

Piotr KUWAŁEK*

PROBLEM „PRZECIEKU WIDMA” W PROCESIE OCENY JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W artykule przedstawiono wyniki symulacji związane ze zjawiskiem „przecieku widma” w procesie oceny jakości energii elektrycznej. Na wstępie artykuł omawia zagadnienia związane z problematyką potrzeby analizy jakości energii elektrycznej oraz związanego z tą analizą zjawiska „przecieku widma”. Kolejno przedstawione zostały analizowane sygnały wraz z ich opisem funkcyjnym. Dla omówionych przebiegów przeprowadzono analizę widmową FFT z wykorzystaniem programu MATLAB. Podczas symulacji zmieniano częstotliwość sygnału badanego w zakresie dopuszczalnych odchyżeń częstotliwości napięcia sieci określonych odpowiednią normą. Przy zmianie wspomnianego parametru monitorowano błędy pomiaru zawartości wyższych harmonicznych przy zastosowaniu wybranych okien czasowych. Artykuł kończy się zebraniem wniosków z przeprowadzonej analizy oraz podsumowaniem.

SŁOWA KLUCZOWE: okno pomiarowe, przeciek widma, wyższe harmoniczne, jakość energii elektrycznej, FFT.

1. WPROWADZENIE

Intensywny rozwój świadczenia usług dostarczania energii elektrycznej spowodował, że na mocy ustawy [1], odwołującej do rozporządzenia Ministra Gospodarki [2], istnieje wymóg, który gwarantuje dostarczenie przez dystrybutora energii elektrycznej o pewnym standardzie.

Do podstawowych wielkości określających jakość dostarczanej energii należą:

- częstotliwość f ,
- wartość skuteczna napięcia U ,
- wskaźnik długotrwałego migotania światła P_{fl} ,
- składowa symetryczna kolejności przeciwnej u_2 ,
- współczynnik mocy $\text{tg}\varphi$,
- moc czynna P ,
- harmoniczne napięcia u_h , gdzie h jest rzędem harmonicznej,
- współczynnik odkształcenia napięcia THD_U .

* Politechnika Poznańska

Ostatnie dwa parametry określają poziom odkształcenia dostarczonej energii elektrycznej. Są one współcześnie szczególnie istotne ze względu na dużą ilość odbiorników elektronicznych występujących w sieci elektroenergetycznej. Stąd też, ważne jest ich poprawne wyznaczenie. Zakłada się, że napięcie oraz prąd w sieci elektroenergetycznej są sygnałami sinusoidalnymi o stałym okresie T . Dzięki tym założeniom, możliwe jest wyznaczenie pożądaných parametrów wykorzystując algorytm FFT – *Fast Fourier Transform*. W praktyce parametry sygnałów różnią się od założonych co powoduje powstanie zjawiska „przecieku widma”, zaburzającego poprawną ocenę badanych przebiegów.

2. ZJAWISKO „PRZECIEKU WIDMA”

Podstawowym narzędziem matematycznym, umożliwiającym analizę funkcji okresowej jest trygonometryczny szereg Fouriera. Zagadnienie rozwinięcia funkcji w szereg Fouriera przedstawiono w pozycji [3,4].

Każdą funkcję okresową spełniającą kryteria Dirichletta, można jednoznacznie zapisać jako równanie postaci (1) [5]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n), \quad (1)$$

gdzie współczynniki a_0 i c_n opisują równania (2) i (3), ω_0 oznacza pulsację podstawową, zaś faza początkowa n -tej harmonicznej opisana jest układem równań (4):

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad (2)$$

$$c_n = \sqrt{\left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \right)^2 + \left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \right)^2}, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi_n = \frac{\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt}{\sqrt{\left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \right)^2 + \left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \right)^2}} \\ \sin \varphi_n = \frac{\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt}{\sqrt{\left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \right)^2 + \left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \right)^2}} \end{array} \right. \quad (4)$$

Powyższy zapis pozwala na ocenę wybranej harmonicznej, oraz jest zgodny z normą [6] dotyczącą oceny jakości energii elektrycznej z uwzględnieniem wyższych harmonicznych.

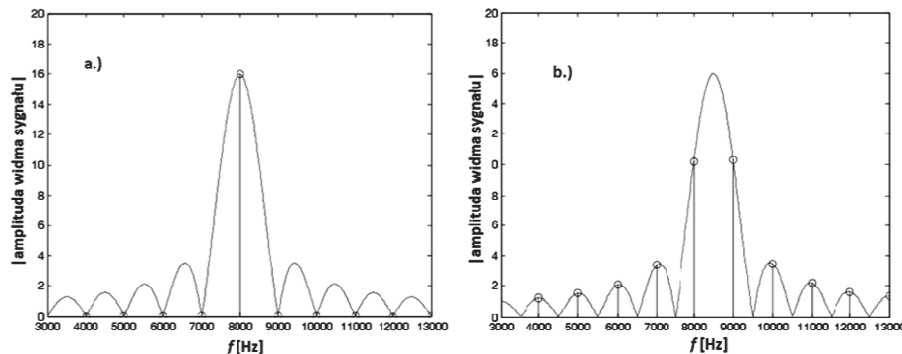
W praktycznych realizacjach bada się skończone widmo FFT w oparciu o próbki uzyskane z procesu dyskretyzacji. W ujęciu teoretycznym proces próbkowania jest iloczynem funkcji badanej oraz funkcji grzebieniowej. Z kolei skończone widmo sygnału uzyskuje się stosując okno czasowe.

Okno czasowe [7] to funkcja $w(n)$ opisująca sposób pobierania próbek o skończonym przedziale wartości różnych od zera. Zakładając, że obserwowany jest pewien sygnał $u(n)$, wtedy wynikiem obserwacji z wykorzystaniem okna czasowego będzie sygnał $g(n)$ dany zależnością (5):

$$g(n) = u(n)w(n), \quad (5)$$

gdzie n jest numerem pobranej próbki.

Przy zastosowaniu okna czasowego, następuje wymnożenie sygnału z funkcją opisującą okno czasowe w dziedzinie czasu. W dziedzinie częstotliwości wystąpi splot tych dwóch sygnałów. W przypadku okna prostokątnego otrzyma się splot funkcji $\text{sinc}(t)$ z widmem sygnału analizowanego. W przypadku, gdy omówione okno będzie całkowitą wielokrotnością badanego sygnału, to analiza FFT umożliwi otrzymanie wartości odpowiadającym widmu samego sygnału badanego. W przypadku, gdy okno nie będzie całkowitą wielokrotnością sygnału badanego, to pobrane próbki splotu, będą odbiegać od widma mierzonego sygnału. Przykładowy wynik działania FFT w sytuacji dopasowania i niedopasowania prostokątnego okna pomiarowego dla sygnału sinusoidalnego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe widmo splotu sygnału sinusoidalnego i prostokątnego: a.) częstotliwość sygnału sinusoidalnego wynosi 8 kHz, a długość okna pomiarowego 1 ms (okno pomiarowe jest całkowitą wielokrotnością okresu sygnału sinusoidalnego), b.) częstotliwość sygnału sinusoidalnego wynosi 8,5 kHz a długość okna pomiarowego 1 ms (okno pomiarowe jest niecałkowitą wielokrotnością okresu sygnału sinusoidalnego) [8]

Na rys. 1 w przypadku a.) pobranie niezerowych próbek widma splotu nastąpiło dla podstawowej częstotliwości sygnału badanego, zaś pozostałe próbki

pobrane zostały w zerach funkcji $\text{sinc}(t)$. Z kolei w przypadku b.) można zauważyć, że przy niedopasowaniu okna pomiarowego, próbki w dziedzinie częstotliwości pobierane zostają dla niezerowych wartości funkcji $\text{sinc}(t)$.

3. ANALIZOWANE SYGNAŁY

Do przeprowadzenia analizy błędów wpływu „przecieku widma” na pomiar wyższych harmonicznych oraz na proces oceny jakości energii elektrycznej wybrano dwa sygnały testowe. Wspomniane przebiegi to:

- sygnał sinusoidalny,
- sygnał trójkątny.

Każdy z nich można opisać równaniem matematycznym oraz dla każdego z nich istnieje analityczne rozwiązanie. Dzięki temu możliwe jest porównanie rzeczywistych badań z rozważaniami teoretycznymi.

Sygnał sinusoidalny opisany jest zależnością (6), natomiast widmo tego sygnału zależnością (7):

$$f(t) = k \sin(\omega t), \quad (6)$$

$$f(t) = k \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = k \sin(2\pi f_0 t), \quad (7)$$

gdzie: k jest amplitudą sygnału, ω jest pulsacją sygnału, a f_0 oznacza częstotliwość podstawową sygnału sinusoidalnego.

W sieciach elektroenergetycznych pożądane jest, aby przebieg napięcia, jak najlepiej odwzorowywał sygnał sinusoidalny. Ponadto, sygnał ten ma ograniczone widmo, składające się z podstawowej harmonicznej. Dlatego też, wybrano ten sygnał jako wzorcowy.

Sygnał trójkątny opisany jest zależnością (8), natomiast widmo tego sygnału zależnością (9):

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{4k}{T}t & \text{dla } -\frac{T}{2} \leq t \leq 0 \\ \frac{4k}{T}t & \text{dla } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases}, \quad (8)$$

$$f(t) = k + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4k}{\pi^2 n^2} [(-1)^n - 1] \sin\left(n2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (9)$$

gdzie: k jest amplitudą sygnału a f_0 oznacza częstotliwość podstawową sygnału trójkątnego.

Sygnał ten nie występuje w sieciach elektroenergetycznych, ale został wybrany do badania ze względu na to, że posiada nieskończone widmo, którego opis analityczny jest znany. Analiza nieskończonego widma jest głównym przedmiotem zainteresowania, bowiem rzeczywiste sygnały napięcia i prądu

często posiadają tę cechę. Jest to skutek występowania w sieci dużej ilości odbiorników elektronicznych, generujących wyższe harmoniczne.

4. BADANIA SYMULACYJNE

Do badania jakości eliminacji „przecieku widma” wybrano trzy okna czasowe zaproponowane przez autora:

- Blackmana, cechujące się silnym tłumieniem listków bocznych,
 - Blackmana-Harrisa, cechujące się dużą dynamiką,
 - Flat top, odtwarzające poprawną wartość podstawowej harmonicznej,
- i porównano je z oknem prostokątnym i metodą podgrupowania.

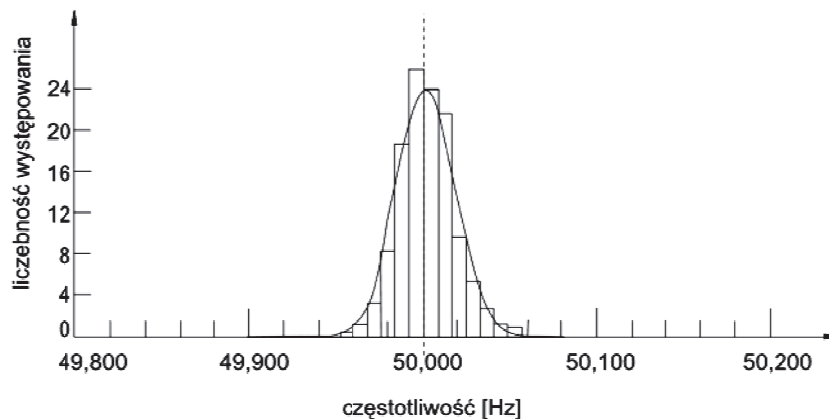
W praktyce, zgodnie z normą [6], skutki „przecieku widma” minimalizuje się poprzez podgrupowanie harmoniczných zgodnie z zależnością (10):

$$G_k = \sqrt{\sum_{i=-1}^1 C_{10k+i}^2}, \quad (10)$$

gdzie: G_k to wartość skuteczna k -tej podgrupy, a C_{10k+i} to wartość skuteczna ($10k+i$) – tego wyniku DFT o rozdzielczości 5 Hz.

Badania wykonano dla następujących wartości częstotliwości sygnałów badanych:

- 47 Hz i 52 Hz, gdyż są to skrajne dopuszczalne wartości częstotliwości napięcia sieci w czasie całego roku,
- 49,9 Hz i 50,1 Hz, gdyż są to skrajne wartości odchylenia częstotliwości jakie wynikają z rozkładu prawdopodobieństwa wahań tego parametru spotykanych w praktyce (rys. 2),
- 50 Hz, gdyż jest to pożądana wartość częstotliwości, będąca poziomem odniesienia.



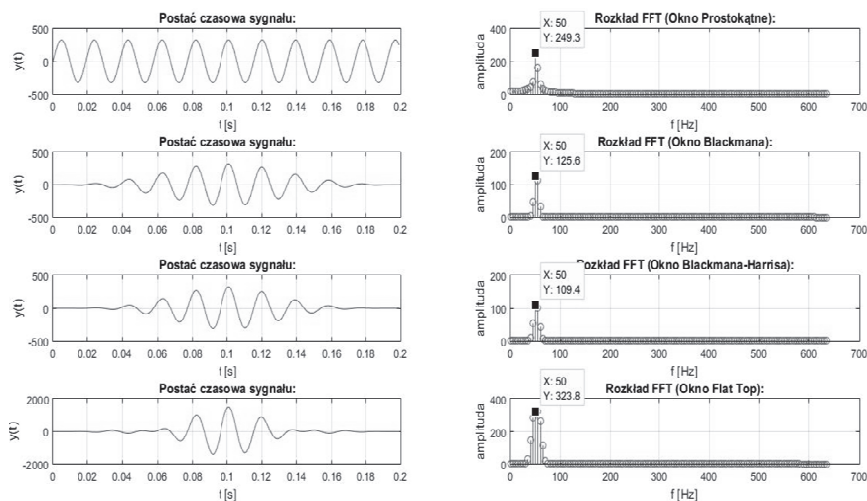
Rys. 2. Rozkład prawdopodobieństwa zmian częstotliwości napięcia sieci [9]

Do określenia problemu „przecieku widma” w procesie oceny jakości energii elektrycznej wykorzystano błędy w odniesieniu do miary indywidualnej dane równaniem (11):

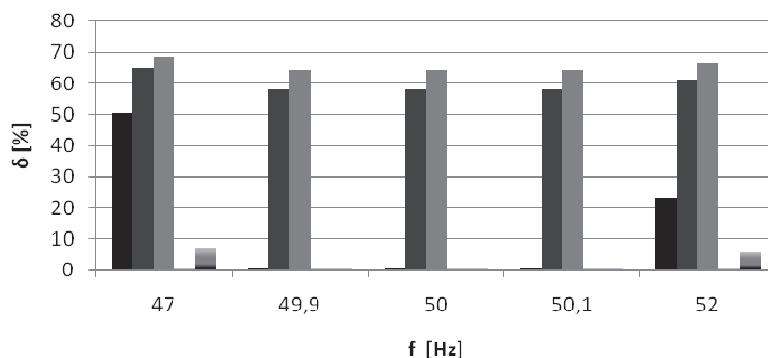
$$\delta = \frac{|U_a - U_F|}{U_F} \cdot 100\%, \quad (11)$$

gdzie: U_a to wartość skuteczna poszczególnych harmonicznych z symulacji, zaś U_F to wartość skuteczna poszczególnych harmonicznych otrzymana z rozwinięcia funkcji w trygonometryczny szereg Fouriera.

Przykładowy wyniki działania symulacji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy efekt symulacji okna 200 ms dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 52 Hz, gdzie: X – częstotliwość harmonicznej, Y – wartość amplitudy harmonicznej

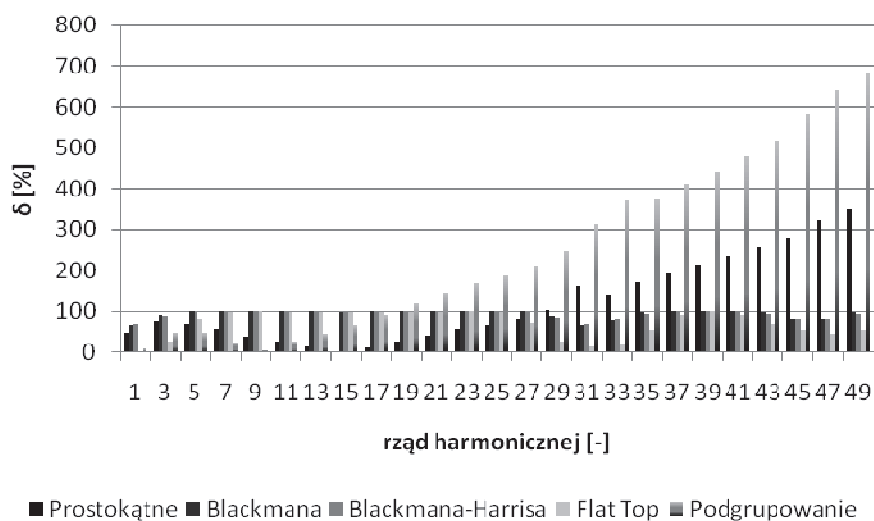


■ Prostokątne ■ Blackmana ■ Blackmana-Harrisa ■ Flat Top ■ Podgrupowanie

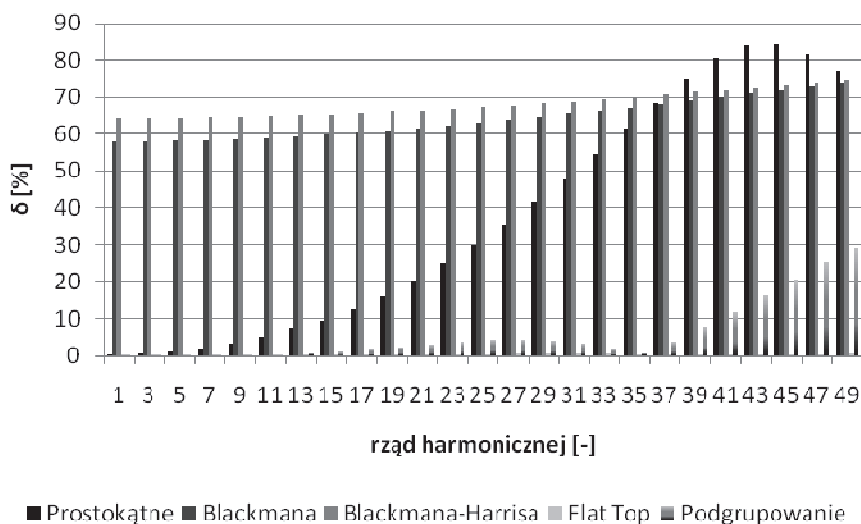
Rys. 4. Rozkład błędu względnego 1. harmonicznej dla sygnału sinusoidalnego

Wyniki otrzymanych błędów wyznaczenia składowej podstawowej dla sygnału sinusoidalnego o amplitudzie $230\sqrt{2} \approx 325V$ przedstawiono na rys. 4.

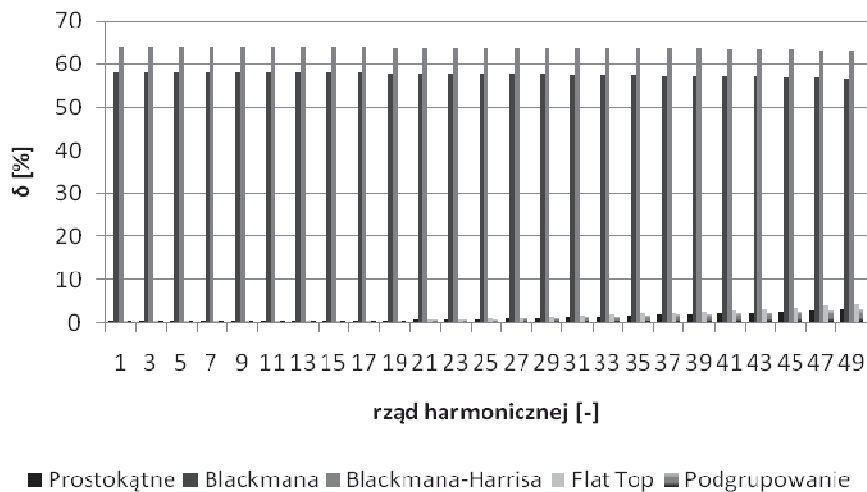
Na podstawie wyników symulacji dla sygnału trójkątnego o amplitudzie $230\sqrt{3}$ wykreślono rozrzuty błędów przy częstotliwościach równych kolejno: 47 Hz (rys. 5), 49,9 Hz (rys. 6), 50 Hz (rys. 7), 50,1 Hz (rys. 8) i 52 Hz (rys. 9).



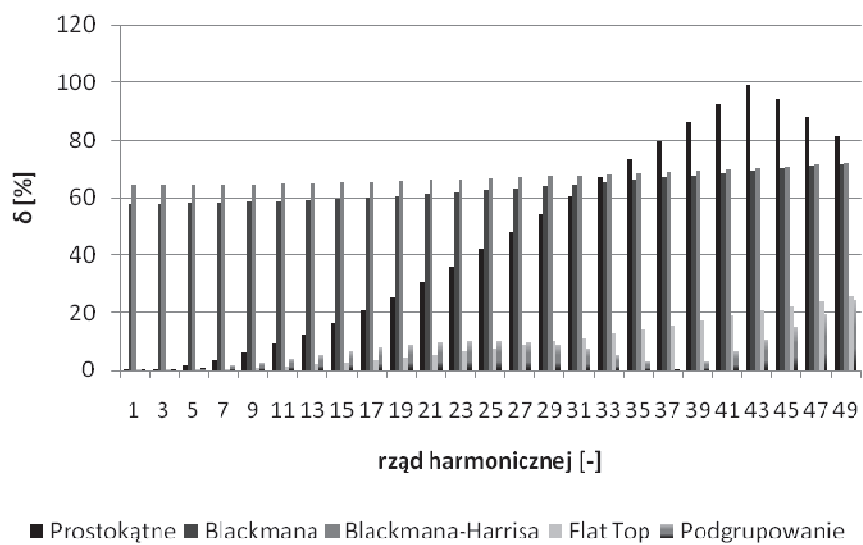
Rys. 5. Rozkład błędu względnego harmonicznych nieparzystych dla sygnału trójkątnego (47 Hz)



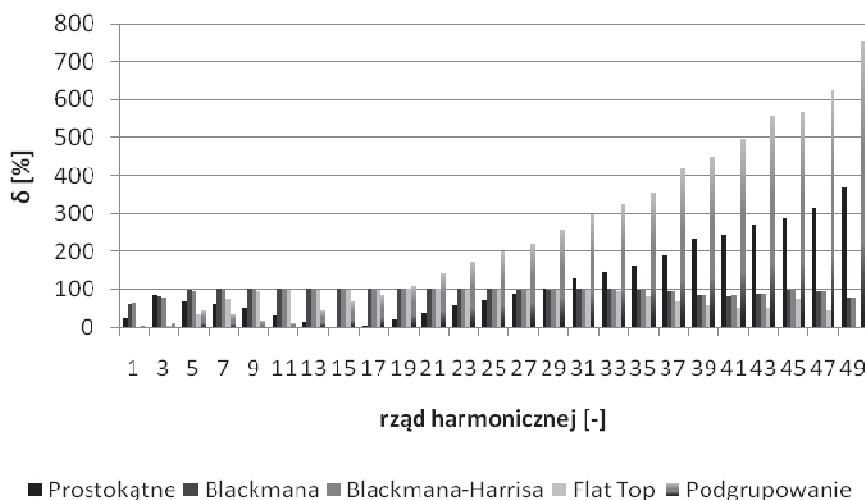
Rys. 6. Rozkład błędu względnego harmonicznych nieparzystych dla sygnału trójkątnego (49,9 Hz)



Rys. 7. Rozkład błędu względnego harmonicznym nieparzystych dla sygnału trójkątnego (50 Hz)



Rys. 8. Rozkład błędu względnego harmonicznym nieparzystych dla sygnału trójkątnego (50,1 Hz)



Rys. 9. Rozkład błędu względnego harmonicznych nieparzystych dla sygnału trójkątnego (52 Hz)

5. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że dla dopuszczalnych przez normę [10] odchyień częstotliwości od wartości znamionowej zauważalny jest efekt „przecieku widma” dla stosowanego w praktyce okna prostokątnego. Zjawisko to jest szczególnie niebezpieczne dla wyższych harmonicznych, co można zaobserwować na przykładzie sygnału trójkątnego.

Na podstawie uzyskanych wyników, można zauważyć, że proponowana przez normę [6] metoda podgrupowania, znacząco zmniejsza efekty „przecieku widma” dla przebiegów nieodkształconych w dopuszczalnym zakresie wahań częstotliwości w stosunku do okna prostokątnego. W przypadku sygnałów odkształconych, zmniejszenie błędu występuje jedynie przy waniach do $\pm 0,1$ Hz. Jednakże z punktu widzenia oceny jakości energii elektrycznej, jest to wystarczające, bowiem w praktyce rzadko odnotowuje się większe wahania. Mimo to, z punktu widzenia normy [10] większe wahania są dopuszczalne i dlatego zostały uwzględnione w przeprowadzonych badaniach.

Zastosowanie okna Blackmana oraz Blackmana-Harrisa, skutkuje w przybliżeniu stałym błędem w całym zakresie analizowanego widma. Ponadto umożliwia lepszą redukcję skutków „przecieku widma” niż okno prostokątne czy metoda podgrupowania, dla znacznych odchyień częstotliwości. Jednakże, zarówno przy częstotliwości znamionowej jak i nieznacznych odchyleniach częstotliwości generują błędy na poziomie dziesiątek procenta, co jest niedopuszczalne w przypadku analizy jakości energii elektrycznej.

Ostatnim analizowanym oknem pomiarowym było okno Flat Top, które cechowało się najlepszymi własnościami redukcji skutków zjawiska „przecieku

widma”. Przy drobnych wahaniach, zastosowanie tego okna daje podobne rezultaty co metoda podgrupowania. Jednakże, korzyści jakie powstają po zastosowaniu tego okna, pojawiają się dla znacznych odchyień, dopuszczonych przez normę [10]. Ponadto, własność tego okna gwarantuje brak zniekształceń dla składowej podstawowej, co przekłada się na miarę łączną THD odnoszącą się do tej wartości. W konsekwencji powoduje to, że metoda badania widma z wykorzystaniem tego okna, jest bardziej efektywna z punktu widzenia procesu oceny jakości energii elektrycznej niż metoda przedstawiona w normie [6].

Konkludując, na podstawie wyników symulacji, jednoznacznie widoczny jest negatywny wpływ zjawiska „przecieku widma” w procesie oceny jakości energii elektrycznej przy zastosowaniu okna prostokątnego oraz metody podgrupowania. Konsekwencją wystąpienia tego zjawiska jest znaczący wzrost błędów pomiaru zawartości wyższych harmoniczných. Błąd ten wzrasta wraz ze wzrostem rzędu harmoniczných. Ponadto maleje wartość harmoniczných podstawowej. W konsekwencji może to prowadzić to błędnej interpretacji badanego sygnału, czyli sygnał nieodkształcony może zostać zidentyfikowany jako odkształcony i odwrotnie. Ponadto zmniejszenie rzeczywistej wartości harmoniczných podstawowej, wpływa na błędne obliczenia innych wskaźników jakości energii elektrycznej. Z symulacji wynika, że zastosowanie okna Flat top, jest jedną z metod, zapewniającą minimalizację wspomnianego błędu. Przedmiotem dalszych badań jest przeprowadzenie pomiarów eksperymentalnych w oparciu o współczesne analizatory jak i symulacje odnoszące się do sygnałów odkształconych innych niż trójkąt.

LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. 2007 nr 93 poz. 623).
- [3] Otomański P., Kuwałek P., Application of Fourier Series to Determine the Measurements Error of Harmonics with Selected Power Quality Analyzers, Proc. of the 11th Int. Conf. on Measurement, pp. 15–18, Słowacja, Smolenice 2017.
- [4] Kuwałek P., Otomański P., Wpływ wartości skutecznej sygnału na dokładność pomiaru zawartości wyższych harmoniczných, Poznan University of Technology Academic Journal. Electrical Engineering, No. 90, pp. 213–221, Poznań 2017.
- [5] Fichtenholz G.M., Rachunek różniczkowy i całkowy, tom 3., PWN, Warszawa 1999.
- [6] PN-EN 61000-4-7: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-7: Metody badań i pomiarów – Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmoniczných i interharmoniczných oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [7] https://www.ocean.ovh/informacje/pl/Okno_czasowe, Dostęp: 05.03.2018, 22:39.
- [8] http://zet10.ipee.pwr.wroc.pl/cyf/cps_w08_v9.pdf, Dostęp: 14.01.2019, 09:48.

- [9] <http://www.cire.pl/pliki/2/e-pismo-1-jakosc.pdf>, Dostęp: 18.03.2018, 13:25.
- [10] PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.

THE PROBLEM OF “LEAKAGE SPECTRUM” IN THE PROCESS OF POWER QUALITY EVALUATION

The article presents simulation results related to the phenomenon “spectrum leak” in the process of assessing the quality of electricity. At the beginning, the article discusses issues related to the problem of the need to analyze the quality of electric energy and the phenomenon of "spectrum leakage" associated with this analysis. Subsequently, the analyzed signals were presented along with their functional description. For the discussed runs, FFT spectral analysis was performed using the MATLAB program. During the simulation, the frequency of the tested signal was changed in the range of acceptable voltage deviations of the network defined by the appropriate standard. When changing the frequency, the error of measuring the content of higher harmonics was tested using window function. The article ends with the collection of conclusions from the analysis and the summary.

(Received: 18.01.2019, revised: 04.03.2019)

