni kao „srednji“ i „kratki“. Mera relativne udaljenosti, odnosno preklapanja, definiše se kao odnos rastojanja između direktnog i prvog reflektovanog impulsa i širine direktnog impulsa.

U slučaju prisustva direktnog impulsa i relativno vrlo udaljenog reflektovanog impulsa („dugi“), pretpostavka je da filter neće dovesti do izobličenja. U slučajevima detekcije direktnog impulsa i reflektovanog čije je kašnjenje samerljivo sa širinom impulsa mogu se očekivati izobličenja ekvalizovanog kompozitnog signala u zavisnosti od veličine preklapanja („srednji“ i „kratki“). Pretpostavka je da, sve dok postoji jasno diferenciranje maksimuma impulsa, ekvalizator nije ni potreban. Glavna „snaga“ predložene ekvalizacije treba da se pokaže u slučaju preklapanja maksimuma direktnog i reflektovanog impulsa.

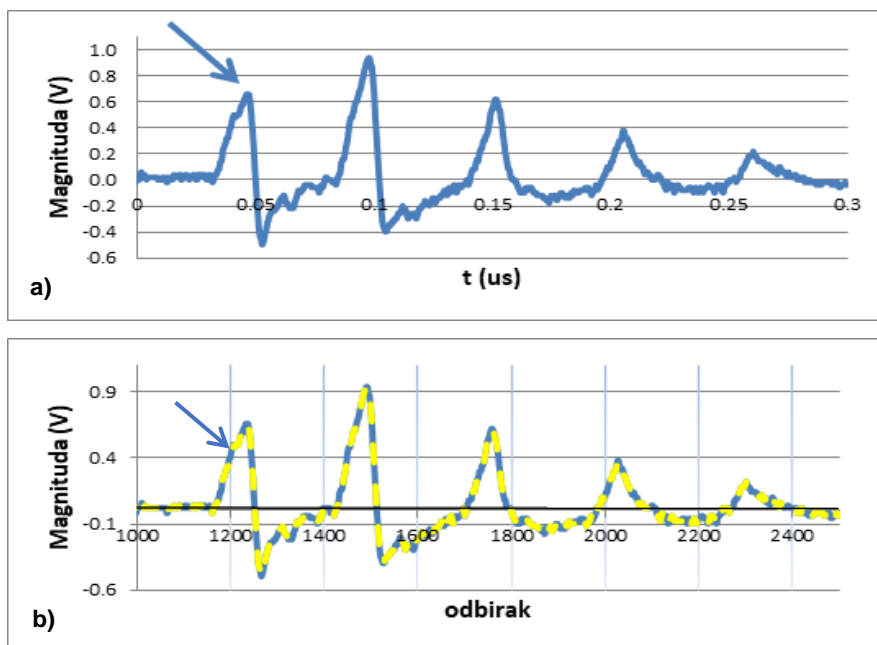
Na slici 2 prikazan je dolazak (detekcija) samo direktnog impulsa, bez reflektovanog, u vremenskom domenu kao i ekvalizovani direktni impuls.





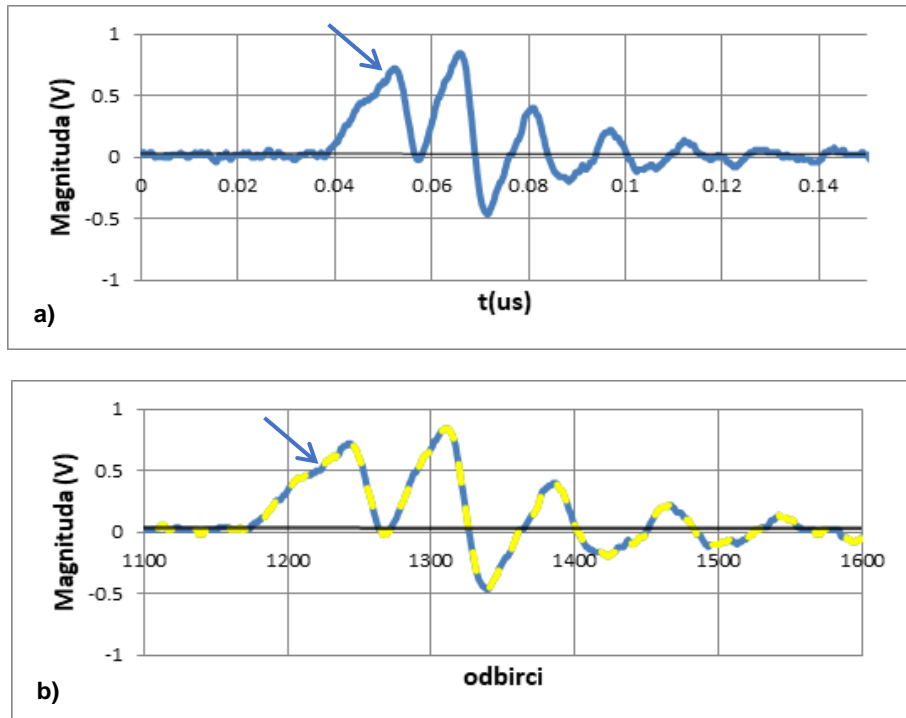
Slika 2. a) Direktni impuls bez reflektovanog signala u vremenskom domenu; b) Direktni impuls bez reflektovanog impulsa (strelica), ekvalizovani direktni impuls bez reflektovanog za dužine filtra $n = 2 - 7, 10, 15, 20, 32$.

Na slici 3 prikazan je dolazak direktnog impulsa i relativno udaljenog reflektovanog impulsa („dugi“).



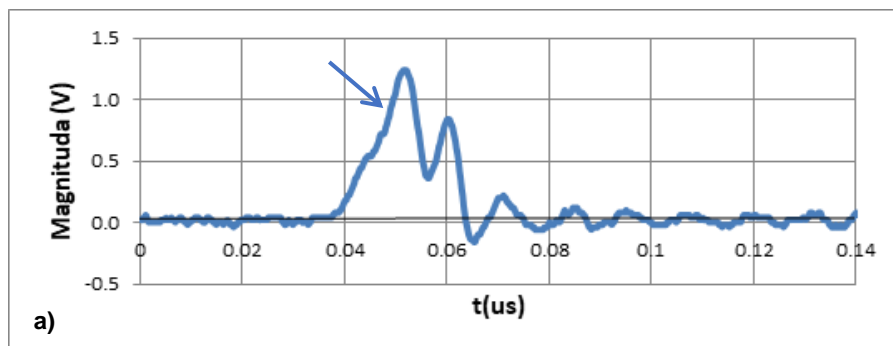
Slika 3. a) Direktni impuls (strelica) i vrlo udaljene refleksije (dugi); b) Direktni signal (strelica) i vrlo udaljeni reflektovani (plavi grafik) i ekvalizovani vrlo udaljeni reflektovani (žuti isprekidani grafik) za dužinu filtra $n = 2$.

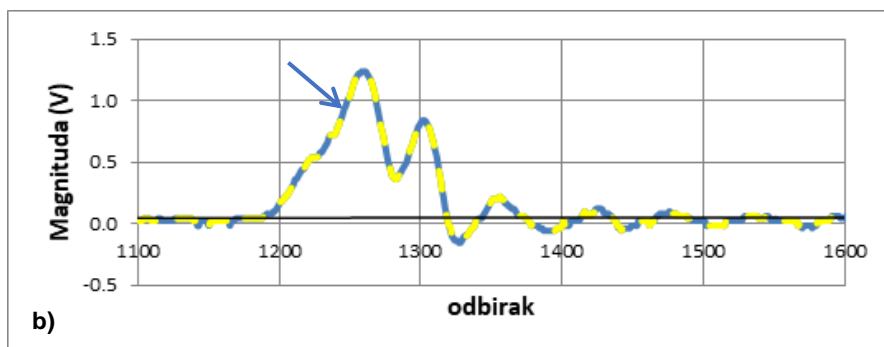
Na slici 4 prikazan je dolazak direktnog signala i „srednje“ udaljenog reflektovanog (srednji).



Slika 4. a) Direktni impuls (strelica) i srednje udaljeni reflektovani (srednji) u vremenskom domenu; b) Direktni signal (strelica) i srednje udaljeni reflektovani (plavi grafik) i ekvalizovani srednje udaljeni reflektovani (žuti isprekidani grafik) za dužinu filtra $n = 2$.

Na slici 5 prikazan je dolazak direktnog signala i bliskog reflektovanog („kratki“).

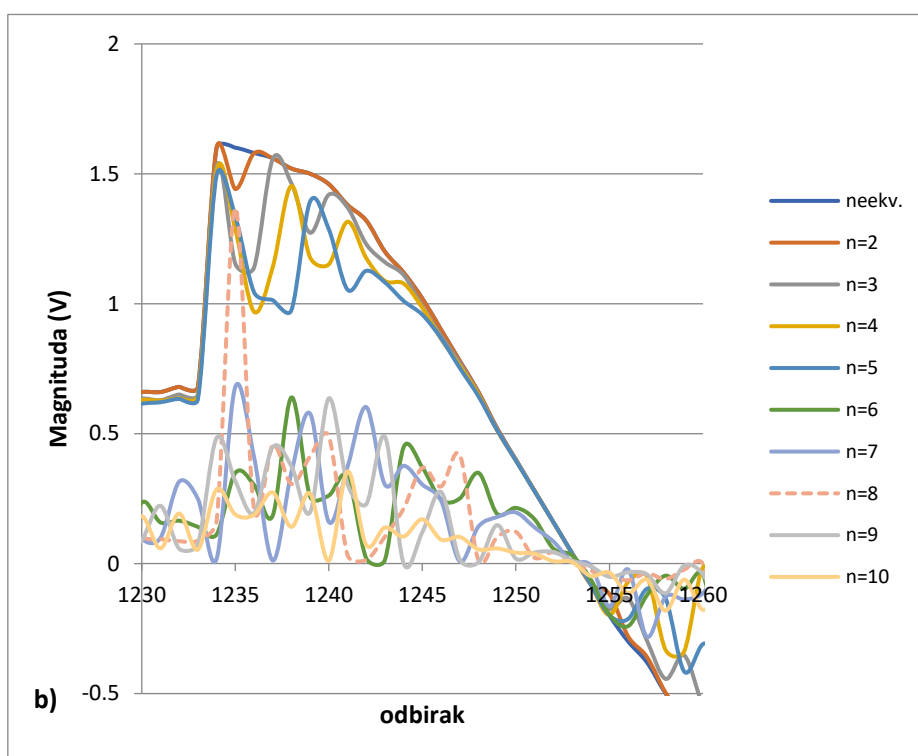
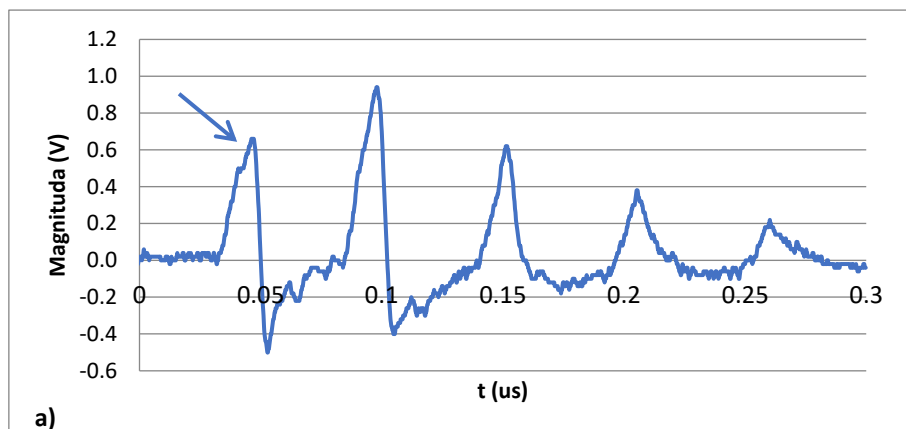




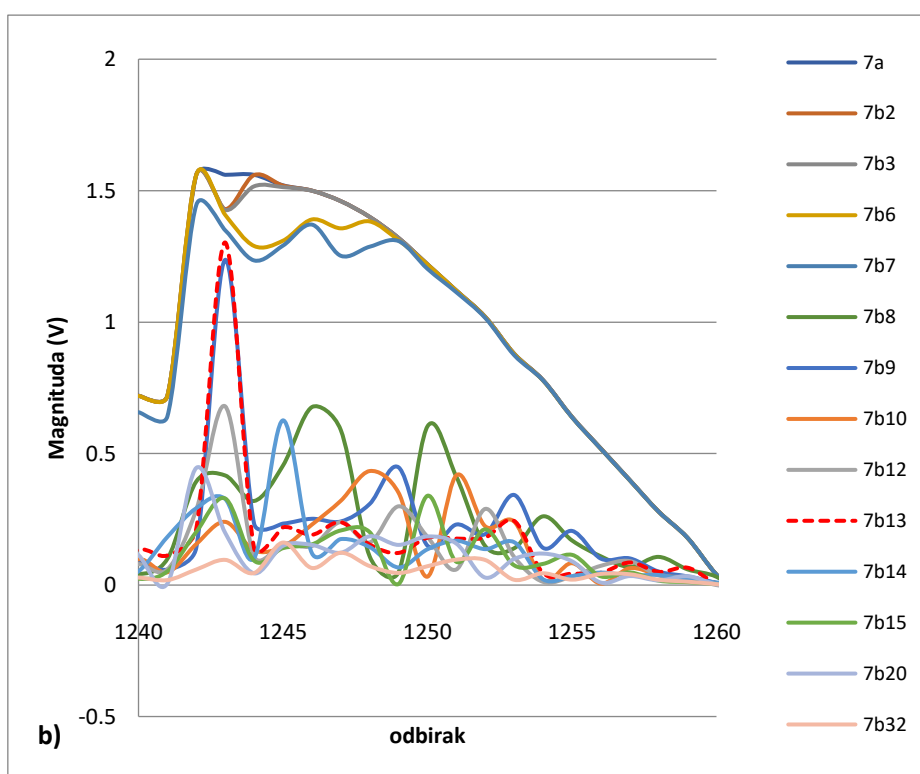
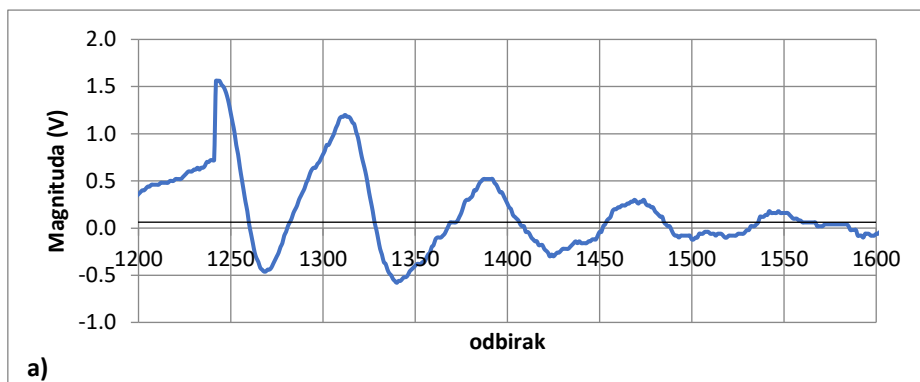
Slika 5. a) Direktni impuls (strelica) i bliski reflektovani (bliski) u vremenskom domenu; b) Direktni signal (strelica) i bliski reflektovani (plavi grafik) i ekvalizovani bliski reflektovani (žuti isprekidani grafik) za dužinu filtra $n = 2$.

Analiza je pokazala da za signal bez refleksije, gde nema preklapanja, ekvalizator neće uneti izobličenja ako je red filtra $n \leq 4$, slika 2b. Naime, grafici za $n = 2, 3, 4$ se poklapaju sa originalnim signalom (neekv.). Izobličenja ekvalizovanog signala počinju za $n = 5, 6$ i prelaze u „oscilacije“ filtra za $n \geq 7$. Na slikama od 2. do 5. rezultati su dobijeni korišćenjem ekvalizatora sa minimalnim brojem koeficijenata $n = 2$ gde se vidi da ekvalizovani signal prati originalni signal. Naime, osnovna ideja je da filter ekvalizator ne dovede do izobličenja originalnog signala ukoliko nije došlo do preklapanja direktnog i reflektovanog signala PP. U suprotnom, filter ekvalizator treba da izvrši dekorelaciju. Kada raste stepen preklapanja originalnog i reflektovanog signala raste i dužina ekvalizatora. Optimizacija dužine filtera ekvalizacije je predmet daljih istraživanja.

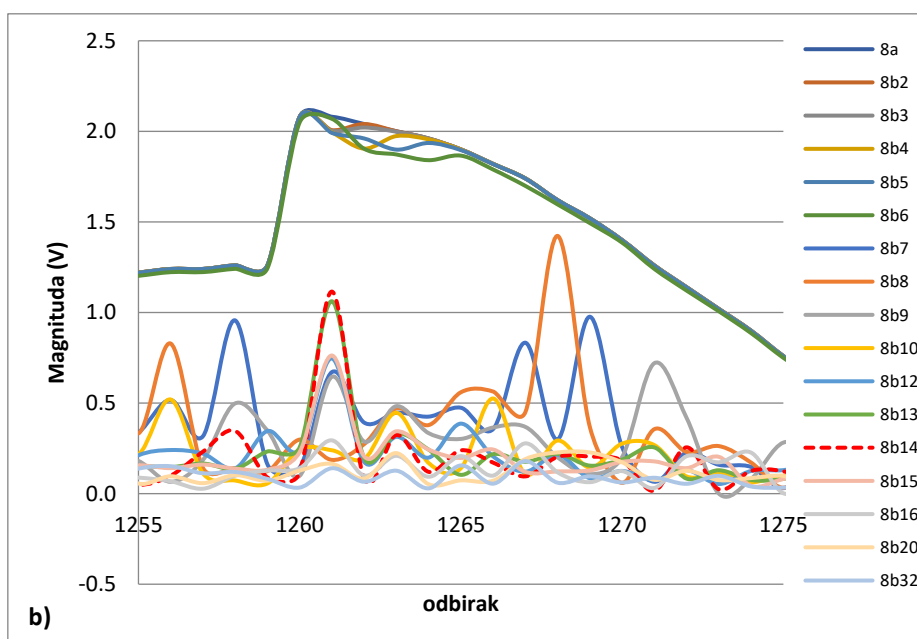
U nastavku su ispitivane performanse slepe ekvalizacije kanala kada se direktni i reflektovani signali međusobno značajno preklapaju (kada ne postoji jasna rezolucija pikova). Izvršena je simulacija za numerički preklapljeni vrhove direktnog i prvog reflektovanog impulsa za različite stepene preklapanja signala, slike 3a, 4a i 5a, a rezultati su prikazani na slikama 6a, 7a i 8a, respektivno.



Slika 6. a) Preklapljeni vrh direktnog i prvi vrh reflektovanog signala tipa „dugi“ (strelica);
 b) Neekvalizovani i ekvalizovani kanali za 9 karakterističnih vrednosti dužine filtra ekvalizatora za sliku 6a (dugi), zumirano od 1230 do 1260 odbirka.



Slika 7. a) Preklopljeni vrh direktnog i vrh prvog reflektovanog signala (srednji); b) Neekvalizovani i ekvalizovani kanali za 13 karakterističnih vrednosti dužine filtra ekvalizatora za sliku 7a (srednji), zumirano od 1240 do 1260 odbirka.



Slika 8. a) Preklapljeni vrh direktnog i vrh prvog reflektovanog signala (kratki); b) Neekvalizovani i ekvalizovani kanali za 16 karakterističnih vrednosti dužine filtra ekvalizatora za sliku 8a (kratki), zumirano od 1255 do 1275 odbirka

Kao što se vidi na slikama 6b, 7b i 8b slepa ekvalizacija uspeva da izvrši dekorelaciju direktnog i preklapljenog prvog reflektovanog signala. Takođe se

vidi da se za optimalne performanse mogu uzeti dužine ekvalizatora $n=8$ (slika 6b), odnosno $n=14$ (slika 7b i slika 8b).

5. Zaključak

Pojava interferencije među signalima parcijalnih pražnjenja dobijenih pri „on-line“ monitoringu ili „off-line“ ispitivanjima izolacionog sistema statora generatora predstavlja problem koji se može rešiti korišćenjem metode obrade signala koja se zove slepa ekvalizacija. Karakteristika ove metode je da za njenu primenu nije potrebno poznavanje karakteristika medijuma (kanala) kroz koji se prenose signali parcijalnih pražnjenja, već se metoda zasniva na statističkoj analizi kompozitnog signala dobijenog na detektoru. U radu je pokazana efikasnost korišćenja predložene metode na simulaciji nekih karakterističnih slučajeva koji se dobijaju pri prostiranju signala parcijalnih pražnjenja od mesta njihovog nastanka do detektora.

Literatura

- [1] N. Kartalovic, D. Kovacevic and S. Milosavljevic, "An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation", *Facta Universitatis (Nis), Ser.: Elec. Energ.* vol. 24, no. 1, April 2011, 43-57
<https://doi.org/10.2298/FUEE1101041K>
- [2] J. Chan, H. Ma, and T. Saha, "Automatic blind equalization and thresholding for partial discharge measurement in power transformer," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 29, pp. 1927-1938, 2014. [doi: 10.1109/TPWRD.2014.2322114](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2322114).
- [3] H. Zhang, T. Blackburn, B. Phung, and D. Sen, "A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements Part 1: WT denoising algorithm," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, pp. 3–14, Feb. 2007. [doi: 10.1109/TDEI.2007.302864](https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.302864)
- [4] X. Zhou, C. Zhou, and I. Kemp, "An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, pp. 586–594, Jun. 2005. [doi: 10.1109/TDEI.2005.1453464](https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1453464)
- [5] G. Luo, D. Zhang, Y. Koh, K. Ng, and W. Leong, "Time–frequency entropy-based partial-discharge extraction for nonintrusive measurement," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, pp. 1919–1927, Oct. 2012. [doi: 10.1109/TPWRD.2012.2200911](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2200911)

- [6] J. Chan, H. Ma, T. Saha, and C. Ekanayake, "Self-adaptive partial discharge signal de-noising based on ensemble empirical mode decomposition and automatic morphological thresholding," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, pp. 294–303, Feb. 2014. [doi: 10.1109/TDEI.2013.003839](https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.003839).
- [7] J. Chan, H. Ma, T. Saha, and C. Ekanayake, "A novel level-based automatic wavelet selection scheme for partial discharge measurement," in *Australasian Universities Power Eng. Conf.*, Bali, Indonesia, 2012, pp. 1–6.
- [8] B. Jelonck, D. Boss, and K. Kammeyer, "Generalized eigenvector algorithm for blind equalization," *Signal Process.*, vol. 61, pp. 237–264, Sep. 1997 [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(97\)00108-4](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(97)00108-4)
- [9] O. Shalvi and E. Weinstein, "New criteria for blind deconvolution of nonminimum phase systems (Channels)," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 36, pp. 312–321, Mar. 1990. <https://doi.org/10.1109/18.52478>

Zahvalnica

Ovaj članak je rezultat istraživačkog projekta delimično finansiranog od strane Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, prema ugovoru o realizaciji i finansiranju naučnog istraživačkog rada Organizacija za istraživanje i inovacije u 2023 godini (broj ugovora 451-03-47/2023-01/200038).

Abstract. In the case of partial discharge signals, obtained during "on-line" monitoring or "off-line" tests of the generator, there is often interference between the direct and reflected signals or disturbances during propagation through the medium, i.e. the structure that transmits the pulse of partial discharges to the measuring terminal or detector. The paper describes the application of the method of "blind equalization" of the partial discharge signal transmission channel, which was shown to be able to be used to extract the direct signal of partial discharges in case of overlap with reflected signals through decorrelation of direct and reflected signals. The term "blind equalization" reflects the ignorance of the characteristics of the channel (transmission medium) and they should be computationally "separated" from the composite signal on the detector.

Keywords: partial discharge, signal analysis, blind equalization, decorrelation, direct signal, reflected signal, superposition.

Blind Equalization of Partial Discharge Channels

Aleksandar Žigić, Nenad Kartalović, Uroš Radoman, Uroš Kovačević

Rad primljen u uredništvo: 06.02.2024. godine.

Rad prihvaćen: 26.03.2024. godine.