

Krzysztof GÓRECKI¹, Mirosław SZMAJDA², Jarosław ZYGARLICKI², Małgorzata ZYGARLICKA³, Janusz MROCZKA⁴

¹ POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT UKŁADÓW ELEKTROMECHANICZNYCH I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole

² POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

³ POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole

⁴ POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

Zaawansowane metody analiz w pomiarach jakości energii elektrycznej

Dr inż. Krzysztof GÓRECKI

Urodzony 1975r. w Kędzierzynie-Koźlu. Ukończył studia w 2000r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Stopień dr inż. uzyskał w 2005r. na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej. Pracuje jako adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zajmuje się przetwarzaniem sygnałów w szczególności pomiarami jakości energii elektrycznej.



e-mail: k.gorecki@po.opole.pl

Dr inż. Mirosław SZMAJDA

Urodzony w 1975r. w Kędzierzynie-Koźlu. Tytuł mgr inż. uzyskał w 2000r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W 2005r. uzyskał stopień doktora. Pracuje jako adiunkt na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej. Zajmuje się tematyką cyfrowego przetwarzania sygnałów, aplikacją metod DSP w pomiarach jakości energii elektrycznej oraz systemami pomiarowymi embedded.



e-mail: m.szajda@po.opole.pl

Dr inż. Jarosław ZYGARLICKI

Urodzony 20.04.1978r. w Brzegu. Stopień doktora uzyskał w 2007 roku na Politechnice Opolskiej. Jest zatrudniony od 2002 roku (obecnie na stanowisku adiunkta) na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jego zainteresowania obejmują nowoczesne metody przetwarzania sygnałów, procesory sygnałowe, systemy embedded, jakość energii elektrycznej.



e-mail: j.zygarelicki@po.opole.pl

Mgr inż. Małgorzata ZYGARLICKA

Urodzona 01.10.1982r. w Grodkowie. Otrzymała stopień magistra z informatyki na Politechnice Opolskiej w 2006 roku. Obecnie jest doktorantem ostatniego roku studiów III stopnia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jej zainteresowania obejmują zagadnienia związane z cyfrowym przetwarzaniem obrazów oraz jakością energii elektrycznej.



e-mail: zygarelickia@gmail.com

Prof. dr hab. inż. Janusz MROCZKA

Ukończył studia w 1976r. na Wydziale Elektroniki P. Wr., gdzie w 1981r. uzyskał stopień doktora, a w 1991r. doktora habilitowanego. W wieku 44 lat otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. Autor 136 prac, 8 patentów, współ. 3 książek z metrologii fotonicznej. Wypromował 6 doktorów. Od 1999r. prof. zw. Pol. Wr. Członek licznych towarzystw naukowych w kraju i zagranicą. Od 1998r. założyciel i kierownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej.



e-mail: janusz.mroczka@pwr.wroc.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę pomiarów jakości energii elektrycznej oraz zaprezentowano najważniejsze metody analizy zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych, jakie rozwijane są w zespole zajmującym się jakością energii elektrycznej w Instytucie Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Przedstawiono systematykę metod analiz sygnałów oraz określono metody wykorzystywane obecnie w pomiarach sygnałów elektrycznych. Ponadto zaprezentowano metody alternatywne do transformacji Fouriera umożliwiające precyzyjną analizę częstotliwościową (analiza Prony'ego) oraz lokalizację zakłóceń za pomocą metod czasowo-częstotliwościowych (transformacja Falkowa, dyskretna transformacja Falkowa, dystrybucja Wignera-Ville'a i jej odmiany, transformacja Gabora-Wignera).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, częstotliwościowe analizy sygnałów, czasowo-częstotliwościowe analizy sygnałów.

Advanced signal analysis methods in power quality measurements

Abstract

The issue of measuring power quality parameters and the most important analyses of disturbances occurring in the power network are presented in the paper. These subjects are developed by a power quality and signal analysis group, working at the Faculty of Electrical Engineering, Automatic Control and Informatics. The basic classification of signal analysis

methods is given in the paper (Fig. 1). Moreover, the methods currently used in power quality measurement systems are described. In most cases the analyses are based on Fourier Transformation [2-4]. The methods, due to 10-cycles measurement period, cause significant computational errors in case of existence of short duration harmonics in a signal. Moreover, very precise synchronization of the sampling frequency and real power waveform frequency is needed. Therefore other kinds of analyses in power quality measurement systems are currently investigated. The alternative to Fourier Transformation methods allowing precise estimation of the signal spectrum is Prony analysis [5]. The analysis enables extracting frequency components on the basis of a much shorter measurement window than FFT [6-10]. For localizing the power disturbances, linear (Short-Time Fourier analysis STFT, Gabor Transform GT [12, 13], Wavelet Transform [14, 15, 16]) and bilinear (Wigner-Ville WVD, Pseudo-WVD [17,18]) time-frequency analyses are performed. The combination of both groups of methods (Gabor-Wigner Transform GWT [19,20]) is also presented in the paper. Application of image processing algorithms [21, 22] is also considered in the paper.

Keywords: power quality, frequency domain signal analysis, time-frequency domain signal analysis.

1. Wstęp

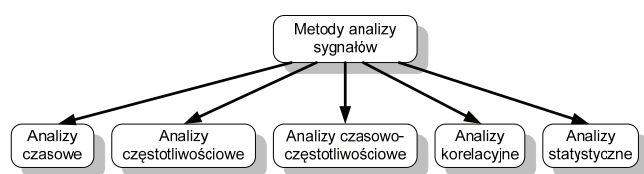
Problematyka jakości energii elektrycznej pojawiła się po raz pierwszy na początku XX wieku, kiedy to zaobserwowano problemy związane z występowaniem w sieciach elektroenergetycznych trzeciej harmonicznej oraz ze sprzęganiem się ze sobą sygnałów w biegnących blisko siebie przewodach elektroenergetycznych z przewodami telefonicznymi [1]. Rozpoczęto wtedy pomiary i rejestrację zjawisk występujących w sieciach elektroenergetycznych oraz rozwinęto teorię wyższych harmonicznych.

Tematyka jakości energii elektrycznej obejmuje zarówno analizę kształtu sygnału jak i jego zawartości widmowej. Obecnie stosuje się wiele różnych, mniej lub bardziej złożonych obliczeniowo metod przetwarzania sygnałów, począwszy od analizy próbek bezpośrednio w dziedzinie czasu (monitoring wartości skutecznej RMS, wartości maksymalnej, parametrów statystycznych), poprzez analizy widmowe (transformacja Fouriera, zespoły

filtrów, analiza Prony'ego) aż po połączenie wymienionych metod oraz analizy czasowo-częstotliwościowe.

2. Wybrane metody analiz jakości energii elektrycznej

Metody analizy sygnałów, w tym analizy związane z badaniem jakości energii elektrycznej można podzielić według schematu pokazanego na rysunku 1.



Rys. 1. Podstawowy podział metod analiz sygnału
Fig. 1. Basic classification of signal analysis methods

Zespół zajmujący się jakością energii elektrycznej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej prowadzi obecnie badania związane z przedstawionymi poniżej metodami.

2.1. Analizy częstotliwościowe

Pod pojęciem analizy sygnałów najczęściej rozumie się ich analizę częstotliwościową. Najlepiej znaną i w dalszym ciągu najczęściej stosowaną metodą analizy jest transformacja Fouriera [2-4], której różne modyfikacje umożliwiły prostą implementację jej algorytmów i zapewniły dużą szybkość procesu przetwarzania. Dla prostych systemów monitorowania i analizy sieci elektroenergetycznych miało to ogromne znaczenie, gdyż umożliwiło stosowanie tanich procesorów sygnałowych w urządzeniach tego typu.

Transformacja Fouriera umożliwia przekształcenie sygnału z dziedziny czasu w dziedzinę częstotliwości, dając informację o komponentach częstotliwościowych zawartych w sygnale. Jednak praktyczne realizacje tego algorytmu są obciążone koniecznymi ograniczeniami [3]. Podstawowe ograniczenia dotyczą liczby przetwarzanych próbek sygnału, wymogu skończonego czasu trwania tzw. okna pomiarowego, itp. W praktycznych zastosowaniach najczęściej występują sygnały, których cechy charakterystyczne ulegają zmianie w czasie tj. sygnały niestacjonarne. Dla tego typu sygnałów transformacja Fouriera okazuje się niewystarczająca, ponieważ widmo takiego sygnału ulega zmianie w czasie, a metoda Fouriera daje uśrednione (w zakresie oknie analizy) wyniki. Interesującą alternatywą do analizy Fouriera jest metoda Prony'ego. Metoda ta jest techniką polegającą na ekstrakcji sinusoid lub eksponent z sygnału, poprzez rozwiązanie liniowego układu równań współczynników [5]. Wykazuje ona pewne podobieństwo do algorytmu liniowej predykcji najmniejszych kwadratów stosowanej w metodach AR oraz ARMA, chociaż nie jest techniką estymacji widma. Metoda Prony'ego zalicza się do grupy metod parametrycznych. Charakteryzuje się precyzyjną estymacją parametrów składowych sygnału takich jak: częstotliwości, amplitudy, fazy a także współczynniki tłumienia. Metoda Prony'ego jest złożona obliczeniowo. Wymaga inwersji dużych macierzy, obliczania pierwiastków wielomianów wysokiego rzędu, itp. Mogą również wystąpić problemy ze stabilnością numeryczną rozwiązań. Metoda ta jest również znana ze swej wrażliwości na szum zawarty w sygnale. Więcej informacji na temat prowadzonych nad metodą Prony'ego badań można znaleźć m.in. w publikacjach: [6-10].

2.2. Analizy czasowo-częstotliwościowe

Osobno stosowane analizy czasowe oraz analizy częstotliwościowe nie dostarczają informacji na temat ewolucji zawartości widma sygnału w funkcji czasu. Dlatego też prowadzone są prace

nad zastosowaniem analiz czasowo-częstotliwościowych w badaniu przebiegów napięć i prądów występujących w sieciach elektroenergetycznych, a w szczególności pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej. Generalnie metody czasowo-częstotliwościowe można podzielić na dwie główne grupy: liniowe oraz biliniowe [11].

Metody liniowe są to metody, w których analizowany sygnał jest bezpośrednio porównywany z odpowiednio dobranymi funkcjami elementarnymi. Cechują się one zazwyczaj mniejszą złożonością obliczeniową w stosunku do metod biliniowych. Do metod liniowych należą m.in. krótkookresowa transformata Fouriera (STFT), transformata Gabora (GT) oraz transformata falkowa. Dwie pierwsze są naturalnym rozszerzeniem transformacji Fouriera [12, 13], natomiast trzecia z nich umożliwia szybką detekcję zakłóceń. W rzeczywistych zastosowaniach stosuje się dyskretną transformację falkową, gdyż ciągła reprezentacja tej transformaty daje dużą liczbę nadmiarowych danych. Najczęściej stosuje się diadyczną dyskretną transformację falkową (DDWT) [14, 15]. Dyskretna transformacja falkowa jest wtedy rozumiana jako zespół filtrów umożliwiających wielorozdzielczą reprezentację sygnału. Pozwala to na dekompozycję analizowanego sygnału na detale wysokoczęstotliwościowe i aproksymację [16]. Otrzymane sygnały można ponownie poddać dekompozycji w celu uzyskania lepszej reprezentacji. Decyzję o kolejnych krokach dekompozycji można podejmować na podstawie entropii sygnału. Taka analiza pozwala na detekcję określonego rodzaju zakłóceń, klasyfikację a także na rekonstrukcję danego zakłócenia w dziedzinie czasu. Metoda jest efektywna obliczeniowo, co wykazano w publikacji [14].

W przypadku aplikacji metod biliniowych (kwadratowych) istotną zaletą jest bezpośrednia projekcja energii sygnału na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej. Jest to szczególnie istotne w pomiarach sygnałów elektroenergetycznych. Ponadto metody te, cechują się bardzo dobrymi rozdzielczościami czasowo-częstotliwościowymi. Przykładem jest tutaj dystrybucja Wignera-Ville'a (WVD). Jednak do istotnych wad tego typu analiz należy pojawianie się charakterystycznych zakłóceń, zwanych członami krzyżowymi (cross-terms). Istnieje wiele odmian metod umożliwiających redukcję zakłóceń m.in. pseudodystrybucja Wignera-Ville'a (PWVD), wygładzona pseudodystrybucja Wignera-Ville'a [17, 18].

Ostatnio prowadzone są badania nad połączeniem dwóch analiz czasowo-częstotliwościowych: liniowych oraz biliniowych. Jedną z takich analiz jest transformacja Gabora-Wignera (GWT) [19, 20], która obliczana jest na podstawie płaszczyzn czasowo-częstotliwościowych uzyskanych w wyniku transformacji Gabora oraz WVD. Zastosowanie takiego podejścia umożliwia połączenie zalet obydwu transformat: bardzo dobrych właściwości czasowo-częstotliwościowych WVD oraz braku członów krzyżowych – GT.

2.3. Inne analizy – fuzje metod

Czasowo-częstotliwościowe reprezentacje sygnałów stały się ostatnio narzędziem, które jest najczęściej wykorzystywane do analizy widmowej i przetwarzania sygnałów niestacjonarnych. Stawiają one sobie za cel jak najdokładniejszą amplitudowo-częstotliwościową dekompozycję analizowanego sygnału w funkcji czasu (lub przestrzeni), czyli przedstawienie zmienności amplitudy, częstotliwości i faz chwilowych jego sygnałów składowych. Niestety w przypadku rozpatrywania sygnałów złożonych z co najmniej dwóch składowych, widmo powstałe w wyniku analizy biliniowej, zostaje zakłócone (z różnym natężeniem) przez powstałe w wyniku analizy interferencje pasożytnicze. W dystrybucji Wignera-Ville'a efekt ten jest najbardziej bezpośredni i mimo bardzo dobrych właściwości tej metody, jej efekt staje się bezużyteczny. Na podstawie otrzymanych wyników nie jest możliwe odwołanie „nieznanego” wcześniej sygnału. W celu eliminacji powstałych artefaktów, wykorzystuje się tzw. wygładzone wersje Wignera-Ville'a (pseudo transformację Wignera-Ville'a i wygładzoną pseudo transformację Wignera-Ville'a), które redukują powstałe interferencje, ale jednocześnie pogarszają rozdzielczość

widmową, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości (tym samym przekłamując wyniki).

Rozwijane obecnie w zespole badawczym metody wykorzystują fuzję „klasycznych” metod przetwarzania sygnałów stosowanych do badania jakości energii elektrycznej z metodami analizy obrazów. Na przykład z metodami morfologicznymi, dzięki którym (na przykład po odpowiednim przygotowaniu maski binarnej) można redukować wcześniej wspomniane artefakty, bez pogarszania rozdzielczości analizowanego obrazu – widma [21- 22]. Metodę można także zastosować, w celu rozpoznawania i klasyfikacji innych zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych (np. przepięć, zapadów itp.).

3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zarys zagadnień związanych z aplikacją zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów w monitoringu jakości energii elektrycznej oraz detekcji i lokalizacji zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych. Przedstawiono metody, które obecnie są rozwijane przez zespół pracujący na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

4. Literatura

- [1] Hanzelka Z.: Jakość Energii Elektrycznej. Międzynarodowa Konferencja jubileuszowa z okazji 50 lecia EAIE, Kraków 7-8 czerwca 2002, s. 65-68.
- [2] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, WKiŁ Warszawa 1982.
- [3] Zieliński T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – Od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2005.
- [4] Zieliński T.: Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów, Wydział EAIiE AGH, Kraków 2002.
- [5] Marple S., Lawrence Jr.: Digital Spectral analysis, Prentice Hall PTR, New Jersey 1987.
- [6] Zygarlicki J., Zygarlicka M., Mroczka J., Łatawiec K.: A reduced Prony's method in power quality analysis – parameters selection, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, April 2010.
- [7] Zygarlicki J., Zygarlicka M., Mroczka J.: Data compression using Prony's method and wavelet transform in power quality monitoring systems, Metrology and Measurement Systems (MAMS), vol. 13, no. 3, pp. 237-251, Sep. 2006.
- [8] Zygarlicki J., Zygarlicka M., Mroczka J.: Prony's method in power quality analysis, in Proc. 9th Int. Scientific Conf. Electric Power Engineering (EPE), Brno, Czech Republic, 2008, pp. 115-119.
- [9] Zygarlicki J., Mroczka J.: Analiza sygnałów elektroenergetycznych z wykorzystaniem połączonych metod Prony'ego oraz filtracji M-pasmowej, materiały konferencyjne Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych (MiSSP), Krynica, 20-24 września 2009, s.37-46.
- [10] Zygarlicki J., Zygarlicka M., Mroczka J.: Prony's method in power quality analysis, Energy Spectrum, vol. 4, no. 2, pp. 26-30, 2009.
- [11] Poularikas A.D.: The Transforms and Applications Handbook: Second Edition. CRC Press, Boca Raton 2000.
- [12] Satish L.: Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during impulse tests, IEE Proceedings–Science Measurement and Technology, vol. 145, no. 2, March 1998, pp. 77-84.
- [13] Zhang F., Geng Z., Yuan W.: The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 16, no. 2, April 2001, p. 160-164.
- [14] Górecki K., Mroczka J.: Wykorzystanie entropii i odchyleń standardowych detali wysokoczęstotliwościowych dyskretnej transformacji falkowej w detekcji zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych oraz ich implementacja na procesorze sygnałowym. Pomiary Automatyka Kontrola, 2006 nr 10, 2006, s. 66-69, bibliogr. 12 poz.
- [15] Perunicic B., Mallini M., Wang Z., Liu Y.: Power Quality Disturbance Detection and Classification Using Wavelets and Artificial Neural Networks. Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece, October 14-16, 1998, p. 77-82.
- [16] Mallat S. G.: A Theory for Multiresolution Signal Decomposition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. II, No. 7. July 1989.
- [17] Szmajda M.: Aplikacja transformacji Wignera-Ville'a w pomiarach zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych, Kongres Metrologii KM 2004, Wrocław 2004, s. 637-640.
- [18] Szmajda M., Mroczka J.: Aplikacja transformacji SPWVD w pomiarach jakości energii elektrycznej z wykorzystaniem procesora DSP, Pomiary Automatyka Kontrola, październik 2006, s. 70-72.
- [19] Cho S. H., Jang G., Kwon S. H.: Time-Frequency Analysis of Power-Quality Disturbances via the Gabor-Wigner Transform, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 25, pp.494-499, Jan. 2010.
- [20] Szmajda M., Górecki K., Mroczka J.: Gabor Transform, Gabor-Wigner Transform and SPWVD as a Time-Frequency Analysis of Power Quality, Metrology and Measurement Systems, vol. XVII, number 3 (2010).
- [21] Zygarlicka M., Mroczka J.: Reduction of the cross-terms of Wigner-Ville distribution by image processing, Międzynarodowe Warsztaty Doktorantów – OWD 2008, 18-21.10.2008r.
- [22] Zygarlicka M.: Binary quantization of 2D images obtained from Short-Time Fourier Transform and Wigner-Ville Distribution methods used in power quality investigation, III Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej, Zeszyt Elektryka z. 62, Nr 329/2009.

otrzymano / received: 25.11.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.02.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO PAK

ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl