

Arkadiusz DOBRZYCKI\*  
Stanisław MIKULSKI\*

## **METODY USUWANIA SZUMÓW Z WYKORZYSTANIEM TRANSFORMACJI FALKOWEJ W ANALIZIE SYGNAŁÓW EA TOWARZYSZĄCYCH PROCESOWI DRZEWIENIA ELEKTRYCZNEGO ŻYWIC EPOKSYDOWYCH**

W poniższym artykule przedstawiono zastosowanie metod redukcji szumów w sygnałach emisji akustycznej, towarzyszących zjawisku drzewienia dielektryków stałych takich jak żywica epoksydowa, bazujących na czasowo-częstotliwościowej analizie sygnałów. Zastosowane zostały metoda estymacji sygnału z kryterium minimalizacji błędu średniokwadratowego oraz estymacji za pomocą metody Donoho i Johnsona.

SŁOWA KLUCZOWE: filtracja sygnałów, transformacja falkowa, Matlab WaveletToolbox

### **1. WPROWADZENIE**

Obserwowany ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, szczególnie duży w wielkich ośrodkach przemysłowych i miejskich, wymusza zastosowanie do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej sieci elektroenergetycznych o coraz wyższych napięciach. Jednocześnie malejące zasoby wolnych od zabudowy terenów w tych ośrodkach wymuszają miniaturyzację wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych sieci zasilającej. To powoduje, że urządzenia elektroenergetyczne muszą pracować przy coraz wyższych natężeniach pola elektrycznego. Dlatego ich wysokonapięciowa izolacja musi być coraz doskonalsza.

Głównym czynnikiem działającym destrukcyjnie na dielektryki stałe wykorzystywane jako izolacja wysokonapięciowa urządzeń są wyładowania niezupełne (WNZ). Występują one na powierzchniach dielektryków lub w ich strukturach powodując pogorszenie właściwości elektroizolacyjnych. Z WNZ występującymi w dielektrykach stałych bardzo często związany jest proces drzewienia elektrycznego polegający na tworzeniu się w dielektryku przewodzących lub półprzewodzących kanalików, przyjmujących kształt

---

\* Politechnika Poznańska.

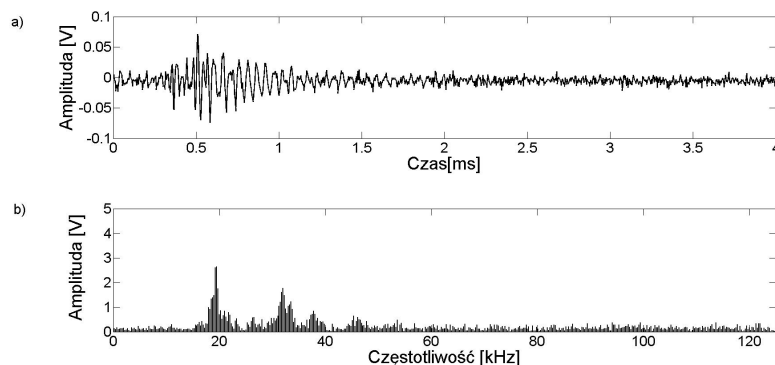
drzewa. Wyładowania w kanalikach powodują dalszy rozwój drzewa, prowadzący w końcu do małorezystancyjnego zwarcia elektrod. Zatem dla izolacji, w której występuje drzewienie, prognozy są katastrofalne. Dlatego dla celów diagnostyki stanu wysokonapięciowej izolacji bardzo istotna jest informacja o tym, czy proces drzewienia w tej izolacji został zainicjowany.

Do badania procesu drzewienia wykorzystano metodę emisji akustycznej (EA), polegającą na pomiarze, rejestracji i analizie sygnałów akustycznych towarzyszących procesowi drzewienia [1].

Sygnały emisji akustycznej towarzyszące drzewieniu elektrycznemu mierzono i rejestrowano wykorzystując stanowisko pomiarowe opisane w pracy [2]. Charakterystyczną właściwością badanego zjawiska są małe amplitudy drgań, porównywalne z amplitudą szumów. Dlatego przed poddaniem zarejestrowanych sygnałów analizie niezbędne jest odszumienie próbek. Złożoność procesu powstawania fali akustycznej, niedeterministyczny charakter jej parametrów oraz obecność silnych zakłóceń powodują, że niezbędnym staje się stosowanie nowoczesnych metod przetwarzania sygnałów. To zainspirowało autorów artykułu do zastosowania w analizie sygnałów EA transformacji falkowej. Poniższa praca przedstawia najczęściej wykorzystywane sposoby filtracji w zastosowaniu do sygnałów emisji akustycznej otrzymanych drogą symulacyjną i empiryczną. W rozwiązaniu tym filtracji podlegają współczynniki falkowe zamiast próbek sygnału w dziedzinie czasu.

## 2. INTERPRETACJA CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA FALI AKUSTYCZNEJ

Jedną z podstawowych metod analizy sygnałów emisji akustycznej, dla badanego przypadku tzn. wyładowań niezupełnych, jest analiza częstotliwościowa z wykorzystaniem przekształcenia FFT. Przykład takiego przekształcenia pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Fragment zarejestrowanego sygnału oraz jego widmo amplitudowe

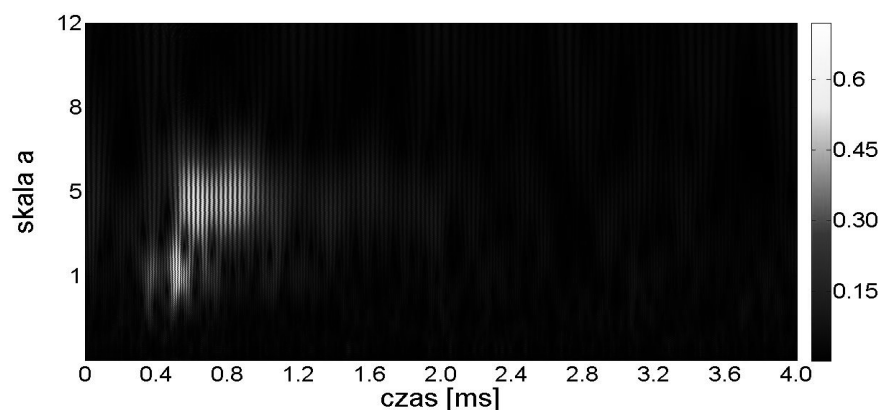
Obecność w widmie FFT charakterystycznych dla danego materiału składowych, pozwala zidentyfikować falę akustyczną związaną z analizowanym zjawiskiem. Metoda ta, ze względu na swój impulsowy charakter oraz jednoczesną modulację amplitudy i częstotliwości powstającej fali akustycznej, niesie ze sobą pewne ograniczenia w analizie sygnału, zwłaszcza powiązane ze zmiennością jego widma częstotliwościowego. Dodatkowo pojawia się problem z doбором długości okna FFT, im dłuższe okno analizy tym lepszą otrzymujemy rozdzielczość widma, jednak zatracona zostaje informacja o dokładnym czasie wystąpienia wyładowania.

W celu zbadania zmienności widma sygnału fali akustycznej, a więc uzyskaniu również informacji o czasie wystąpienia impulsu, wykorzystano w badaniach ciągłą transformację falkową CWT (Countinuous Wavelet Transform) opisaną zależnością (1) [6]:

$$C(a, b, f(t), \psi(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

gdzie:  $a$  – współczynnik skali,  $b$  – współczynnik przesunięcia czasowego,  $f(t)$  – sygnał pierwotny,  $\psi(t)$  – falka (jądro przekształcenia).

Wynikiem przekształcenia CWT jest zbiór rozłożonych na przestrzeni czas-skala współczynników falkowych. W przedstawionych badaniach do obliczenia CWT wykorzystano falkę Daubechies. Na rysunku 2 przedstawiono transformację falkową sygnału z rysunku 1, na którym widoczne są wartości poszczególnych współczynników falkowych sygnału pomiarowego oraz szumów.



Rys. 2. Graficzna prezentacja wyników transformacji CWT sygnału z rysunku 1

### 3. FILTROWANIE SYGNAŁU POPRZEZ MINIMALIZACJĘ BŁĘDU ŚREDNIOKWADRATOWEGO

W dalszych rozważaniach przyjęto zarejestrowany w dyskretnych chwilach czasowych sygnał jako sumę sygnału pomiarowego oraz szumu:

$$x[n] = v[n] + sz[n] \quad (2)$$

gdzie:  $x[n]$  – zarejestrowany sygnał,  $v[n]$  – faktyczna wartość sygnału fali akustycznej,  $sz[n]$  – sygnał reprezentujący zakłócenia w układzie pomiarowym.

Ponieważ przekształcenie CWT jest przekształceniem liniowym, możliwe jest przedstawienie dekompozycji zarejestrowanego sygnału w przestrzeni funkcyjnej, względem ortogonalnej bazy falek  $g_m$ , jako sumę dekompozycji sygnału pomiarowego i zakłóceń [4,6]:

$$\langle x, g_m \rangle = \langle v, g_m \rangle + \langle sz, g_m \rangle \quad (3)$$

gdzie:  $m$  – rząd bazy falkowej oraz  $0 < m < N$ .

W celu zmniejszenia szumów zastosowano nieliniowy estymator sygnału  $v[n]$  o postaci (3) [4,6]:

$$\hat{X} = \sum_{m=0}^{N-1} \langle x, g_m \rangle \theta[m] \quad (4)$$

gdzie:  $\theta[m]$  – jest dobieranym w sposób adaptacyjny dla każdej realizacji sygnału  $v[n]$  współczynnikiem o wartości ze zbioru  $\{0,1\}$ .

Za kryterium jakości estymacji sygnału przyjęto błąd średniokwadratowy:

$$\varepsilon = \mathbf{E} \left\{ \left| v - \hat{X} \right|^2 \right\} = \sum_{m=1}^N \mathbf{E} \left\{ \left| \langle v, g_m \rangle - \langle x, g_m \rangle \theta[m] \right|^2 \right\} \quad (5)$$

Podstawiając do wzoru (4) zależność (2) oraz przyjmując jako wartość oczekiwaną wariancję szumu:

$$\sigma^2 = \mathbf{E} \left\{ \left| \langle sz, g_m \rangle \right|^2 \right\} \quad (6)$$

otrzymano wzór końcowy na błąd średniokwadratowy o postaci (7):

$$\varepsilon = \sum_{m=1}^N \left| \langle v, g_m \rangle \right|^2 (1 - \theta[m])^2 + (\sigma \theta[m])^2 \quad (7)$$

Aby znaleźć optymalne współczynniki  $\theta[m]$  estymatora z równania (4), dla każdego poziomu dekompozycji  $m$  należy zminimalizować średni błąd kwadratowy  $\mathbf{E}[m]$ . Wartości  $\theta[m]$  uzyskiwane są poprzez przyrównanie pochodnej błędu średniokwadratowego na  $m$ -tym poziomie dekompozycji do zera, zgodnie ze wzorem:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \theta[m]} = \frac{\partial \left( \left| \langle v, g_m \rangle \right|^2 (1 - \theta[m])^2 + (\sigma \theta[m])^2 \right)}{\partial \theta[m]} = 0 \quad (8)$$

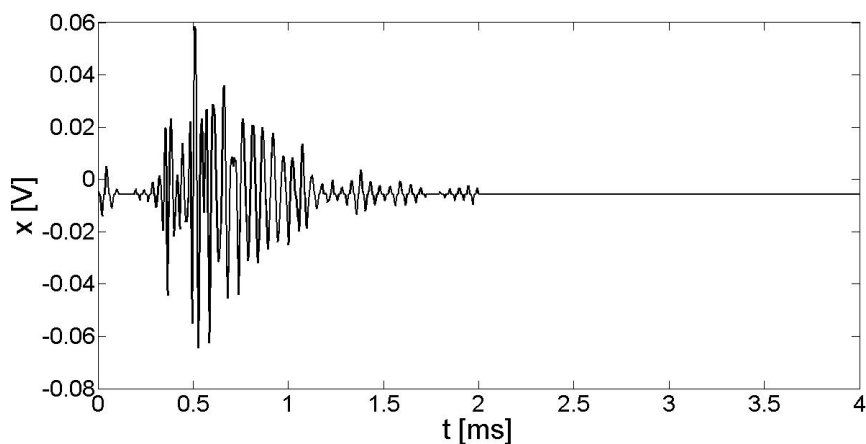
Z powyższego wzoru po uproszczeniu wynika wzór na współczynnik:

$$\theta[m] = \frac{|\langle v, g_m \rangle|^2}{|\langle v, g_m \rangle|^2 + \sigma^2} \quad (9)$$

Wiedząc, że  $\theta[m]$  dobierane jest ze zbioru  $\{0,1\}$  można zapisać wzór (10) [4]:

$$\theta[m] = \begin{cases} 1 & \text{gdy } |\langle v, g_m \rangle|^2 > \sigma^2 \\ 0 & \text{gdy } |\langle v, g_m \rangle|^2 \leq \sigma^2 \end{cases} \quad (10)$$

Na wykresie z rysunku 3 przedstawiono przykład przefiltrowanego zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej towarzyszącego zjawisku drzewienia żywicy epoksydowej przy napięciu 12 kV.



Rys. 3. Przykład filtracji sygnału z rysunku 3 dla wariancji szumu  $\sigma^2 = 0.02$

#### 4. FILTROWANIE SYGNAŁU Z WYKORZYSTANIEM STRATEGII DONOHO-JOHNSONA

Przedstawiona w rozdziale trzecim metoda estymacji sygnału podczas implementacji sprawia trudności związane, przede wszystkim z nieznaną funkcją  $v[n]$ , wynikające ze zmienności parametrów fali akustycznej powstałej w trakcie drzewienia. Dodatkowo algorytm ten usuwa, poprzez funkcję  $\theta[m]$ , wybrane dekompozycje sygnału. Dokładniejszą redukcję szumów można uzyskać stosując metodę filtracji opisaną przez D. L. Donoho oraz I. M. Johnstona w pracach [3, 4]. Autorzy ci przedstawili metodę estymacji sygnału z zaszumionych próbek z wykorzystaniem pewnej zależności:

$$\hat{X} = \sum_{m=0}^{N-1} \langle x, g_m \rangle \theta(\langle x, g_m \rangle) \quad (10)$$

Rozwiązanie to polega na korekcji każdego ze współczynników falkowych za pomocą pewnej nieliniowej funkcji, której wartość zależy od wartości współczynnika falkowego.

Donoho i Johnson w pracy [4], oprócz kryterium minimalizacji błędu średniokwadratowego wprowadzili kryterium gładkości funkcji z wykorzystaniem rzutowania funkcji na przestrzeń funkcyjną Besova. Autorzy metody zaproponowali dwa warianty progowania współczynników falkowych, tzw. estymację miękką i twardą. Estymacja miękka opisana jest zależnością:

$$\theta(y) = \begin{cases} y - thr & \text{dla } x \geq thr \\ y + thr & \text{dla } x < -thr \\ 0 & \text{dla } |x| < thr \end{cases} \quad (11)$$

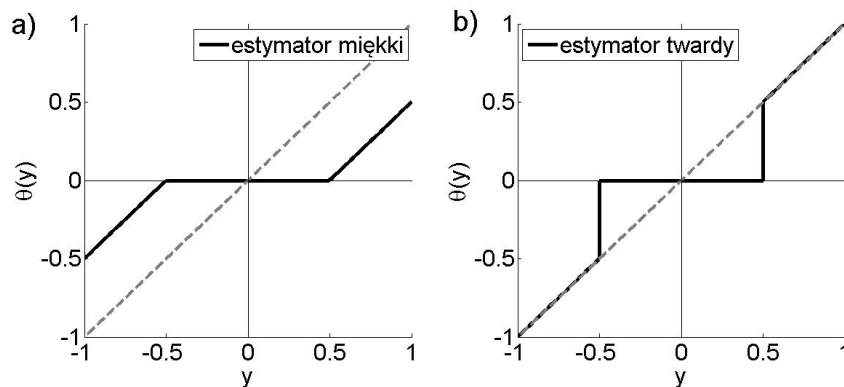
gdzie:  $thr$  – współczynnik progowy,  $y$  – wartość współczynnika falkowego.

Natomiast estymację twardą opisuje zależność [4]:

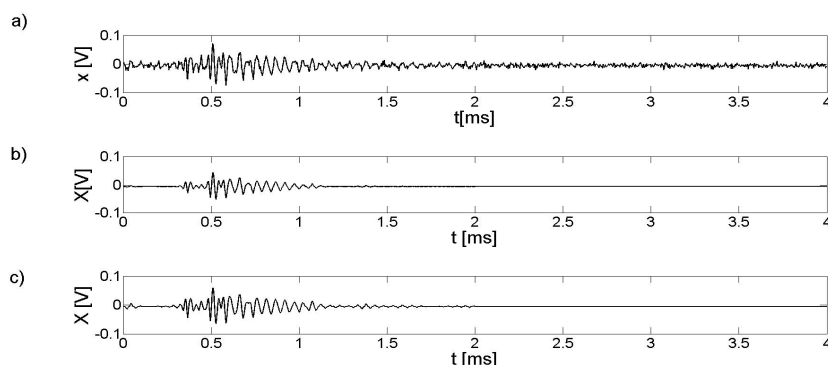
$$\theta(y) = \begin{cases} y & \text{dla } |y| > thr \\ 0 & \text{dla } |y| \leq thr \end{cases} \quad (12)$$

Rysunek 4a i 4b przedstawiają przebieg funkcji progowej dla estymacji miękkiej i twardej w zależności o wartości współczynnika falkowego.

Rysunek 5 przedstawia sygnał z rysunku 1 (a) oraz estymatory powyższego sygnału dla estymacji miękkiej (b) i twardej (c). Porównując poniższe przebieg z wartościami dla estymatora z rysunku 3 widać znaczne polepszenie jakości filtracji.



Rys. 4. Zależność funkcji  $\theta$  od  $y$  dla: a) estymacji miękkiej, b) estymacji twardej, przy progu  $thr = 0.5$



Rys. 5. Przebieg: a) zarejestrowanego sygnału  $x(t)$ , b) estymatora sygnału  $X(t)$  dla estymacji miękkiej przy  $t = 0.02$ , c) estymatora sygnału  $X(t)$  dla estymacji twardej przy  $t = 0.02$

## 5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zastosowanie transformacji falkowej przy redukcji szumów powstałych w trakcie rejestracji sygnałów emisji akustycznej towarzyszących WNZ w dielektrykach stałych, zwłaszcza żywicach epoksydowych. Przedstawione wykresy pozwalają potwierdzić słuszność stosowania opisany w artykule metod odszumiania sygnałów. Metoda Donoho-Johnsona pozwala osiągnąć bardzo dobre wyniki, lepsze niż pierwsza metoda.

Estymator miękki wyłumił szumy najlepiej ze wszystkich trzech estymatorów. Wadą tego rozwiązania jest jednak lekkie wytłumienie wszystkich współczynników falkowych, bez względu na poziom odcięcia  $thr_x$  a więc również sygnału  $v[t]$ .

Zastosowany w trakcie badań estymator twardey znacznie lepiej odwzorowuje pomierzony sygnał (bez tłumienia), pozostawiając przy tym sygnał trochę bardziej zaszumionym.

Podsumowując, należy za optymalną metodę usuwania szumów z zarejestrowanych sygnałów EA towarzyszących drzewieniu elektrycznemu żywic epoksydowych, uznać metodę Donoho-Johnsona z estymatorem twardym. Ta metoda pozwala zachować najwięcej informacji w sygnale, a jednocześnie znacznie zmniejszyć w nim udział szumów.

## LITERATURA

- [1] Dobrzycki A.: Metoda emisji akustycznej w analizie i badaniu procesu drzewienia elektrycznego dielektryków stałych w silnym polu elektrycznym, *Rozprawa doktorska przedłożona Radzie Wydział Elektrycznego Politechniki Poznańskiej*, Poznań 2008.

- [2] Dobrzycki A., Opydo W. Stanowisko do badania sygnałów emisji akustycznej towarzyszących destrukcji polimetakrylanu metylu w silnym polu elektrycznym, *Zeszyty naukowe Politechniki Poznańskiej seria Elektryka*, nr 50, Poznań 2006, s.199-208.
- [3] Donoho D. L., De-noising by soft-thresholding, *IEEE Transactions on information theory Vol. 41 No. 3*, May 1995.
- [4] Donoho D. L., Johnstone I. M., Ideal spatial adaption via wavelet shrinkage, *Biometrika vol. 81*, 1994, pp. 425-455.
- [5] Batko W., Mikulski A., Zastosowanie metod falkowych w systemach monitoringu wibroakustycznego łożyskowania urządzenia wyciągowego, *Diagnostyka Vol. 26*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, 2002.
- [6] Mallat S. G., A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 11 No. 7*, July, 1989, p.674-693.

**SIGNAL DEONISING METHODS WITH USE OF WAVELET  
TRANSFORM IN ANALYSIS OF AE SIGNAL ACCOMPANYING EPOXY  
RESIN ELECTRICAL TREEING**

The following article presents the application of methods of noise reduction in acoustic emission signals, the accompanying electrical treeing of solid dielectric such as epoxy resin, based on time-frequency signal analysis. Were applied signal estimation method with criterion of minimizing the mean square error and the estimation by the method of Donoho and Johnson.