

Mirosław SZMAJDA¹, Janusz MROCZKA²

¹POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI, INSTYTUT ELEKTROWNI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

²POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

Aplikacja transformacji SPWVD w pomiarach jakości energii elektrycznej z wykorzystaniem procesora DSP

Dr inż. Mirosław SZMAJDA

Urodził się w 1975r. w Kędzierzynie-Koźlu. Tytuł magistra uzyskał w roku 2000 na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej na specjalności Aparatura Elektroniczna. W roku 2005 uzyskał stopień doktora. Aktualnie pracuje jako asystent na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej w Katedrze Elektrowni i Systemów Pomiarowych. Zajmuje się on tematyką cyfrowego przetwarzania sygnałów, a w szczególności pomiarami parametrów jakości energii elektrycznej.

e-mail: szmajda@po.opole.pl



Prof. dr hab. inż. Janusz MROCZKA

Ukończył studia w 1976r. na Wydziale Elektroniki Pol. Wr., gdzie również w 1981r. uzyskał stopień doktora, a w 1991r. doktora habilitowanego. W 1996 r. otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. Autor 185 prac, 8 patentów, współ. 4 książek z metrologii fotonicznej. Od 1999r. prof. zw. Pol. Wr. Wiceprzewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk. Od 1998r. założyciel i kierownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej.

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



Streszczenie

W artykule przedstawiono badania dotyczące zastosowania wygładzonej pseudo-transformacji Wignera-Ville'a w pomiarach wybranych parametrów jakości energii elektrycznej. Przeprowadzono analizę wyników badań transformacji najczęściej występujących zakłóceń sygnału elektroenergetycznego takich jak: harmoniczne, wolne (zapady, podwyższenia napięcia) i szybkie zmiany napięcia (flicker) oraz przepięcia przejściowe sinusoidalne eksponencjalnie tłumione. „Sygnałem elektroenergetycznym” autorzy nazywają sygnał sinusoidalny o częstotliwości 50Hz oraz nominalnej wartości skutecznej 230V, mający na celu modelować przebieg napięcia sieci zasilającej niskiego napięcia. Zaprezentowano również aplikację metody w systemie mikroprocesorowym zbudowanym w oparciu o procesor sygnałowy DSP.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, transformacja Wignera-Ville'a, procesor DSP.

The application of SPWVD transformation in power quality measurements with DSP processor use

Abstract

The paper presents the research concerning the Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution in power quality parameters measurement. Also, some investigations of SPWVD results of most frequently appearing disturbances in the power network were done. The disturbances include harmonics, slow (sags, swells) and fast voltage changes (flicker) and fast transients. The application of the method in DSP microprocessor system were presented.

Keywords: power quality, Wigner-Ville Transformation, DSP processor.

1. Wstęp

Pojęcie jakości energii elektrycznej pojawiło się już na początku XX wieku. Było ono wynikiem kłopotów związanych z występowaniem w sieciach energetycznych trzeciej harmonicznej oraz z problemem sprzęgania 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 rozwinięto teorię wyższych harmonicznych.

Obecnie najczęściej stosowaną i dobrze znaną metodą obliczania harmonicznych jest dyskretna transformacja Fouriera - DFT, a w szczególności szybka transformacja Fouriera - FFT [2, 3, 4]. Niewątpliwą zaletą tej metody jest jej mała złożoność obliczeniowa, natomiast wadą jest brak zdolności lokalizacji czasowej zakłóceń w oknie pomiarowym. Z tego względu prowadzonych jest wiele badań nad aplikacją metod czasowo-częstotliwościowych w pomiarach jakości energii elektrycznej [3, 5]. Jedną z tego typu metod jest transformacja Wignera-Ville'a.

Do jej głównych zalet można zaliczyć: reprezentację bezpośredniej chwilowej wartości energii sygnału w funkcji czasu i częstotliwości, dobre odwzorowanie liniowej zmiany częstotliwości sygnału, dwukrotnie większą rozdzielczość częstotliwościową w porównaniu z krótkokresową transformacją Fouriera [6, 7]. Transformacja Wignera-Ville'a jest jednak metodą dużo bardziej złożoną obliczeniowo i dotychczas była trudno aplikowalną w systemach mikroprocesorowych. Obecnie dzięki szybkiemu rozwojowi technologii DSP (Digital Signal Processing) staje się możliwe zastosowanie jej w takich systemach, a w szczególności w autonomicznych systemach pomiarowych jakości energii elektrycznej.

Systemy te umożliwią wyznaczanie parametrów związanych z ciągłością zasilania (długie i krótkie przerwy w zasilaniu), charakterystyką napięcia zasilania (wartość, niesymetria częstotliwości i kształt przebiegu czasowego) [8, 9] oraz charakterem widmowym sygnału (wartość skuteczna harmonicznych, THD, itd.). Możliwa będzie również jednoczesna precyzyjna lokalizacja czasowa wymienionych zakłóceń.

2. Transformacja WVD oraz SPWVD

Transformacja Wignera-Ville'a jest jedną z analiz czasowo-częstotliwościowych cechującą się między innymi bardzo dobrą lokalizacją czasową oraz częstotliwościową poszczególnych komponentów widma [6, 7]. Daje ona bardzo dobre wysokorozdzielcze wyniki w przypadku analizy sygnałów o minimalnej zawartości wyższych harmonicznych. Natomiast w sygnałach zawierających wyższe harmoniczne pojawiają się tak zwane „człony krzyżowe” pomiędzy poszczególnymi harmonicznymi. Są to pasożytnicze sygnały o częstotliwościach będących różnicą częstotliwości wywołujących je harmonicznych. Konieczne staje się zatem wprowadzenie dodatkowych okien filtrujących redukujących powstające człony krzyżowe. Wadą tego rozwiązania jest ograniczenie pierwotnych bardzo dobrych własności rozdzielczych metody. Transformacja WVD z nałożonymi oknami filtrującymi przedstawiono za pomocą równania 1. Równanie to nosi nazwę wygładzonej pseudo-transformacji Wignera-Ville'a SPWVD.

$$SPWVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h\left(\frac{\tau}{2}\right) h^*\left(-\frac{\tau}{2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} g(t-t') s\left(t'+\frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t'-\frac{\tau}{2}\right) dt' e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

gdzie: $h(t)$ – okno redukujące czasowe człony krzyżowe, $g(t)$ – okno redukujące częstotliwościowe człony krzyżowe.

Jako okna $h(t)$ oraz $g(t)$ można stosować zarówno okna parametryczne jak i nie parametryczne. W pomiarach jakości najczęściej jednak stosuje się okna Hanninga lub prostokątne [9].

3. Aplikacja

Analizę SPWVD zastosowano do najczęściej występujących zakłóceń w rzeczywistym sygnale elektroenergetycznym: sygna-

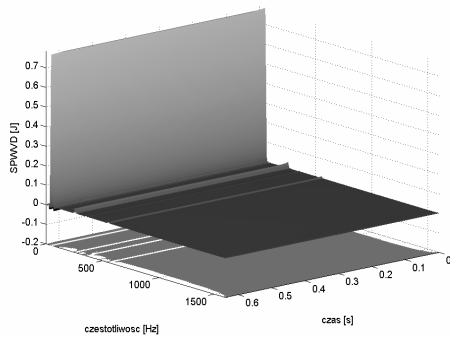
łów zniekształconych przez harmoniczne (wzór 2, rys. 1), sygnałów z zapadami napięcia (wolnymi zmianami napięcia) (wzór 3, rys. 2), sygnałów z szybkimi zmianami napięcia (wahaniami napięcia) (wzór 4, rys. 3) oraz sygnałów z szybkimi przepięciami przejściowymi o charakterze oscylacyjnym eksponencjalnie tłumionym (rys. 4).

Sygnały elektroenergetyczne wraz z wymienionymi zakłóceniami poddano analizie SPWVD, w której zastosowano okna $h(t)$ i $g(t)$ typu Hanninga o szerokościach 0,06s.

$$s(t) = 230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 50t) + 40 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 250t) + 10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 350t) + 20 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 550t) \quad (2)$$

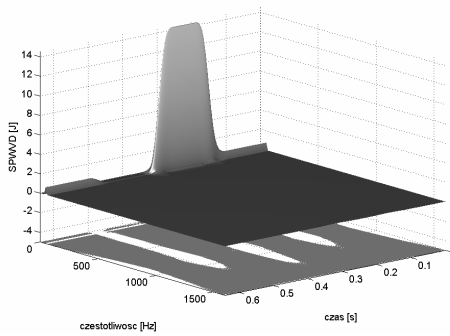
$$s(t) = \begin{cases} 230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 50t) & t \in (0s, 0.16s) \\ 1000 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 50t) & t \in (0.16s, 0.32s) \\ 50 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 50t) & t \in (0.32s, 0.48s) \\ 230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi 50t) & t \in (0.48s, 0.64s) \end{cases} \quad (3)$$

$$s(t) = 230 \cdot \sqrt{2} [1 + 0.1 \cdot \cos(2\pi 5t)] \cos(2\pi 50t) \quad (4)$$



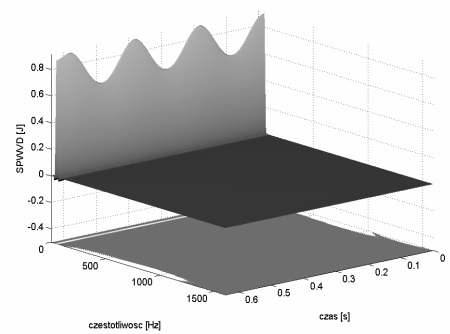
Rys. 1. Wyniki analizy SPWVD sygnału elektroenergetycznego zakłóconego harmonicznymi

Fig. 1. The results of SPWVD power signal distorted by harmonics



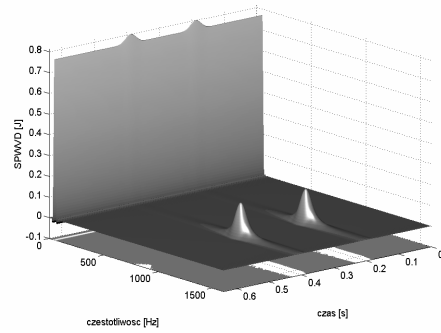
Rys. 2. Wyniki analizy SPWVD sygnału elektroenergetycznego zakłóconego wolnymi zmianami napięcia

Fig. 2. The results of SPWVD power signal distorted by short duration variations



Rys. 3. Wyniki analizy SPWVD sygnału elektroenergetycznego zakłóconego szybkimi zmianami napięcia

Fig. 3. The results of SPWVD power signal distorted by fast duration flicker



Rys. 4. Wyniki analizy SPWVD sygnału elektroenergetycznego zakłóconego przejściowymi przepięciami o charakterze oscylacyjnym eksponencjalnie tłumionym

Fig. 4. The results of SPWVD power signal distorted by fast transients of oscillated and exponentially damped character.

4. Implementacja w procesorze sygnałowym

Analiza SPWVD została zaimplementowana w procesorze sygnałowym TMS320C6711 firmy Texas Instruments. Jest to 32-bitowy procesor zmiennoprzecinkowy o mocy obliczeniowej 900 MFLOPS. Czas trwania jednego cyklu rozkazowego w użytej konfiguracji wynosił 6.667ns. Posiada on wbudowane pamięci podręczne programu (L1P cache) oraz danych (L1D cache) o pojemności 4kB każda. Procesor wyposażony jest również w pamięć podręczną L2 o wielkości 64kB, w której znajduje się kod wykonywalny programu oraz przestrzeń pamięci danych.

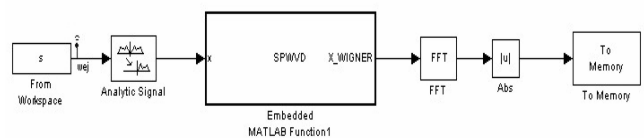
W badaniach został wykorzystany moduł startowy z wymienionym procesorem, w którym znajdowały się dodatkowe pamięci SDRAM o pojemności 4M słów 32-bitowych. Do oprogramowania modułu wykorzystano środowisko uruchomieniowe CCS (ang. Code Composer Studio), umożliwiające m.in.: określenie ilości cykli maszynowych przypadających na dany fragment kodu, wyznaczenie czasu wykonywania programu, odczytanie ilości pamięci danych i programu zajmowanych przez procedury.

Środowisko CCS umożliwia współpracę z pakietem SIMULINK oraz biblioteką DSP Blockset, w którym możliwe jest modelowanie transformacji za pomocą zdefiniowanych w zbiorach bibliotecznych bloków. Model został podzielony na kilka części, aby możliwe było określenie wpływu poszczególnych bloków na całościowy czas obliczeń metody oraz wielkość zajmowanej pamięci programu i danych.

Dyskretna wygładzona transformacja Wignera-Ville'a DSPWVD może być obliczona w oparciu o transformację Fouriera członu [10]:

$$h(m)h^*(-m) \sum_{l=-(M-1)}^{M-1} [g^2(l)z(n+l, m)] \quad (5)$$

Człon ten przedstawiony jest w modelu na rys. 5 jako „Blok2”.



Rys. 5. Model transformacji SPWVD w Simulinku

Fig. 5. The SPWVD transformation model in the Simulink

Została przeprowadzona analiza poszczególnych bloków pod kątem czasu ich trwania, zajmowanej ilości pamięci programu oraz wielkości dodatkowej pamięci RAM wymaganej do składowania danych wejściowych, wyników obliczeń i zmiennych tymczasowych (tabela 1).

Tab. 1. Czasy trwania i zapotrzebowanie na pamięć RAM poszczególnych bloków
 Tab. 1. Duration times and requirements on RAM memory size of particular Simulink blocks

ilość próbek N	blok 1		blok 2 (M=2)		blok 3		całość	
	[ms]	[kB]	[ms]	[kB]	[ms]	[kB]	[ms]	[kB]
128	0,339	9,03	0,307	4,50	0,232	5,02	0,877	18,54
256	0,688	16,53	0,607	7,50	0,469	8,00	1,764	32,03
512	1,400	36,03	1,199	13,50	0,987	15,52	3,586	65,04
1024	3,061	60,55	2,386	25,50	2,212	29,52	7,659	115,57
2048	6,572	121,53	5,051	49,50	4,647	57,52	16,270	228,54
4096	14,448	241,53	11,900	97,50	10,215	113,52	36,563	452,54

Badania wykazują, że najdłużej wykonywana jest transformacja Hilberta oraz formowanie na jej podstawie sygnału analitycznego. Dwukrotny wzrost ilości próbek powoduje praktycznie podwojenie czasu wykonywania obliczeń.

Rozmiar pamięci danych RAM potrzebnych do implementacji metod jest również proporcjonalny do ilości próbek wejściowych, natomiast wielkość kodu programu transformacji wynosi około 11.5kB.

5. Wyniki badań

Analiza SPWVD sygnału elektroenergetycznego zakłóconego harmonicznymi (rys. 1) dostarcza informacji na temat obecności wyższych harmonicznymi 250Hz, 550Hz i 350Hz. Harmoniczna 350Hz ma bardzo małą amplitudę w stosunku do energii harmonicznej podstawowej i dlatego też jest w na rysunku praktycznie niewidoczna. Na podstawie wyników SPWVD można również wyznaczyć współczynnik THD (ang. Total Harmonic Distortion) [8], dla którego błąd obliczeniowy w tym przypadku wyniósł około 0.1%.

Wyniki transformacji SPWVD sygnału zakłóconego przez pądy (obniżenie wartości skutecznej poniżej 90% wartości nominalnej) oraz podwyższenia napięcia (w badanym przypadku do 1000V) przedstawione na rys. 2 charakteryzują się pewnym opóźnieniem na zmianę zawartości sygnału. Opóźnienie to jest związane z zastosowaniem okien czasowych $h(t)$ oraz $g(t)$. Dobór wymienionych okien był wynikiem kompromisu pomiędzy rozdzielczością widmową analizy, a opóźnieniem reakcji analizy na zmiany sygnału. Analiza zatem daje dobre wyniki w przypadku badania sygnałów o czasie trwania zakłóceń większym od szerokości okien $g(t)$ oraz $h(t)$.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki analizy SPWVD flikera. Zjawisko to zamodelowano za pomocą sygnału zmodulowanego amplitudowo. Sygnał powstał w wyniku modulacji sygnału elektroenergetycznego falą modulującą o częstotliwości 5Hz oraz o głębokości modulacji 0.1. W związku z tym, że definicja wahań napięcia obejmuje częstotliwość zmiany jego wartości skutecznej od kilku do kilkunastu herców, analiza SPWVD dostarcza dobrych danych wejściowych do wyznaczenia parametrów związanych ze zjawiskiem migotania światła – wskaźników P_{st} oraz P_{It} .

W przypadku badań szybkich przebiegów przejściowych (rys. 4) dokładna lokalizacja i precyzyjne ustalenie wartości energii niesionej przez zniekształcenia o krótkim czasie trwania są praktycznie niemożliwe w przypadku stosowania okien $h(t)$ i $g(t)$ o tak dobranych wartościach. Skrócenie czasu trwania okien, mające na celu zwiększenie dokładności lokalizacji czasowej zakłócenia, wpłynie negatywnie na rozdzielczość częstotliwościową metody, co uniemożliwi wyznaczenie takich współczynników jak THD, czy wartości poszczególnych harmonicznymi. Zatem w przypad-

kach tego typu zakłóceń analiza SPWVD dostarcza informacji dotyczących tylko parametrów jakościowych zakłócenia, określając jednocześnie parametry ilościowe z dużym błędem.

Aplikacja transformacji na procesorze sygnałowym umożliwiła zbadanie czasów trwania oraz wielkości pamięci danych i programu wymaganej przez tę metodę. Sumaryczne czasy obliczeń dla ilości próbek mniejszej od 1024 sugerują możliwość zastosowania metody do obliczeń „on-line”. Wielkość pamięci RAM (nawet dla 4096 próbek) mieści się w zakresie osiągalnym przez współczesne układy mikroprocesorowe, a w szczególności przez układy implementujące procesory sygnałowe. Również i wielkość pamięci kodu programu jest wartością łatwo aplikowalną w niezależnych układach cyfrowego przetwarzania sygnałów.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono transformację SPWVD sygnałów elektroenergetycznych zakłóconych przez najczęściej występujące w rzeczywistych sieciach zasilających zniekształcenia. Szerokość okien niwelujących człony krzyżowe została tak dobrana, aby możliwe było określenie podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej. Transformacja SPWVD z tak dobranymi parametrami umożliwia czasowo-częstotliwościową lokalizację zakłóceń trwających dłużej od wartości szerokości okien. Zakłócenia o krótszym czasie trwania są również wykrywane przez transformację dostarczając jednak tylko informacji o charakterze jakościowym zakłócenia.

Możliwa jest również aplikacja metody w szybkim procesorze sygnałowym. Może ona stanowić podstawę do budowy systemu pomiarowego jakości energii elektrycznej opartego o alternatywną do dyskretnej transformacji Fouriera analizę cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Artykuł opublikowany dzięki wsparciu Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej.

7. Literatura

- [1] Hanzelka Z.: Jakość Energii Elektrycznej, Międzynarodowa Konferencja jubileuszowa z okazji 50 lecia EAIE, Kraków 7-8 czerwca 2002, s. 65-68.
- [2] Rong-Ching Wu, Ta-Peng Tsao, Chia-Ching Ning: The Optimization of Spectral Analysis for Signal Harmonics, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 16, no. 2, April 2001, pp. 149-153.
- [3] Heydt G.T., Fjeld P.S., Liu C.C., Pierce D., Tu L., Hensley G.: Application of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 14, no. 4, October 1999, p. 1411-1416.
- [4] Sankaran C.: Power Quality, CRC Press, New York 2002.
- [5] Poisson O., Rioual P., Meunier M., New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp. 561-566.
- [6] Shie Qian, Dapang Chen: Joint Time-Frequency Analysis. Methods and Applications, Prentice Hall PTR, New Jersey 1996.
- [7] Poularikas A.D.: The Transforms and Applications Handbook: Second Edition, CRC Press, Boca Raton 2000.
- [8] PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [9] PN-EN 61000-4-7:1998: Kompatybilność elektromagnetyczna – Metody badań i pomiarów –Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznymi i interharmonicznymi oraz stosowanych do tego celu przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [10] Zieliński T.: Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów, Wydział EAIe AGH, Kraków 2002.