

doi:10.15199/48.2016.03.17

Metoda zwiększająca dokładność wyznaczania składowych harmoniczných przebiegów elektrycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy związane z wyznaczaniem składowych harmoniczných za pomocą transformaty Fouriera. Zaprezentowano sposoby określania tych składowych z wykorzystaniem metod optymalizacji. Zaproponowano procedurę pozwalającą na zwiększenie dokładności wyznaczania składowych harmoniczných, wykorzystującą metody optymalizacji. Pokazano na przykładach korzyści wynikające z wykorzystania metod optymalizacji do wyznaczania składowych harmoniczných.

Abstract. The paper presents problems related to the determine of harmonic components using Fourier transform. The methods for determining these components using optimization methods. It proposes a procedure for increasing the accuracy of determining harmonic which uses optimization methods. The examples showing the benefits of using proposed methods for determination of the harmonic components are also presented. (The method of increasing the accuracy of determining harmonic components of electrical waveforms).

Słowa kluczowe: harmoniczne, sygnały, pomiary, wyznaczanie, optymalizacja.

Keywords: harmonic components, signals, measurements, determination, optimization.

Wstęp

Eksploatacja urządzeń elektrycznych związana jest z zapewnieniem niezakłóconego dopływu energii elektrycznej. Dostarczenie wystarczającej ilości energii nie jest jedynym wymaganiem. Ważne jest także, żeby dostarczona energia charakteryzowała się określonymi parametrami, pozwalającymi na niezakłóconą pracę zasilanych nią urządzeń [1]. Zbiór wymagań dotyczących parametrów energii elektrycznej zawarty jest w normach określających jakość energii elektrycznej. Zawierają one dopuszczalne przedziały, w jakich mogą znajdować się parametry określające jakość energii elektrycznej [2]. Jednym z podstawowych parametrów jest stopień odkształcenia napięcia. Do jego określenia wyznacza się najczęściej współczynnik odkształcenia THD, lub analizuje zawartość wyższych harmoniczných. Parametry te wykorzystuje się także, do oceny wpływu odbiornika na sieć zasilającą i wyznacza się je w takim przypadku dla przebiegów prądu [3].

W normach określone są dopuszczalne wartości poszczególnych harmoniczných napięcia zasilającego. W związku z tym w celu udowodnienia spełnienia wymagań, należy dokonać pomiaru harmoniczných napięcia. W przypadku mikroprocesorowych przyrządów pomiarowych do wyznaczania harmoniczných wykorzystuje się szybką transformatę Fouriera. Pozwala ona w efektywny sposób określić poszczególne składowe. Dokładność wyznaczania zależy jednak od dopasowania długości okna pomiarowego do okresu składowej podstawowej. W przypadku braku dopasowania pojawia się błąd związany ze zjawiskiem przecieku, który powoduje, że wyznaczone amplitudy poszczególnych harmoniczných mają nieprawidłowe wartości.

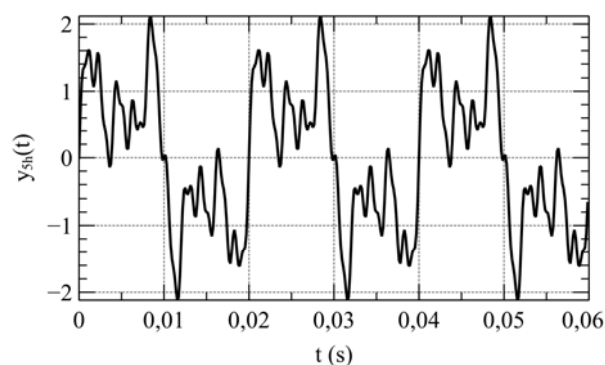
W ramach pracy przeanalizowano problemy związane z wyznaczaniem współczynników transformaty Fouriera dla stałej częstotliwości próbkowania. Przeanalizowano możliwości wykorzystania metod optymalizacji do wyznaczenia prawidłowych wartości współczynników, gdy częstotliwość próbkowania nie jest prawidłowo dobrana do częstotliwości mierzonego przebiegu. Opracowano sposób pozwalający na wyznaczenie prawidłowych wartości dla każdego okresu badanego przebiegu, co nie jest możliwe przy wykorzystaniu klasycznego algorytmu przekształcenia Fouriera.

Problemy związane z wyznaczaniem harmoniczných

Wyznaczanie dokładnych wartości harmoniczných napięć i prądów w przypadku urządzeń zasilanych

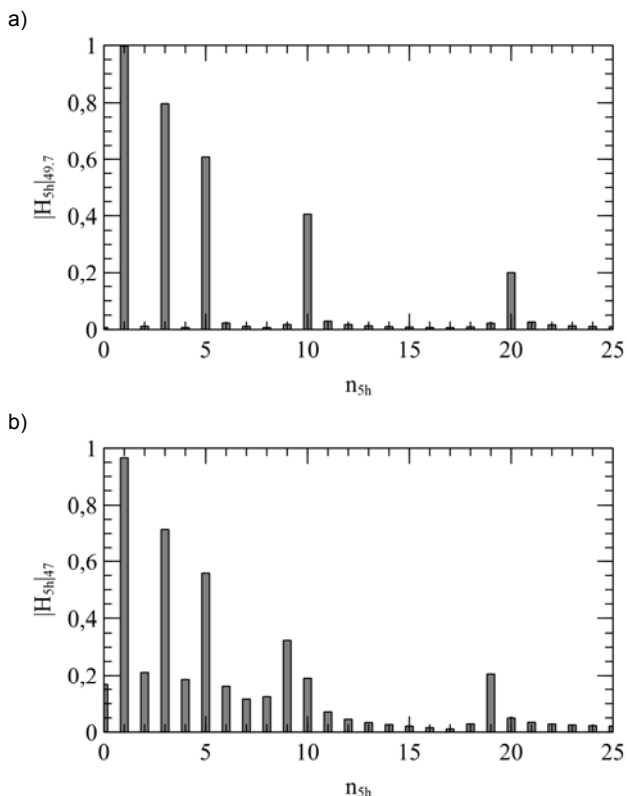
napięciem o zmiennej częstotliwości wymaga stosowania złożonych urządzeń pomiarowych, które dostosowują częstotliwość próbkowania do zmian częstotliwości składowej podstawowej. W wielu systemach pomiarowych często wykorzystuje się prostszą metodę wyznaczania harmoniczných sygnału, polegającą na zarejestrowaniu przebiegu ze stałą częstotliwością próbkowania i wyznaczeniu dyskretnej lub szybkiej transformaty Fouriera [4]. W tym przypadku wyniki obarczone są błędem spowodowanym zjawiskiem przecieku. Powoduje ono rozproszenie energii pojedynczej harmoniczných na harmoniczne sąsiednie, dając w wyniku nieprawidłowe wartości poszczególnych składowych [5]. Stosowane są metody pozwalające na ograniczenie tego zjawiska. Nie pozwalają one jednak na uzyskanie dokładnych wartości.

W celu zbadania wpływu zmian częstotliwości na dokładność wyznaczania amplitud składowych harmoniczných, w ramach pracy przeprowadzono szereg eksperymentów, w których wyznaczano składowe dla jednego okresu napięcia o częstotliwości 50 Hz oraz niewielkich odchyień od tej częstotliwości. Podstawowym warunkiem jaki należy spełnić w tego typu badaniach jest zasada Nyquista-Shannona wymagająca, żeby częstotliwość próbkowania była przynajmniej dwukrotnie większa od składowej harmoniczných sygnału o największej częstotliwości. Normy dotyczące jakości energii elektrycznej wymagają pomiaru składowych harmoniczných do 50-tej harmoniczných. Częstotliwość próbkowania f_s powinna wynosić w takim przypadku minimum 5 kHz. W rzeczywistych systemach, w związku z koniecznością stosowania filtrów antyaliasingowych najczęściej wykorzystuje się większe częstotliwości.



Rys. 1. Przebieg harmoniczny o 5-ciu składowych

Na rysunku 1 pokazano przykładowy przebieg składający się ze składowej podstawowej o częstotliwości 50 Hz i czterech składowych harmonicznymi o częstotliwościach 150 Hz, 250 Hz, 500 Hz oraz 1000 Hz. Przesunięcie fazowe poszczególnych składowych wynosi 0.

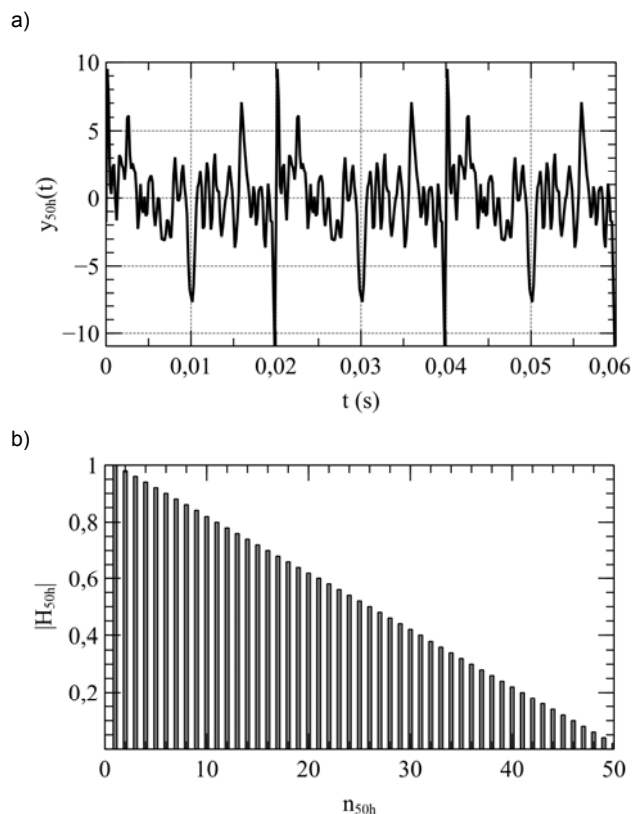


Rys. 2. Amplitudy harmonicznych dla częstotliwości sygnału a) 49,7 Hz, b) 47 Hz

W celu wyznaczenia harmonicznych sygnału przy wykorzystaniu dyskretnej transformaty Fouriera, wymagane jest zastosowanie okna o minimalnej szerokości obejmującej 100 próbek sygnału. W przypadku wykorzystania szybkiej transformaty Fouriera ilość próbek powinna być potęgą liczby 2. W związku z tym, częstotliwość próbkowania powinna wynosić 6400 Hz. Umożliwi to wyznaczenie na podstawie 128 próbek, 64 harmonicznych sygnału z krokiem częstotliwości wynoszącym 50 Hz.

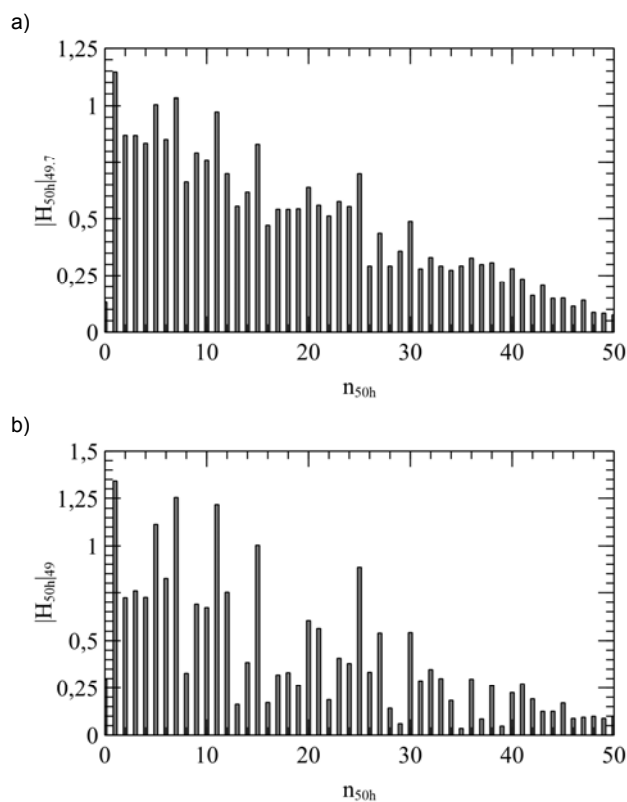
W sytuacji gdy składowa podstawowa wynosi 50 Hz wyznaczone współczynniki transformaty mają takie same wartości jak w przebiegu wejściowym. Rysunek 2a przedstawia wyznaczone składowe harmoniczne, gdy składowa podstawowa wynosi 49,7 Hz. W przypadku, gdy odchylenia częstotliwości mają niewielką wartość, amplitudy poszczególnych składowych wyznaczone są z niewielkim błędem. Pojawiają się jednak nie występujące w sygnale składowe o niewielkiej wartości. Na rysunku 2b pokazano przebieg o częstotliwości składowej podstawowej wynoszącej 47 Hz. Dla większych odchyłek częstotliwości występują znaczne błędy w wyznaczonych wartościach. Pojawia się także duża ilość składowych nie występujących w sygnale, o znaczących wartościach.

Problem pojawia się wtedy, gdy okres składowej podstawowej nie pokrywa się z szerokością okna służącego do wyznaczania FFT. Występują wtedy nieciągłości na krańcach przedziałów, co związane jest z tym, że przy wyznaczaniu transformaty Fouriera przyjmowane jest założenie, że przebieg jest okresowy o okresie równym długości okna wykorzystywanego do obliczeń.



Rys. 3. Przebieg harmoniczny o 50-ciu składowych a) przebieg czasowy, b) amplitudy harmonicznych

Wraz ze wzrostem ilości harmonicznych w sygnale problem ten narasta. W celu pokazania wpływu odchyłek częstotliwości dla sygnałów o dużej ilości harmonicznych, w ramach badań wygenerowano sygnał przedstawiony na rysunku 3 składający się z 50-ciu harmonicznymi.



Rys. 4. Amplitudy harmonicznych dla różnych częstotliwości sygnału o 50-ciu składowych a) 49,7 Hz, b) 49 Hz

Amplitudy harmonicznych wyznaczone dla tego przebiegu w przypadku, gdy częstotliwość wynosi 49,7 Hz i 49 Hz pokazane są na rysunku 4. Widać na nim wyraźnie, że dla dużej ilości składowych błędy obliczeniowe występują przy stosunkowo niewielkiej odchyłce częstotliwości. Błędy te można w niewielkim stopniu zmniejszyć za pomocą okien, jednak nie jest możliwe ich całkowite wyeliminowanie.

Wyznaczanie harmonicznych z zastosowaniem metod optymalizacji

W poprzednim punkcie przedstawione zostały problemy związane z wyznaczeniem składowych harmonicznych sygnału, w przypadku przyjęcia stałej częstotliwości próbkowania. W celu ograniczenia błędów stosuje się różne techniki, jednak nie pozwalają one na uzyskanie poprawnego rezultatu. Dlatego w ramach prowadzonych badań przeanalizowano możliwość wykorzystania metod optymalizacji, do określania wartości składowych harmonicznych mierzonych sygnałów.

W przypadku klasycznego problemu optymalizacji podstawowym zadaniem jest określenie funkcji celu, zapewniającej znalezienie poprawnych parametrów poszukiwanej funkcji, zapewniających prawidłowe odwzorowanie przebiegu mierzonych.

Dla zadania poszukiwania składowych harmonicznych sygnału, jako funkcję celu można wybrać funkcję wykorzystywaną w metodzie najmniejszych kwadratów, określoną jako suma kwadratów różnic pomiędzy sygnałem mierzonym a wartością uzyskaną z zidentyfikowanego modelu. W celu wyznaczenia składowych harmonicznych sygnału funkcję celu określić można następująca zależnością

$$(1) e(\mathbf{t}, f, \mathbf{A}, \Phi) = \sum_K \left(y(t_k) - \sum_n A_n \sin(2\pi f t_k + \Phi_n) \right)^2$$

gdzie \mathbf{t} jest wektorem o długości K zawierającym wartości czasu, dla których wyznaczana jest funkcja błędu, f jest poszukiwaną częstotliwością składowej podstawowej, \mathbf{A} jest wektorem opisującym amplitudy poszczególnych harmonicznych, Φ jest wektorem opisującym fazy składowych sygnału. Jeżeli zapiszemy, że poszukiwany wektor parametrów \mathbf{P} ma postać

$$(2) \mathbf{P} = (f, \mathbf{A}, \Phi)$$

To zadanie optymalizacji będzie polegało na znalezieniu takiego wektora parametrów \mathbf{P} , że

$$(3) \bar{\mathbf{P}} = \arg \min_{\mathbf{P}} e(\mathbf{t}, f, \mathbf{A}, \Phi)$$

Do wyznaczenia rozwiązania zadania (3) można wykorzystać różne metody optymalizacji, jednak należy zwrócić uwagę, że w przypadku metod bez ograniczeń może wystąpić problem związany z trudnością znalezienia minimum globalnego. Związane jest to z tym, że przebiegi sinusoidalne są okresowe i w związku z tym występują też okresowe zmiany funkcji celu, powodujące powstawanie minimów lokalnych.

Na podstawie przedstawionych w pracy [6] przebiegów można stwierdzić, że funkcja celu posiada wiele minimów lokalnych. Jej przebieg jest bardziej regularny dla składowych o małej częstotliwości, wraz ze wzrostem częstotliwości, w przedstawionym obszarze pojawia się coraz więcej minimów lokalnych. Powoduje to, że przy poszukiwaniu rozwiązania istotne znaczenie będzie miało przyjęcie odpowiednich warunków początkowych. Poza tym

skuteczność znalezienia prawidłowego rozwiązania będzie zależała od ilości harmonicznych występujących w sygnale. Jeżeli w sygnale będzie wiele harmonicznych o dużych częstotliwościach, to zadanie optymalizacji będzie trudniejsze do rozwiązania.

Dodatkowy problem stanowią niejednoznaczności związane z fazą sygnału powodujące, że w przypadku wykorzystywania do identyfikacji metod bez ograniczeń amplitudy niektórych składowych mogą przyjmować wartości ujemne. W związku z tym do efektywnego wykorzystania metod optymalizacji, celowe jest wykorzystanie algorytmów pozwalających na wprowadzenie ograniczeń zapewniających utrzymanie poszukiwanych parametrów w zadanych zakresach.

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki uzyskane z wykorzystaniem języka programowania Python i metody SLSQP (Sequential Least Squares Programming) dostępnej w module `scipy.optimize`. Metoda ta pozwala na ograniczenie wartości parametrów. Wprowadzone ograniczenia wynosiły (0,10) dla amplitud i $(-2\pi, 2\pi)$ dla faz. W przypadku częstotliwości przyjęto zakres (40, 60) dla sygnału składającego się z pięciu harmonicznych i (47, 51) dla sygnału zawierającego 50 harmonicznych. Wszystkie przedstawione wyniki uzyskano przy wykorzystaniu 128 próbek sygnału.

Badania prowadzono dla różnych odchyłek częstotliwości od 50 Hz. Jako częstotliwość początkową dla metody optymalizacji przyjęto wartość 50 Hz, amplituda składowej podstawowej wynosiła 0.7, pozostałe składowe miały wartość 0 lub wartość losową. W przypadku identyfikacji parametrów sygnału o ograniczonej zawartości harmonicznych i częstotliwości 47 Hz uzyskano wartości praktycznie zgodne z przebiegiem wzorcowym. Przy dalszym obniżaniu częstotliwości zaczęły pojawiać się odchyłki w wartościach otrzymanych harmonicznych. Dla sygnałów o dużej zawartości harmonicznych wystąpił problem ze zbieżnością rozwiązania.

Metoda poprawy dokładności wyznaczania składowych harmonicznych

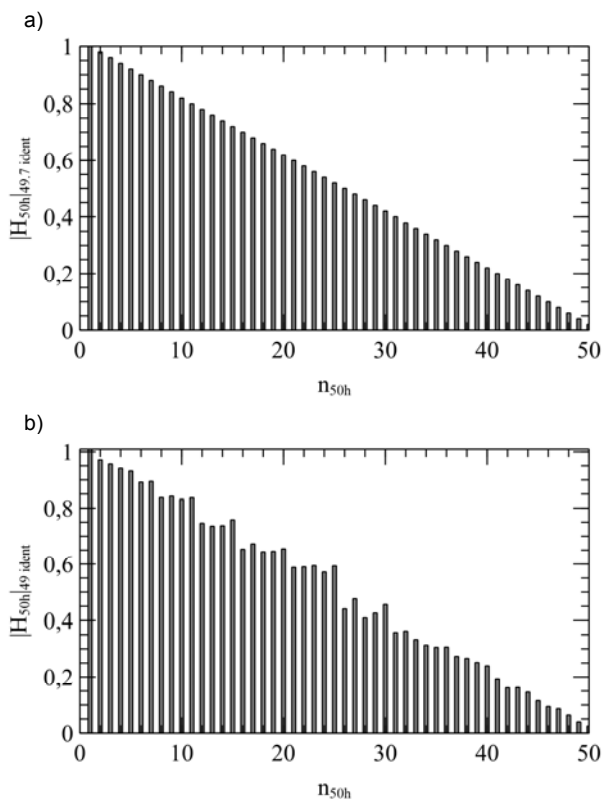
Na podstawie wyników pokazanych w poprzednim punkcie można zauważyć, że możliwe jest wyznaczenie harmonicznych sygnału z wykorzystaniem metod optymalizacji. Dla przebiegów o niewielkiej liczbie składowych warunki początkowe mają niewielki wpływ na zbieżność uzyskanego wyniku z rozwiązaniem prawidłowym. Jednak przy sygnałach zawierających dużą ilość harmonicznych bardzo duże znaczenie ma prawidłowe przyjęcie warunków początkowych. W takim przypadku, przy wykorzystaniu losowych wartości początkowych, rzadko uzyskuje się prawidłowe wyniki.

Jednym z możliwych rozwiązań pozwalających na uzyskanie poprawnego wyniku, jest przyjęcie rozwiązania uzyskanego przy wykorzystaniu transformaty Fouriera, jako warunku startowego dla metody optymalizacji. Kolejnym sposobem na poprawę zbieżności jest przyjęcie wartości początkowej częstotliwości, zbliżonej w jak największym stopniu do wartości rzeczywistej. Można to uzyskać przez przeprowadzenie wstępnej identyfikacji częstotliwości składowej podstawowej. W związku z tym metoda pozwalająca na poprawne wyznaczenie składowych harmonicznych jest następująca:

Krok 1: Wstępna identyfikacja częstotliwości składowej podstawowej.

Krok 2: Wyznaczenie startowych wartości harmonicznych z wykorzystaniem transformaty Fouriera.

Krok 3: Identyfikacja poprawnych wartości parametrów z wykorzystaniem metod optymalizacji.



Rys. 5. Wartości zidentyfikowanych harmoniczných dla sygnału o częstotliwości składowej podstawowej wynoszącej a) 49,7 Hz i 49 Hz

Wykres 5a przedstawia wyniki uzyskane przy wykorzystaniu przedstawionej procedury dla sygnału składającego się z 50-ciu harmoniczných o losowych fazach i częstotliwości 49,7 Hz, rysunek 5b przedstawia zidentyfikowane składowe dla częstotliwości 49 Hz. Jak widać uzyskano dużo lepsze rezultaty niż przy wykorzystaniu transformaty Fouriera. Przedstawione podejście pozwoliło znaleźć dokładne rozwiązanie dla częstotliwości 49,7 Hz i rozwiązanie z niewielkimi odchyłkami dla 49 Hz.

Podsumowanie

Wyznaczanie harmoniczných z wykorzystaniem transformaty Fouriera dla sygnałów, których okres nie pokrywa się z oknem obliczeniowym, powoduje powstawanie znacznych błędów w wartościach wyznaczonych harmoniczných. Wykorzystanie metod optymalizacji pozwala na identyfikację nieznaných wartości parametrów. Występuje jednak problem wyboru warunków początkowych i problem ze zbieżnością dla dużej ilości nieznaných parametrów.

Przedstawiona w pracy metoda bazująca na metodach optymalizacji i wykorzystuje jako warunek startowy wyniki identyfikacji składowej podstawowej oraz wyznaczone wstępnie za pomocą transformaty Fouriera współczynniki. Pozwala ona na znalezienie dokładniejszych wartości współczynników harmoniczných, niż przy wykorzystaniu tylko transformaty Fouriera. Pozwala także na zmniejszenie ilości rejestrowanych danych pomiarowych i wyznaczanie harmoniczných sygnału na podstawie niepełnych danych.

Autorzy: dr inż. Robert Kazała, Politechnika Świętokrzyska, Zakład Urządzeń i Systemów Automatyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: rkazala@tu.kielce.pl

LITERATURA

- [1] Chapman D.: HARMONICS: CAUSES AND EFFECTS, Leonardo Energy, November 2011
- [2] PN-EN 61000-3-12:2012 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 3-12: Poziomy dopuszczalne -- Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym > 16 A i $<$ lub $= 75$ A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia
- [3] Wciślik M., Kazała R.: DSP in power quality monitoring device, IFAC Workshop, Programmable Devices and Systems, PDS 2003 str. 285-290
- [4] Szafran J., Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej, WNT, Warszawa 2001
- [5] Lyons R. G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, WKiŁ, Warszawa 1999
- [6] Kazała R.: Wyznaczanie składowých harmoniczných sygnału z wykorzystaniem metod optymalizacji, Elektronika- Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, 10/2014, str. 58-61