

Krzysztof DUDA

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII

Metoda pomiaru współczynnika THD dla sygnałów energetycznych z zastosowaniem transformaty chirp-z

dr inż. Krzysztof DUDA

pracuje w Katedrze Metrologii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Tytuł mgr inż. o specjalności *Automatyka i Metrologia* i dr w dziedzinie *Elektroniki* uzyskał na Wydziale EAIIE AGH odpowiednio w roku 1998 i 2002.

W pracy naukowej zajmuje się analizą i przetwarzaniem sygnałów dyskretnych. Jest autorem ponad 30 publikacji, których tematyka dotyczy: 1) Jakości energii elektrycznej z zakresu: a) oceny uciążliwości migotania światła, b) metod pomiaru zakłóceń krótkotrwałych w sieci energetycznej i c) realizacji DSP algorytmów pomiarowych, a także 2) Analizy sygnałów biomedycznych i 3) Transformaty całkowitoliczbowych.



e-mail: kduda@uci.agh.edu.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia nową metodę pomiaru współczynnika zawartości harmonicznych THD (*Total Harmonic Distortion*) wykorzystującą transformatę chirp-z (CZT) do obliczania amplitud częstotliwości harmonicznych. Dzięki zastosowaniu CZT w proponowanej metodzie pomiaru THD nie jest wymagane synchroniczne próbkowanie sygnału, co jest główną zaletą w porównaniu z pomiarem THD zalecanym przez dokumenty normatywne. CZT jest liczona przez dwa algorytmy FFT, a widmo dyskretnego sygnału energetycznego jest wyznaczane bardzo gęsto w sąsiedztwie częstotliwości harmonicznych. Przedział częstotliwości wyznaczanych przez CZT jest określany na bieżąco na podstawie estymacji częstotliwości podstawowej sygnału. W artykule przedstawiono przykładowy dobór parametrów dla realizacji proponowanej metody pomiaru THD oraz porównano ją z metodą normatywną.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, współczynnik zawartości harmonicznych, transformata chirp-z.

THD measurement method for electric power systems based on chirp-z transform**Abstract**

The paper presents new THD measurement method based on chirp-z (CZT) transform that is used for evaluating amplitudes of harmonic frequencies. Thanks to application of CZT proposed method of THD measurement does not require synchronous sampling, which is the main advantage as to compare with normative method. CZT is computed by two FFT algorithms and frequency spectrum of discrete signal is computed very dense in the neighbourhood of harmonic frequencies. The range of frequencies computed by CZT is set by estimated value of main frequency. The paper presents exemplary setup of the proposed THD measurement method and comparison of this method with the normative one.

Keywords: Power Quality, Total Harmonic Distortion, chirp-z transform.

1. Wprowadzenie

Energia elektryczna wpływa na praktycznie wszystkie dziedziny życia nowoczesnego społeczeństwa. Dlatego trudno przecenić wagę pomiaru i monitorowania jakości energii elektrycznej. Ze względu na skalę (masowość) zagadnienia potrzebne są niedrogie urządzenia pozwalające mierzyć parametry jakości energii elektrycznej. Urządzenia takie mogą być realizowane w oparciu o

ogólnie dostępne procesory sygnałowe. Niniejszy artykuł przedstawia przykład rozwiązania pomiaru współczynnika zniekształceń harmonicznych THD z możliwością zastosowania w typowym układzie DSP wyposażonym w tor akwizycji danych.

Wyznaczanie THD zgodnie z zaleceniami normatywnymi [1] wymaga synchronicznego próbkowania sygnału, który następnie podawany jest analizie częstotliwościowej za pomocą DFT w praktyce realizowanej przez FFT. Wymóg synchronicznego próbkowania sygnału podyktowany jest koniecznością uniknięcia tzw. przecieku widmowego DFT i jest sporym utrudnieniem w zrealizowaniu analogowej części przyrządu pomiarowego, tj. toru akwizycji danych.

W proponowanej metodzie pomiaru THD próbkowanie synchroniczne sygnału nie jest wymagane, co pozwala na stosowanie popularnych systemów DSP ze stałą częstotliwością próbkowania do realizacji przyrządu pomiarowego. Metoda może być również implementowana *off-line* do analizy sygnałów energetycznych zgromadzonych w bazach danych, a zarejestrowanych bez próbkowania synchronicznego.

W proponowanej metodzie do wyznaczania amplitud sygnałów harmonicznych zastosowano transformatę chirp-z (CZT) [2-4], dzięki czemu w trakcie pracy algorytmu wyliczane są tylko prążki widma z bliskiego sąsiedztwa częstotliwości harmonicznych z dużą rozdzielczością częstotliwościową. Zakres widma wyliczany przez CZT jest na bieżąco ustalany na podstawie estymacji wartości częstotliwości podstawowej (tj. pierwszej harmonicznej).

2. Struktura algorytmu pomiarowego

Całkowity współczynnik odkształcenia THD (*Total Harmonic Distortion*) jest zdefiniowany następująco [1]:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_n}{G_1} \right)^2} \quad (1)$$

gdzie G_n oznacza wartości skuteczne harmonicznych napięcia lub prądu. Sumowanie w (1) uwzględnia pierwsze 50 harmonicznych ($H=50$). Wartości G_n są wyznaczane przez DFT. Dla systemów z częstotliwością podstawową 50 Hz THD wyznacza się na podstawie fragmentu sygnału o długości 10 okresów. Wymagane jest synchroniczne próbkowanie sygnału.

Ciągłe widmo sygnału dyskretnego dane jest wzorem [2]:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\omega n} \quad (2)$$

W szczególnym przypadku, gdy oś częstotliwości (pulsacji) próbkowana jest z krokiem $\Delta\omega = 2\pi/N$ na podstawie (2) otrzymujemy zależność na DFT:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j(2\pi/N)kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3)$$

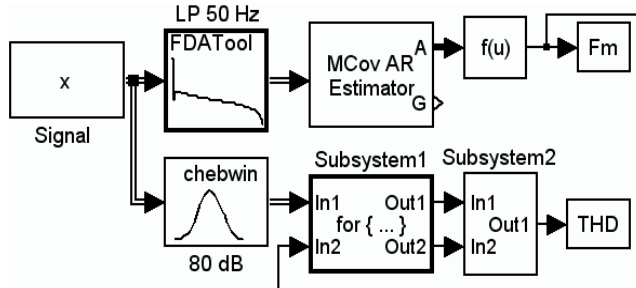
Z drugiej strony oś częstotliwości w (2) może być próbkowana w sposób dowolny za pomocą CZT [2], tzn. można wybrać pulsację początkową ω_0 oraz krok pulsacji $\Delta\omega$ i liczbę

wyznaczanych prążków częstotliwości M . W szczególnym przypadku, kiedy odległość między kolejnymi prążkami wynosi $\Delta\omega = 2\pi/N$, liczba wyznaczanych prążków równa się długości sygnału $M = N$, a punktem startowym jest $\omega_0 = 0$ transformata CZT zwraca wartości takie jak DFT. Transformata CZT może być liczona przez FFT.

Schemat blokowy ilustrujący ideę proponowanej metody pomiaru współczynnika THD z zastosowaniem transformaty CZT przedstawiony jest na rys.1. Schemat ten jest programem w środowisku Simulink [5] i służył on do symulacji, których wyniki przedstawione są w dalszej części pracy. Jednocześnie, korzystając z standardowych bibliotek [6] program ten można wyeksportować do kodu w języku C i uruchomić na wybranej platformie DSP.

Górna gałąź schematu na rys.1 realizuje parametryczny pomiar częstotliwości podstawowej sygnału (pierwszej harmonicznej), której wartość na rysunku oznaczono jako F_m , natomiast gałąź dolna oblicza, poprzez CZT, amplitudy wszystkich harmonicznych sygnału (od 1 do 50). Blok *Subsystem1* implementuje CZT, a *Subsystem2* wylicza THD na podstawie (1).

Zakres częstotliwości wyznaczanych przez CZT znajduje się w bliskim sąsiedztwie częstotliwości harmonicznych np. ± 2 Hz, co dla częstotliwości podstawowej 50 Hz oznacza wyliczanie widma dla zakresów: $50 \pm 2, 100 \pm 2, \dots, 2500 \pm 2$ Hz. Ponieważ częstotliwość podstawowa sygnału energetycznego może fluktuować w okolicach 50 Hz, więc pulsacja początkowa ω_0 dla CZT jest każdorazowo ustalana przez algorytm estymacji częstotliwości podstawowej. Jest to szczególnie ważne dla wyższych harmonicznych, dla których zmiana częstotliwości jest n razy większa niż zmiana częstotliwości podstawowej (np. zmiana częstotliwości podstawowej z 50 na 49 Hz powoduje zmianę częstotliwości 50-tej harmonicznej z 2500 na 2450 Hz).



Rys.1 Schemat blokowy pomiaru THD z zastosowaniem CZT
Fig.1 Block diagram of THD measurement based on CZT

3. Przykład realizacji

Realizacja pomiaru THD według przedstawionej na rys.1 metody wymaga określenia parametrów pracy algorytmu, których dobór może być podyktowany różnymi czynnikami, takimi jak: dostępny tor akwizycji danych, dostępna moc obliczeniowa systemu i pamięć czy wsparcie programowe ze strony bibliotek standardowych.

W omawianej realizacji przyjęto częstotliwość próbkowania $f_p = 8$ kHz. Przepływ danych odbywa się w ramach (zaznaczanych na schematach programu Simulink linią podwójną) o rozmiarze 512 próbek, czyli za czas 64 mS. Jest to najkrótsza ramka, dla której uzyskano zadowalające wynik, długość ramki może zostać zwiększona spowoduje to jednak zwiększenie zapotrzebowania na moc obliczeniową i wydłuży czas pomiaru.

Do estymacji częstotliwości podstawowej sygnału wybrano standardową funkcję pakietu Simulink [5] oznaczoną na rys.1 jako *MCov AR Estimator*. Funkcja ta określa parametry modelu AR drugiego rzędu, metodą zmodyfikowanej kowariancji, w postaci:

$$H(z) = \frac{G}{A(z)} = \frac{G}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (4)$$

Jeżeli sygnałem wejściowym jest sinusoida to położenie zespolonego, sprzężonego zera wielomianu $A(z)$ jednoznacznie określa częstotliwość tej sinusoidy zgodnie z zależnością:

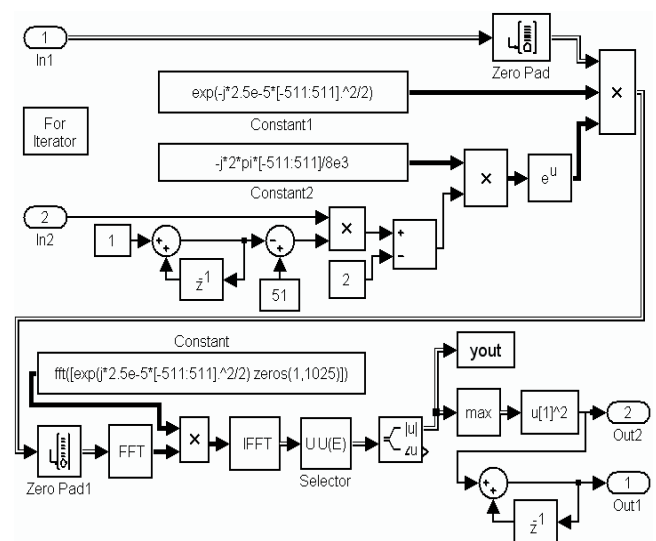
$$f = \frac{f_p}{2\pi} \arctan \left(\frac{\sqrt{-(a_1^2 - 4a_2)}}{a_1} \right) \quad (5)$$

gdzie: f_p - częstotliwość próbkowania, \arctg - kąt w [rad]. Zależność (5) realizuje bloczek opisany na rys.1 jako $f(u)$, a wartość F_m jest częstotliwością w [Hz]. Wzmocnienie G nie jest wykorzystywane.

Przed estymacją częstotliwości podstawowej sygnał jest filtrowany filtrem dolnoprzepustowym *IIR* (bloczek *LP 50 Hz* na rys.1), którego zadaniem jest wyodrębnienie podstawowej harmonicznej (usunięcie wyższych harmonicznych). Wybrano filtr eliptyczny VII-go rzędu o krawędzi pasma przepustowego 60 Hz.

Blok *Subsystem1* na rys.1 wylicza za pomocą CZT amplitudy harmonicznych G_n mierzonego sygnału. Przed obliczeniami na sygnał nakładane jest okno czasowe. Wybrano okno Czebyszewa o tłumieniu 80 dB [5].

Schemat blokowy bloku *Subsystem1* przedstawiony jest na rys.2. Dla ramki danych o długości 512 próbek CZT liczone jest za pomocą dwóch algorytmów FFT o długości 2048 oznaczonych na rys.2 jako *FFT* i *IFFT*. W pamięci przechowywane są wartości trzeciego FFT oznaczonego na rys.2 jako *Constant*. Podane na rys.2 wartości realizują następujące parametry CZT: wybrana odległość między kolejnymi prążkami częstotliwości wynosi $\Delta f = f_p \cdot 2.5e-5 / (2\pi) \approx 0.03$ Hz, a liczba wyznaczanych prążków wynosi $M=128$. Obliczenia w bloku *Subsystem1* są iterowane w pętli *FOR* 50 razy dla każdej kolejnej ramki sygnału. Częstotliwości początkowe dla CZT dla kolejnych harmonicznych są zadawane na podstawie estymacji w dziedzinie czasu zgodnie z zależnością $nF_m - 2$ Hz, gdzie n - numer harmonicznej ($n = 1, \dots, 50$), a F_m estymowana częstotliwość w Hz (patrz rys.1). Wyjściem bloku *Subsystem1* jest suma kwadratów amplitud wszystkich harmonicznych oznaczona jako *Out1* i kwadrat amplitudy harmonicznej podstawowej *Out2*. Znaczenie pozostałych bloków w schemacie na rys.2 jest określone przez ich nazwy, a szczegółowy opis dostępny jest w [5].



Rys.2 Schemat blokowy wyznaczania amplitud harmonicznych za pomocą CZT (blok *Subsystem1* na rys.1)
Fig.2 Block diagram for computing amplitudes of harmonic signals via CZT (*Subsystem1* in fig.1)

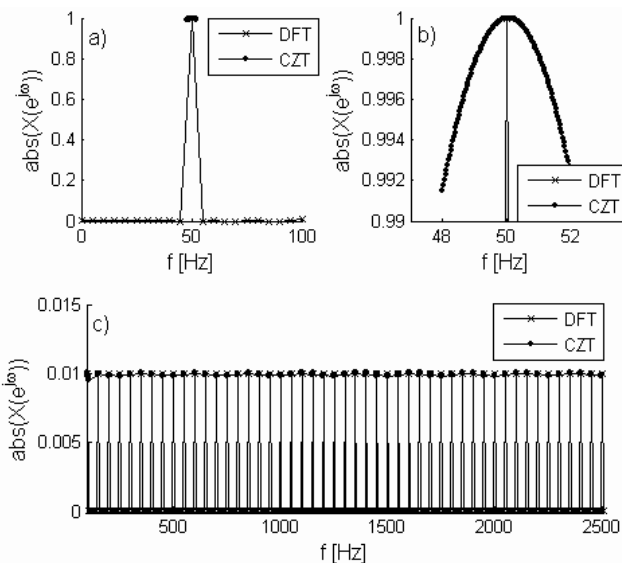
4. Wyniki symulacji komputerowych

W celu ilustracji właściwości proponowanej metody pomiaru THD wygenerowano w środowisku Matlab sygnał testowy w postaci:

$$x(t) = G_1 \sin(2\pi F_m t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{50} G_n \sin(2\pi n F_m t + \varphi_n) \quad (6)$$

Rys.3 i rys.4 przedstawiają wyniki detekcji amplitud harmonicznych z zastosowaniem normatywnej [1] i proponowanej metody pomiaru THD. Dla metody normatywnej, opisanej w legendach na rys.3 i rys.4 jako DFT, zastosowano 10 okresów sygnału z oknem prostokątnym natomiast w proponowanej metodzie, opisanej w legendach na tych rysunkach jako CZT, obliczenia przeprowadzono dla ramki o długości 512 próbek z oknem Czebyszewa, tj. przedstawiano zmienną *yout* z rys.2. Wartość amplitudy częstotliwości podstawowej G_1 , ustalono na 1, a amplitudy harmonicznych G_n , $n=2, \dots, 50$ na 0.01, tak więc zadany THD wyniósł (1) 7%.

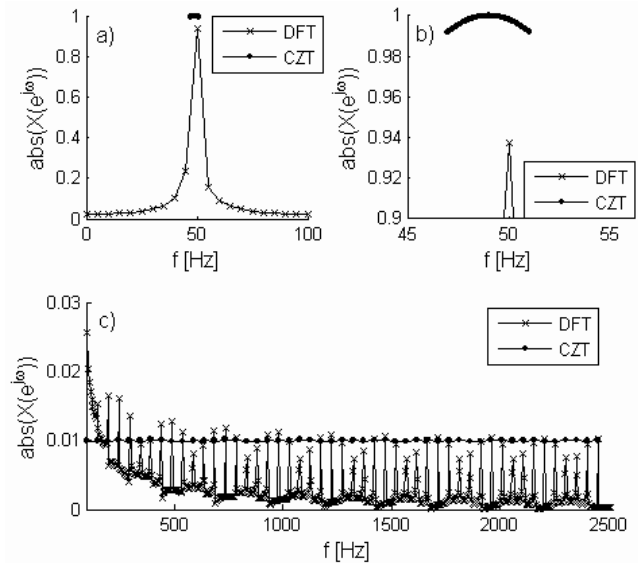
Rys.3 przedstawia przypadek, w którym zachodzi synchroniczne próbkowanie sygnału ($f_p=8$ kHz i $F_m=50$ Hz). Jest to warunek konieczny poprawności działania metody normatywnej. Rys.3a przedstawia próbkowanie osi częstotliwości w zakresie od 0 do 100 Hz przez obie metody. Dla DFT krok w częstotliwości wynosi 5 Hz, natomiast dobrany krok częstotliwości dla CZT wynosi 0.03 Hz. Rys.3b przedstawia zbliżenie na rys.3a. Ze względu na synchroniczne próbkowanie DFT dokładnie 'trafia' w częstotliwość 50 Hz i poprawnie wyznacza amplitudę tej częstotliwości. CZT próbuje os częstotliwości w 128 kolejnych punktach od częstotliwości $50-2=48$ Hz z krokiem 0.03 Hz, dzięki czemu maksymalna wartość modułu CZT również poprawnie wyznacza amplitudę częstotliwości podstawowej. Rys.3c przedstawia detekcję amplitud harmonicznych od 2 do 50. Zarówno DFT jak i CZT prawidłowo wyznaczają wartości amplitud jako 0.01. W przypadku DFT dla kolejnych harmonicznych otrzymywany jest jeden prążek, natomiast dla CZT jest to zawsze 128 prążków, analogicznie jak na rys.3b. Wartość THD wyznaczona proponowaną metodą wyniosła 7.006 %.



Rys.3 Detekcja amplitud sygnałów harmonicznych dla częstotliwości próbkowania $f_p=8$ kHz i częstotliwości podstawowej $F_m=50$ Hz. Na legendach rysunków DFT oznacza metodę normatywną (10 okresów sygnału z oknem prostokątnym), a CZT oznacza proponowaną metodę dla realizacji opisanej w paragrafie 3 (sygnał *yout* z rys.2)

Fig.3 Detection of amplitudes of harmonic signals for sampling frequency 8 kHz and main frequency $F_m=50$ Hz. In legends DFT stands for normative method (10 periods with rectangular window) and CZT stand for proposed method for realization described in section 3 (signal *yout* from fig.2)

Rys.4 przedstawia przypadek, w którym następuje utrata synchronicznego próbkowania spowodowana zmianą częstotliwości podstawowej sygnału energetycznego, która wynosi obecnie $F_m=49$ Hz, natomiast częstotliwość próbkowania jest taka jak poprzednio $f_p=8$ kHz. W tym przypadku DFT 'nie trafia' w prążek 49 Hz, co pociąga za sobą błędne określenie amplitud wszystkich harmonicznych. Rys.4a,b pokazuje, że określenie amplitudy częstotliwości podstawowej przez DFT obciążone jest ok. 5% błędem, natomiast CZT nadal poprawnie wyznacza amplitudę jako 1. Tym razem CZT jest wyznaczane od częstotliwości 49-2=47 Hz. Rys.4c przedstawia detekcję amplitud harmonicznych od 2 do 50. Widoczne są duże błędy występujące w przypadku zastosowania metody normatywnej spowodowane utratą synchronizmu próbkowania sygnału. Proponowana metoda poprawnie wyznacza wartości amplitud sygnałów harmonicznych, które wynoszą 0.01. Wartość THD wyznaczona proponowaną metodą wyniosła, jak poprzednio, 7.006 %.

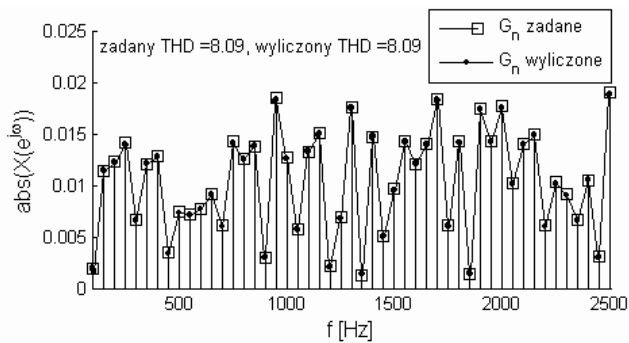


Rys.4 Detekcja amplitud sygnałów harmonicznych dla częstotliwości próbkowania $f_p=8$ kHz i częstotliwości podstawowej $F_m=49$ Hz. Na legendach rysunków DFT oznacza metodę normatywną (10 okresów sygnału z oknem prostokątnym), a CZT oznacza proponowaną metodę dla realizacji opisanej w paragrafie 3 (sygnał *yout* z rys.2)

Fig.4 Detection of amplitudes of harmonic signals for sampling frequency 8 kHz and main frequency $F_m=49$ Hz. In legends DFT stands for normative method (10 periods with rectangular window) and CZT stand for proposed method for realization described in section 3 (signal *yout* from fig.2)

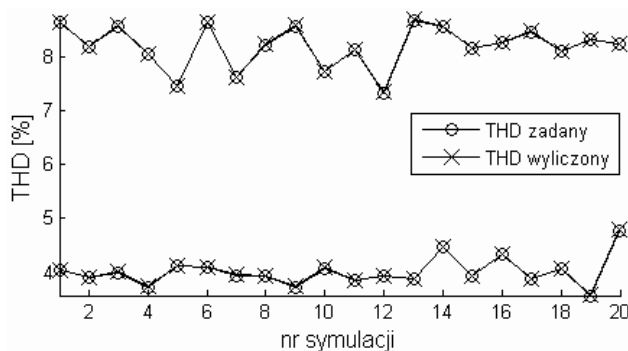
W celu oszacowania błędów obliczeń proponowanej metody wyznaczania THD przeprowadzono wielokrotne eksperymenty polegające na wyznaczaniu znanego THD. Sygnały testowe generowano w taki sposób, że amplituda pierwszej harmonicznej G_1 (6) wynosiła 1, a amplitudy harmonicznych G_n , $n=2, \dots, 50$ zadawane były liczbami pseudolosowymi o rozkładzie jednostajnym i dwóch różnych wariancjach. Rys.5 przedstawia przykład detekcji amplitud harmonicznych G_n , $n=2, \dots, 50$ tak utworzonego sygnału. Dla każdej harmonicznej wyliczane jest 128 prążków, analogicznie jak na rys.4b. Wartości procentowe THD zadane i wyliczone proponowaną metodą są w tym przypadku takie same do drugiego miejsca po przecinku.

Rys.6 i rys.7 przedstawiają wyniki analogicznego eksperymentu symulacyjnego, dla 20 różnych sygnałów testowych, dla których policzono współczynniki THD na podstawie zadawanych amplitud częstotliwości harmonicznych (1) oraz proponowaną metodą według realizacji opisanej w punkcie 3. Uzyskane wyniki w postaci wartości współczynników THD pokazane są na rys.6, natomiast procentowe błędy względne przedstawia rys.7. Maksymalny błąd względny obliczeń metody w trakcie powyższych symulacji nie przekroczył wartości 0.27 %.



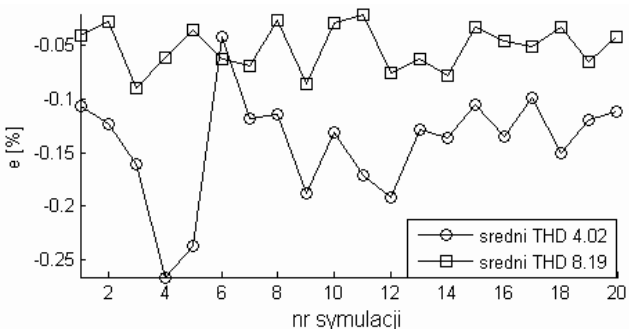
Rys.5 Przykładowy sygnał testowy wykorzystywany do określenia błędów metody pomiaru THD. Amplitudy harmonicznych G_n , $n=2, \dots, 50$ zostały wygenerowane przez generator liczb pseudolosowych

Rys.5 Exemplary test signal as used for estimation of errors of the method for THD measurement. Amplitudes of harmonic signals G_n , $n=2, \dots, 50$ were generated by pseudo random generator



Rys.6 Wyniki symulacji, podczas której amplitudy harmonicznych od 2 do 50 były generowane jako liczby pseudolosowe o rozkładzie równomiernym o dwóch różnych wariancjach

Rys.6 Simulation results for signals with amplitudes of 2 to 50 harmonics generated as pseudo random numbers with uniform distribution and two different variances



Rys.7 Błędy względne wyznaczania THD dla symulacji przedstawionych na rys.5, $e=100(THD_z-THD_w)/THD_z$, gdzie THD_z - wartość zadana, THD_w - wartość wyliczona

Fig.7 Errors of estimating THD for simulations presented in fig.5, $e=100(THD_z-THD_w)/THD_w$, where THD_z correct value, THD_w computed value

Tab.1 przedstawia zestawienie głównych cech proponowanej metody pomiaru THD w odniesieniu do metody normatywnej. Główną zaletą proponowanej metody jest możliwość akwizycji sygnału ze stałą częstotliwością próbkowania. Również czas pomiaru, nieuwzględniający czasu obliczeń, jest w prezentowanej realizacji trzykrotnie krótszy niż dla metody normatywnej. Natomiast złożoność obliczeniowa proponowanej metody jest ok. 100 razy większa niż metody normatywnej. Złożoność obliczeniową oszacowano jako liczbę FFT wykonywanych w trakcie obliczeń. Dla metody normatywnej przy częstotliwości próbkowania $f_p=10240$ Hz długość ramki wynosi 2048 próbek, a więc tyle co rozmiar FFT w prezentowanej realizacji. Jednak metoda oparta o CZT wymaga obliczenia dwóch FFT dla każdej harmonicznej, czyli 100 FFT dla wyznaczenia THD.

Tab.1 Porównanie metod pomiaru THD

Tab.1 Comparison of THD measurement methods

Pomiar THD	Próbkowanie synchroniczne	Czas pomiaru (liczba okresów pierwszej harmonicznej)	Złożoność obliczeniowa (liczba FFT)
Metoda normatywna DFT	TAK	10	1
Metoda proponowana CZT	NIE	3.2	2*50

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania współczynnika THD dla sygnałów energetycznych z zastosowaniem transformaty CZT. Główną zaletą proponowanej metody, w porównaniu z metodą pomiaru zalecaną przez dokumenty normatywne, jest brak konieczności synchronicznego próbkowania sygnału energetycznego. Pozwala to uniknąć trudności związanych z realizacją pętli fazowej i umożliwia realizację urządzeń do pomiaru THD z zastosowaniem powszechnych urządzeń DSP ze stałą częstotliwością próbkowania. Przedstawiony w punkcie 3 przykład realizacji może zostać uruchomiony na praktycznie dowolnym zestawie DSP. W przypadku braku mocy obliczeniowej współczynnik THD można wyznaczyć nie dla kolejnych ramek, tylko z pewnym, zależnym od mocy procesora, offsetem (np. co 50 ramek). Prezentowany sposób wyznaczania THD można również zastosować do sygnałów zarejestrowanych ze stałą częstotliwością próbkowania do analizy *off-line*.

Konkretna realizacja proponowanej metody pomiaru THD (np. taka jak przedstawiona w punkcie 3) charakteryzuje się dużą możliwością doboru narzędzi obliczeniowych, a także parametrów algorytmu. Estymacja częstotliwości podstawowej może zostać zrealizowana dowolną metodą, niekoniecznie parametryczną, np. przejść 'przez zero' lub też metodą częstotliwościową np. osobną CZT. Niektóre użyte metody przetwarzania sygnałów mogą zostać zmienione lub nawet usunięte (np. filtr dolnoprzepustowy dla innej metody estymacji częstotliwości lub okno czasowe Czebyszewa). Realizacja przedstawiona w punkcie 3 mogłaby wyznaczać 512 prążków CZT zamiast 128 przy tej samej złożoności obliczeniowej, tzn. dwóch 2048 punktowych FFT, również krok w osi częstotliwości dla CZT mógłby być mniejszy, jednak wyniki symulacji dla przedstawionej konfiguracji okazały się wystarczająco dobre. W trakcie przeprowadzonych symulacji komputerowych względny błąd obliczeniowy proponowanej metody wyznaczania THD nie przekroczył 0.27%.

6. Literatura

- [1] PN-EN 61000-4-7 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Część 4-7 Metody badań i pomiarów, Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń
- [2] Oppenheim A. V., Schaffer R. W., Buck J. R., Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall, second edition, 1999
- [3] Aiello M., Cataliotti A., Nuccio S.: A chirp-z transform-based synchronizer for power system measurements, IEEE-Transactions on Instrumentation and Measurement, June 2005; 54(3): 1025-32
- [4] Aiello M., Cataliotti A., Nuccio S.: An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Oct. 2005; 54(5): 1811-19
- [5] Simulink Simulation and Model-Based Design®, Using Simu-link® Version 6, www.mathworks.com
- [6] Real-Time Workshop® For Use with Simulink®, User's Guide, Version 6, www.mathworks.com

Artykuł recenzowany