

IDENTYFIKACJA WYBRANYCH PARAMETRÓW ŹRÓDEŁ WAHAŃ NAPIĘCIA Z WYKORZYSTANIEM ULEPSZONEJ EMPIRYCZNEJ TRANSFORMATY FALKOWEJ

Piotr KUWAŁEK

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny
tel.: 530815338 e-mail: piotr.l.kuwalek@doctorate.put.poznan.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań dotyczących nowatorskiej metody pozyskiwania informacji o wybranych parametrach źródeł wahań napięcia z wykorzystaniem ulepszonej empirycznej transformaty falkowej. Dla przeprowadzonych badań założono, że oddziaływanie źródeł wahań napięcia można identyfikować jako modulację amplitudową sygnału napięcia. Uwzględniając to założenie, daną wejściową dla ulepszonej empirycznej transformaty falkowej była obwiednia sygnału napięciowego, wyznaczona z zastosowaniem transformaty Hilberta. Poprawność działania metody zweryfikowano w oparciu o wykonane symulacje numeryczne dla sygnału deterministycznego z wykorzystaniem programu MATLAB.

Słowa kluczowe: EEWT, EWT, transformata Hilberta, wahania napięcia.

1. WPROWADZENIE

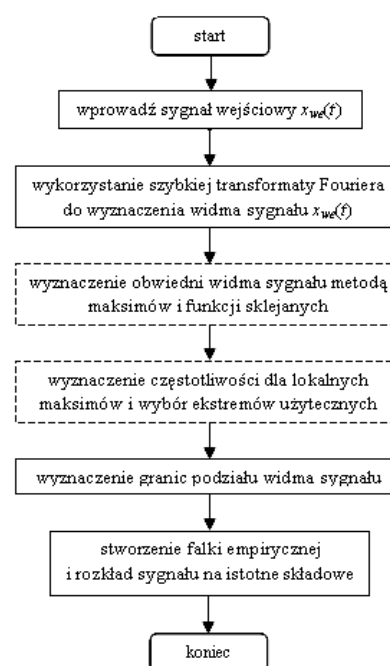
Jednym z podstawowych rodzajów zakłóceń występujących w sieci elektroenergetycznej są wahania napięcia, które można zdefiniować jako szybkie zmiany wartości skutecznej napięcia. Wahania napięcia mogą zaburzać poprawną pracę odbiorników przyłączonych do sieci oraz powodować uciążliwe migotanie oświetlenia. Skutki wahań napięcia zależą zarówno od parametrów źródeł wahań, jak i od parametrów obwodu zasilania. W niniejszej pracy podjęto próbę pozyskania informacji o amplitudzie i kształcie wahań pochodzących od niezależnie pracujących źródeł wahań oraz o częstotliwości zmian stanu tych źródeł. Warto zauważyć, że spośród wymienionych parametrów jedynie częstotliwość jest parametrem zależnym tylko od źródła.

W praktyce badanie wahań napięcia najczęściej sprowadza się do pomiaru wskaźników P_{st} i P_{lt} przy pomocy flickermetru. Jednakże uzyskane w ten sposób parametry migotania oświetlenia krótkotrwałego P_{st} i długotrwałego P_{lt} nie zawierają informacji o pożądanych parametrach źródeł wahań w sieci. Innymi rejestrowanymi wielkościami są wskaźniki wahań, tj. amplituda wahań δU oraz częstotliwość wahań f . Stosując te wskaźniki, możliwe jest z pewną dokładnością, oszacowanie wybranych parametrów źródła. Jednakże w przypadku wystąpienia kilku niezależnych źródeł wahań o podobnej mocy, wyodrębnienie wspomnianych parametrów staje się uciążliwe, a czasami nawet niemożliwe. Stąd też podjęto próbę pozyskania informacji o źródłach wahań napięcia wykorzystując bardziej złożony aparat matematyczny. W literaturze znane są rozwiązania z wykorzystaniem empirycznego rozkładu na mody EMD (ang. *Empirical Mode Decomposition*) [1] bądź

empirycznej transformaty falkowej EWT (ang. *Empirical Wavelet Transform*) [2]. W wyniku zastosowania rozkładu na mody, poza sygnałami pochodzącymi od źródeł wahań, powstają sygnały wynikające z EMD, które to nie mają fizycznej interpretacji. Problem ten rozwiązuje zastosowanie empirycznej transformaty falkowej, którą można w pewnym zakresie identyfikować jako rozkład na mody fizycznie interpretowalne. Wynika to z tego, że EWT bazuje na widmie sygnału, dobierając odpowiedni zestaw filtrów. Sposób doboru filtrów dla tego rozwiązania, które podano w pozycji [3], powoduje redundancję danych. Dlatego też, zmodyfikowano sposób podziału widma sygnału w wyniku czego powstała ulepszona empiryczna transformata falkowa EEWT (ang. *Enhanced Empirical Wavelet Transform*) [4], którą to w niniejszej pracy wykorzystano do identyfikacji założonych parametrów źródeł wahań.

2. ALGORYTM EEWT

Działanie ulepszonej empirycznej transformaty falkowej EEWT przedstawia schemat blokowy na rys. 1.



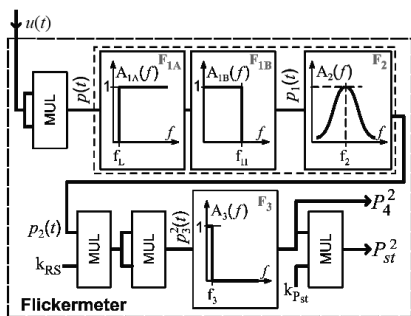
Rys. 1. Schemat działania algorytmu EEWT

Jeżeli w schemacie przedstawionym na rys. 1, zastosuje się metodę segmentacji opartą na przestrzeni skali zamiast metody detekcji ekstremów widma (bloki z kreskowaną krawędzią), to EEWT sprowadza się do EWT.

Do badań wykorzystano implementację algorytmu EEWT w programie MATLAB jako toolbox, który został udostępniony przez Gillesa [5]. Implementacja uwzględnia EWT [3] oraz rozszerzenie do EEWT [4].

3. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW ŹRÓDEŁ WAHAŃ NAPIĘCIA

Jak przedstawiono we wprowadzeniu, najczęściej pomiar wahań sprowadza się do rejestracji wskaźników P_{st} i P_{It} z wykorzystaniem flickermetru. Zgodnie z normą [6], flickermetr to układ o schemacie blokowym przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy flickermetru [7]

Sygnal $p_1(t)$ rysunek 2 podany na filtr pasmowo-przepustowy F_2 , można jednoznacznie identyfikować z obwiednią sygnału $u(t)$. A więc do celów analizy wahań napięcia wystarczająca jest informacja o obwiedni napięcia w sieci elektroenergetycznej. Dlatego daną wejściową dla metody EEWT będzie sygnał $p_1(t)$ obwiedni napięcia $u(t)$. Jedną z metod pozyskania obwiedni jest zastosowanie transformaty Hilberta (HT) danej zależnością (1):

$$\hat{u}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (1)$$

Znając powyższą transformatę można wyznaczyć moduł sygnału analitycznego (2):

$$u_{env}(t) = |u(t) + j\hat{u}(t)| = \sqrt{(u(t))^2 + (\hat{u}(t))^2}, \quad (2)$$

równoważny obwiedni sygnału napięciowego $u_{env}(t)$.

Analizowany deterministyczny sygnał napięciowy, przy uwzględnieniu założenia modulacji amplitudy, można zapisać zależnością (3):

$$u(t) = \left\{ \sqrt{2} U_c \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t) \cdot [1 + u_{mod}(t)] \right\}, \quad (3)$$

gdzie: $u_{mod}(t)$ jest przebiegiem modulującym, który można identyfikować z oddziaływaniem źródeł wahań, $f_c = 50$ Hz, $U_c = 230$ V. Dla tak opisanego problemu, rozważono trzy przypadki, które w dalszej części oznaczono jako P1, P2, P3.

P1) Sygnal modulujący opisany jest zależnością (4):

$$u_{mod P1}(t) = (u_{mod1}(t) + u_{mod2}(t)), \quad (4)$$

gdzie $u_{mod1}(t)$ dane jest równaniem (5), a $u_{mod2}(t)$ dane jest równaniem (6):

$$u_{mod1}(t) = 0,01 \sin(2\pi \cdot f_{m1} \cdot t), \quad (5)$$

$$u_{mod2}(t) = 0,03 \sin(2\pi \cdot f_{m2} \cdot t), \quad (6)$$

gdzie: $f_{m1} = 5$ Hz, $f_{m2} = 10$ Hz.

Powyższy przypadek można identyfikować z dwoma niezależnie pracującymi źródłami wahań. Sinusoidalne wahania napięcia występują sporadycznie. Jednakże ze względów dydaktycznych zostały one uwzględnione na potrzeby artykułu, w celu zobrazowania istoty działania metody EEWT.

P2) Sygnal modulujący opisany jest zależnością (7):

$$u_{mod P2}(t) = (u_{mod P1}(t) + u_{mod3}(t)), \quad (7)$$

gdzie $u_{mod3}(t)$ dane jest równaniem (8):

$$u_{mod3}(t) = 0,02 \cdot \text{sgn}(\sin(2\pi \cdot f_{m3} \cdot t)), \quad (8)$$

gdzie: $f_{m3} = 15$ Hz.

Przebieg modulujący opisany równaniem (8) można identyfikować z typowym źródłem wahań, którego oddziaływanie powoduje skokową zmianę wartości skutecznej napięcia.

P3) Sygnal modulujący opisany jest zależnością (9):

$$u_{mod P3}(t) = (u_{mod P2}(t) + u_{noise}(t)), \quad (9)$$

gdzie $u_{noise}(t)$ jest zasymulowanym sygnałem zakłócającym w postaci szumu białego, którego amplituda jest mniejsza niż 0,01 V. Szum biały został uwzględniony z uwagi na ekspansję inteligentnych sieci (Smart Grid) i inteligentnego systemu pomiarowego (Smart Metering), która przyczyniła się do wzrostu udziału tego szumu w mierzonym napięciu [8,9].

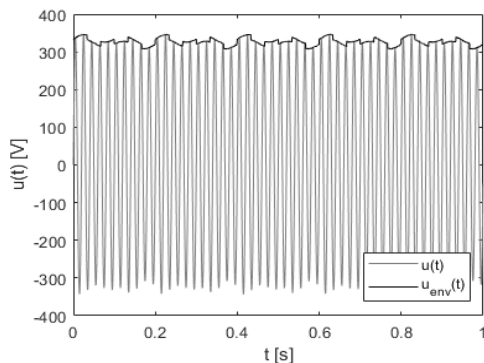
Amplitudy i częstotliwości sygnałów modulujących w poszczególnych przypadkach wybrano arbitralnie.

Dla każdego przypadku wykonano obliczenia zgodnie z zależnością (3). Następnie pozyskano obwiednie sygnałów napięciowych zgodnie z zależnością (2), w której sygnał analityczny wyznaczono z wykorzystaniem dyskretnej transformaty Hilberta [10] dostępnej jako funkcja *Hilbert* w MATLAB. Wykorzystana metoda bazuje na szybkiej transformacji Fouriera FFT i jej odwrotności IFFT. Ponadto metoda ta zakłada, że jej sygnał wejściowy jest blokiem o skończonej liczbie danych, co w przeprowadzonych symulacjach zostało spełnione. W kolejnym kroku sygnał obwiedni został unormowany i usunięta została składowa stała, dzięki czemu uzyskano pożądane sygnały będące danymi wejściowymi metody EEWT.

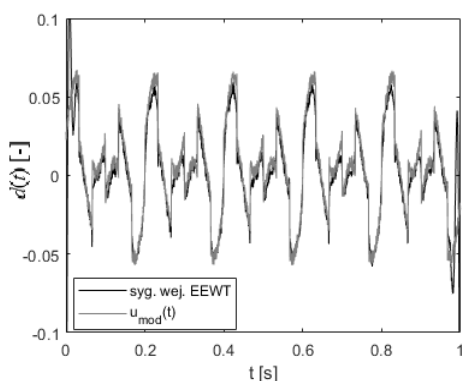
Na rysunku 3 przedstawiono zamodelowany sygnał napięcia i pozyskaną obwiednię dla przypadku P3, z kolei na rys. 4 przedstawiono sygnał wejściowy EEWT dla tego przypadku oraz odpowiadający mu sygnał modulujący $u_{mod P3}(t)$.

Jeżeli uwzględnimy zniekształcenie obwiedni jakie uzyskujemy z zastosowania zależności (2), to już dla przypadku P1 metoda EMD generuje 5 sygnałów składowych, z czego tylko jeden z nich jest zgodny z sygnałem pochodzącym od źródła $u_{mod2}(t)$. Z kolei suma

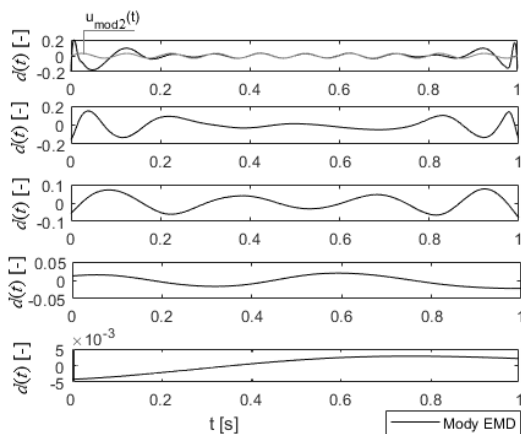
kilku pozostałych składowych współtworzy sygnał $u_{mod1}(t)$. Brak kontroli nad ilością sygnałów składowych oraz brak interpretowalności poszczególnych składowych powoduje, że metoda EMD staje się mało użyteczna. Wynik działania EMD dla przypadku P1 przedstawiono rysunku 5.



Rys. 3. Przebieg czasowy zamodelowanego napięcia $u(t)$ i jego obwiedni dla przypadku P3



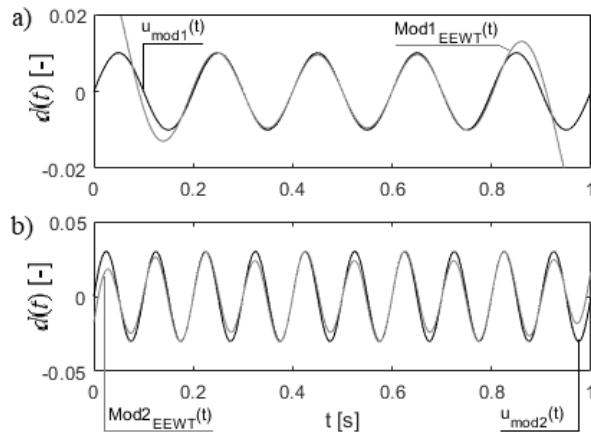
Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału modulującego $u_{modP3}(t)$ i sygnału wejściowego EEWT wyznaczonego z zastosowaniem HT, gdzie $d(t)$ jest głębokością modulacji



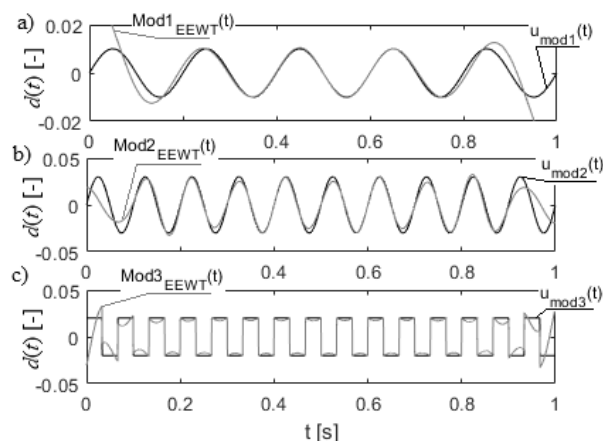
Rys. 5. Wynik działania algorytmu EMD dla przypadku P1, gdzie $d(t)$ jest głębokością modulacji

Uwzględniając powyższe zachowanie algorytmu EMD uzasadnione jest poszukiwanie innego narzędzia, które umożliwiłoby kontrolę nad poszczególnymi sygnałami składowymi. Możliwym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie EEWT. Wynik działania dekompozycji na sygnały składowe EEWT przedstawiono odpowiednio dla

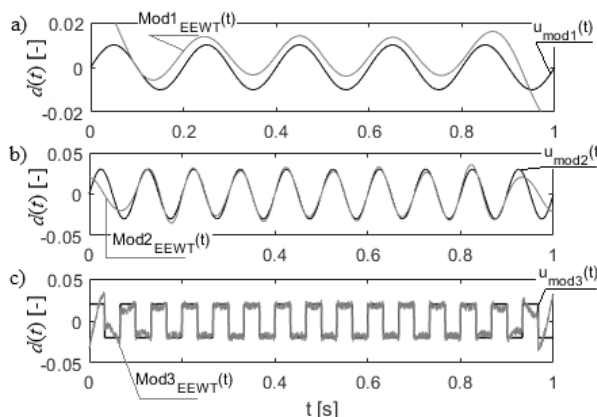
przypadku P1 na rysunku 6, P2 na rysunku 7, P3 na rysunku 8.



Rys. 6. Wynik dekompozycji EEWT sygnału $u_{modP1}(t)$ dla przypadku P1, gdzie: a) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod1_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod1}(t)$; b) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod2_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod2}(t)$; $d(t)$ głębokość modulacji



Rys. 7. Wynik dekompozycji EEWT sygnału $u_{modP2}(t)$ dla przypadku P2, gdzie: a) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod1_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod1}(t)$; b) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod2_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod2}(t)$; c) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod3_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod3}(t)$; $d(t)$ głębokość modulacji



Rys. 8. Wynik dekompozycji EEWT sygnału $u_{modP3}(t)$ dla przypadku P3, gdzie: a) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod1_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod1}(t)$; b) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod2_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod2}(t)$; c) przebieg czasowy sygnału wynikowego EEWT $Mod3_{EEWT}(t)$ oraz sygnału $u_{mod3}(t)$; $d(t)$ głębokość modulacji

Dla każdego rozważanego przypadku algorytm EEWT umożliwił zdekomponowanie sygnału wejściowego na sygnały pochodzące bezpośrednio od hipotetycznych, niezależnie pracujących, źródeł powodujących wahania napięcia (sygnały otrzymane w wyniku dekompozycji pokrywają się ze składowymi sygnałami modulującego rys. 6-9). Dzięki temu, istnieje możliwość pozyskania informacji o głębokości modulacji napięcia oraz częstotliwości pracy poszczególnych źródeł wahań. Użycie EEWT zapewnia lepsze odwzorowanie sygnałów składowych niż EMD, gdyż nie jest wrażliwa na zniekształcenia wynikające z zastosowania HT. Wrażliwość EMD na zniekształcenia wynika z analizy sygnału w dziedzinie czasu. EEWT bazuje na widmie sygnału, którego zniekształcenie przez HT jest widoczne dla składowych o większej częstotliwości. Przedmiotem badań są składowe niskoczęstotliwościowe, stąd też wpływ zniekształcenia obwiedni HT na działanie EEWT jest pomijalnie mały. Ponadto EEWT umożliwia w pewnym zakresie odtworzenie kształtu wahań napięcia związanego z cyklem pracy źródła wahań. Dodatkowo metoda ta, umożliwi dekompozycję sygnału na poszczególne składowe nawet w przypadku wystąpienia zakłóceń co widać na rysunku 8.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań dotyczących pozyskiwania informacji o parametrach kilku niezależnie pracujących źródeł wahań napięcia, tj. częstość pracy (cecha źródła wahań), bądź głębokość modulacji i kształt wahań napięcia (cecha źródła wahań oraz obwodu zasilającego). Do realizacji tego celu zaproponowano użycie nowej metody dekompozycji EEWT oraz porównano jej działanie z obecnie wykorzystywaną w literaturze metodą dekompozycji EMD.

Przedstawiono wynik działania metody dekompozycji sygnału EMD, która dla celów pozyskania wybranych parametrów poszczególnych źródeł wahań napięcia jest mało użyteczna. Wynika to z faktu, że nie można narzucić w tej metodzie stopnia dekompozycji, co przekłada się na powstanie sygnałów składowych, których nie można skojarzyć z oddziaływaniem źródeł wahań napięcia. Dlatego też, bez znajomości wymuszenia nie da się wybrać sygnałów użytecznych ze zbioru sygnałów, pozyskanych z procesu dekompozycji EMD. W dalszej części badań przedstawiono metodę EEWT opartą na widmie obwiedni napięcia w sieci elektroenergetycznej. Metoda ta dla każdego z rozpatrywanych przypadków, umożliwiła rozkład sygnału modulującego na poszczególne składowe. Ponadto pokazano na podstawie P2, że w pewnym zakresie EEWT umożliwia pozyskanie informacji o kształcie składowego sygnału modulującego w przeciwieństwie do metody EMD. Na

podstawie przypadku P3 pokazano, że metoda EEWT jest w pewnym zakresie odporna na zakłócenia w postaci szumu białego. Zasymlowane zakłócenia można również interpretować jako sumę oddziaływań wywołanych przez źródła wahań napięcia o małej mocy, czyli przez tzw. „drobnych odbiorców energii elektrycznej”. Jednakże, pozyskanie sygnału wejściowego dla EEWT wymaga zastosowania transformacji Hilberta do rejestracji obwiedni napięcia co stwarza konieczność modyfikacji obecnych na rynku analizatorów jakości energii elektrycznej. Dlatego w dalszych pracach badawczych zaplanowano zaimplementowanie algorytmu EEWT w przenośnym urządzeniu pomiarowo-rejestrującym z wykorzystaniem praktycznej implementacji HT jako filtr FIR Hilberta [11].

5. BIBLIOGRAFIA

1. Onal Y., Gerek O.N., Ece D.G., Empirical mode decomposition application for short-term flicker severity, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, pp. 499-509, 2016, <https://doi.org/10.3906/elk-1306-201>.
2. Xiaojing C., Kaicheng L., Qingxu M., Delong C., Yi L., Detection of Power Quality Disturbances Using Empirical Wavelet Transform and Hilbert Transform, *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, No. 5, pp. 192-197, 2017.
3. Gilles J., Empirical Wavelet Transform, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 16, pp. 3999-4010, 2013.
4. Hu Y., Li F., Li H., Liu C., An Enhanced Empirical Wavelet Transform for noisy and non-stationary signal processing, *Digital Signal Processing*, vol. 60, pp. 220-229, 2017.
5. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42141-empirical-wavelet-transforms> [Dostęp:23.05.2019].
6. IEC Std. 61000-4-15:2003 Flickermeter-Functional and design specifications.
7. Wiczynski G., Pst indicator's value estimation with two independent amplitude modulating signals, *2012 IEEE 15th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, 778-784.
8. Gungor V.C., Lu B., Hencke G. P., Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3557-3564, 2010.
9. Ning J. i inni, A Wavelet-Based Data Compression Technique for Smart Grid, *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 212-218, 2011.
10. Marple S.L., Computing the Discrete-Time Analytic Signal via FFT, *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 47, pp. 2600-2603, 1999.
11. Bart Q., Tzoneva R., An FPGA-BASED implementation of a Hilbert filter for Real-time Estimation of Instantaneous Frequency, Phase and Amplitude of Power System Signals, *Int. Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, no. 23, pp. 16333-16341, 2018.

APPLICATION OF AN ENHANCED EMPIRICAL WAVELET TRANSFORM TO DETERMINE SELECTED PARAMETERS OF SOURCES OF VOLTAGE FLUCTUATIONS

The article presents the results of preliminary research on an innovative method of analysis of voltage fluctuation sources with the use of an enhanced empirical wavelet transform. For the tests, it was assumed that the influence of voltage fluctuation sources can be identified as the amplitude modulation of the voltage signal. Given this assumption, the input data for the enhanced empirical wavelet transform was a voltage signal envelope derived from the use of the Hilbert transform. The correctness of the method was verified on the basis of performed simulation tests for a deterministic signal using the MATLAB program.

Keywords: EEWT, EWT, Hilbert transform, voltage fluctuation.