

Radosław KŁOSIŃSKI, Tomasz JUROJC
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki

POPRAWA DOKŁADNOŚCI CYFROWEGO WYZNACZANIA MOCY PRZEZ ZASTOSOWANIE SYNCHRONIZOWANYCH OKIEN CZASOWYCH

Przedmiotem pracy jest przedstawienie i porównanie wybranych algorytmów do wyznaczania mocy czynnej na podstawie próbek napięcia i prądu, w dziedzinie czasowej i częstotliwościowej, z zastosowaniem okien czasowych, standardowych oraz synchronizowanych. Wykorzystywane jest również modyfikowane dyskretne przekształcenie Fouriera (MDFT). Przedstawiono wyniki eksperymentów numerycznych, które wskazują na dużą poprawę dokładności wyznaczania mocy dzięki zastosowaniu okien synchronizowanych.

IMPROVING THE ACCURACY OF DIGITAL POWER DETERMINATION BY APPLICATION OF SYNCHRONIZED TIME WINDOWS

The subject of the work is presentation and comparison of selected algorithms for determining active power based on voltage and current samples in the time and frequency domain, using standard and synchronized time windows. The Modified Discrete Fourier Transform (MDFT) is also used. The results of numerical experiments are presented, which show a significant improvement in the accuracy of power determination due to the use of synchronized windows.

1. WSTĘP

Moc czynna to wartość średnia mocy chwilowej definiowana dla okresowych sygnałów napięcia i prądu. Może być wyznaczona na podstawie próbek tych sygnałów na zasadzie całkowania numerycznego. Zgodnie z twierdzeniem Parsewala możliwe jest też wyznaczanie mocy na podstawie

widm sygnałów napięcia i prądu. Wtedy widma wyznacza się za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT). Te metody obliczania mocy czynnej mogą dawać relatywnie dokładne wyniki w przypadku brania do obliczeń ciągów próbek obejmujących całkowitą liczbę okresów napięcia i prądu, czyli pod warunkiem zastosowania próbkowania synchronicznego. Spełnienie tego warunku często nie jest możliwe, wówczas wyznaczana wartość mocy może być obarczona znacznym błędem wynikającym z uśredniania w czasie odpowiadającym niecałkowitej liczbie okresów sygnałów lub z powodu przecieku widma w przypadku stosowania DFT. W celu zmniejszenia błędu można stosować okna czasowe zarówno w metodzie czasowej, jak i widmowej. Tego typu podejście przedstawione jest między innymi w pracy [1], gdzie analizowane jest wykorzystanie klasycznych okien cosinusoidalnych różnego rzędu. Daje to zwiększenie dokładności ale okazuje się, że zdecydowanie skuteczniejsze jest stosowanie okien synchronizowanych opisanych w [4].

W niniejszej pracy przedstawiono algorytmy wyznaczania mocy czynnej na podstawie próbek z zastosowaniem okien czasowych oraz modyfikacje tych algorytmów polegające na zastosowaniu okien synchronizowanych. Algorytmy te poddano weryfikacji przez porównanie wyników symulacji wyznaczania mocy przy różnych warunkach próbkowania sygnałów napięcia i prądu.

Badając wpływ okien synchronizowanych na dokładność wyznaczania mocy czynnej poddano analizie porównawczej następujące algorytmy:

- algorytm działający w dziedzinie czasu opisany w [1] przez Dušana Agreža oraz jego modyfikację polegającą na zastosowaniu synchronizowanych okien,
- algorytm oparty na twierdzeniu Parsewala, wykorzystujący DFT, oraz jego modyfikację polegającą na wykorzystaniu modyfikowanego DFT (MDFT) z oknami synchronizowanymi [2, 3].

Badania polegały na porównywaniu wyników eksperymentów numerycznych przeprowadzonych za pomocą aplikacji przygotowanej w środowisku LabWindows CVI w ramach realizacji pracy dyplomowej [5]. Założono, że analizowane sygnały napięcia i prądu są okresowe oraz, że wartości próbek, częstotliwości sygnałów i próbkowania znane są z precyzją liczb typu double.

2. WYZNACZANIE MOCY CZYNNEJ

Moc czynna jest to wartość średnia mocy chwilowej definiowana dla okresowych sygnałów napięcia i prądu według wzoru:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt, \quad (1)$$

gdzie: $u(t)$, $i(t)$ są analogowymi okresowymi sygnałami napięcia i prądu o wspólnym okresie T , a t_0 jest dowolnym momentem czasu.

Sygnały napięcia i prądu mogą być odpowiednio dokładnie reprezentowane przez ciągi próbek, jeżeli spełnione są założenia twierdzenia o próbkowaniu. W takim przypadku moc czynną można obliczyć na podstawie próbek napięcia i prądu według formuły:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u[n] \cdot i[n], \quad (2)$$

gdzie: $u[n]$, $i[n]$ to ciągi próbek napięcia i prądu, N jest liczbą próbek przypadającą na całkowitą liczbę m okresów sygnałów, zgodnie z zależnością:

$$NT_s = mT, \quad (3)$$

gdzie: T_s jest okresem próbkowania.

Jeżeli przebiegi sygnałów napięcia i prądu są dobrze reprezentowane przez próbki oraz spełniony jest warunek (3), to błąd wyznaczenia mocy za pomocą formuły (2) zależy jedynie od błędów pomiaru (próbkowania) napięcia i prądu oraz od błędów numerycznych wynikających z przyjętej precyzji reprezentacji liczb. Zazwyczaj próbkowanie nie jest realizowane synchronicznie ze względu na zmieniającą się częstotliwość sygnałów (np. przy zasilaniu z sieci elektroenergetycznej). W takim przypadku próbkowanie odbywa się niesynchronicznie i na całkowitą liczbę m okresów sygnału przypada niecałkowita liczba okresów próbkowania N' , co można zapisać zależnością:

$$N'T_s = mT, \quad (4)$$

W przypadku niesynchronicznego próbkowania moc czynna wyznaczana zgodnie ze wzorem (2) obarczona jest dodatkowym błędem wynikającym z uśredniania mocy chwilowej w niecałkowitej liczbie okresów sygnałów. W celu zmniejszenia tego błędu, liczba próbek N branych do obliczeń powinna być możliwie najbliższa niecałkowitej liczbie okresów próbkowania N' przypadających na całkowitą liczbę okresów sygnałów. Wtedy różnica:

$$\Delta = N - N' \quad (5)$$

przyjmuje wartość z przedziału $[-0,5; 0,5]$.

3. ALGORYTMY WYZNACZANIA MOCY CZYNNEJ W PRZYPADKU NIESYNCHRONICZNEGO PRÓBKOWANIA

3.1. Algorytm realizowany w dziedzinie czasu opisany w pracy [1]

Wyznaczanie mocy czynnej jest tożsame z wyznaczaniem składowej stałej sygnału mocy chwilowej. W przypadku niesynchronicznego próbkowania wyznaczanie widma obarczone jest błędami wynikającymi z tzw. przecieku widma. Jedną z metod ograniczenia tych błędów jest nakładanie okien na próbki analizowanego sygnału.

W pracy Dušana Agreža [1] opisany jest sposób wyznaczania mocy czynnej w przypadku niesynchronicznego próbkowania z zastosowaniem cosinusoidalnych okien czasowych. Podstawą działania algorytmu jest wyznaczanie wartości średniej iloczynów próbek napięcia, prądu i próbek okna czasowego. Analizę przeprowadzono dla okien typu cosinusoidalnego, których próbki określa formuła:

$$w[n] = \sum_{i=0}^{p-1} a_i \cos\left(\frac{2\pi}{N} i \left(n - \frac{N-1}{2}\right)\right), \quad (6)$$

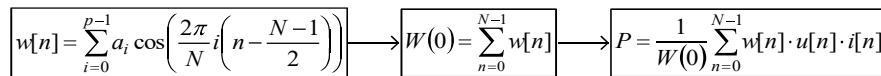
gdzie: N oznacza liczbę próbek, p jest rzędem okna, a_i są współczynnikami wagowymi składowych okna o wartościach podanych w tabeli 1.

Tabela 1

Wartości współczynników wagowych a_i składowych cosinusoidalnych okien czasowych różnego rzędu [1]

Rodzaj okna	Rząd okna p	a_0	a_1	a_2	a_3
prostokątne	1	1			
Hanninga	2	1/2	1/2		
cos III	3	3/8	4/8	1/8	
cos IV	4	10/32	15/32	6/32	1/32

Ponieważ zastosowanie okna powoduje zmniejszenie wartości próbek analizowanego sygnału, ten fakt trzeba uwzględnić w obliczeniach. W tym celu należy uzyskany wynik podzielić przez wysokość listka głównego obwiedni widma okna, czyli przez wartość średnią próbek okna. Aby uniknąć wzajemnie kompensujących się zbędnych dzieleni przez liczbę próbek, można dzielenie w uśrednianiu sygnału zastąpić dzieleniem przez sumę próbek okna. Schemat blokowy omawianego algorytmu przedstawiono na rysunku 1.



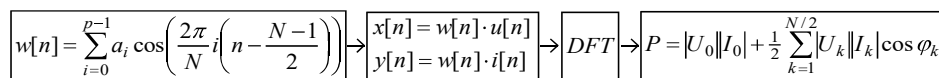
Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu Dušana Agreža
Fig. 1. Block diagram of Dušan Agrež algorithm

3.2. Wykorzystanie dyskretnego przekształcenia Fouriera z oknem czasowym

Zgodnie z twierdzeniem Parsevala, moc czynna sygnału poliharmonicznego równa jest sumie mocy czynnych poszczególnych składowych harmonicznym napięcia i prądu. Dla sygnału o h harmonicznym obowiązuje zależność:

$$P = |U_0||I_0| + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^h |U_k||I_k| \cos \varphi_k. \quad (7)$$

Wyznaczanie mocy czynnej w dziedzinie widmowej poprzedzone jest wyznaczeniem widm napięcia i prądu za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT). Ze względu na niesynchroniczne próbkowanie stosuje się okna czasowe. Moc czynną oblicza się jako sumę mocy składowych harmonicznym zgodnie z zależnością (7). Schemat algorytmu obliczeń przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania mocy wykorzystującego DFT z oknem czasowym
Fig. 2. Block diagram of a power determination algorithm using DFT with a time window

3.3. Zastosowanie okien synchronizowanych

Synchronizowane okna cosinusoidalne stanowią modyfikację okien standardowych polegającą na zastąpieniu w formule (6) całkowitej liczby próbek N niecałkowitą liczbą okresów próbkowania N' przypadających na całkowitą liczbę okresów sygnału.

$$w[n] = \sum_{i=0}^{p-1} a_i \cos\left(\frac{2\pi}{N'} i \left(n - \frac{N-1}{2}\right)\right), \quad (8)$$

Synchronizacja okien powoduje, że miejsca zerowe ich widm przypadają dla częstotliwości:

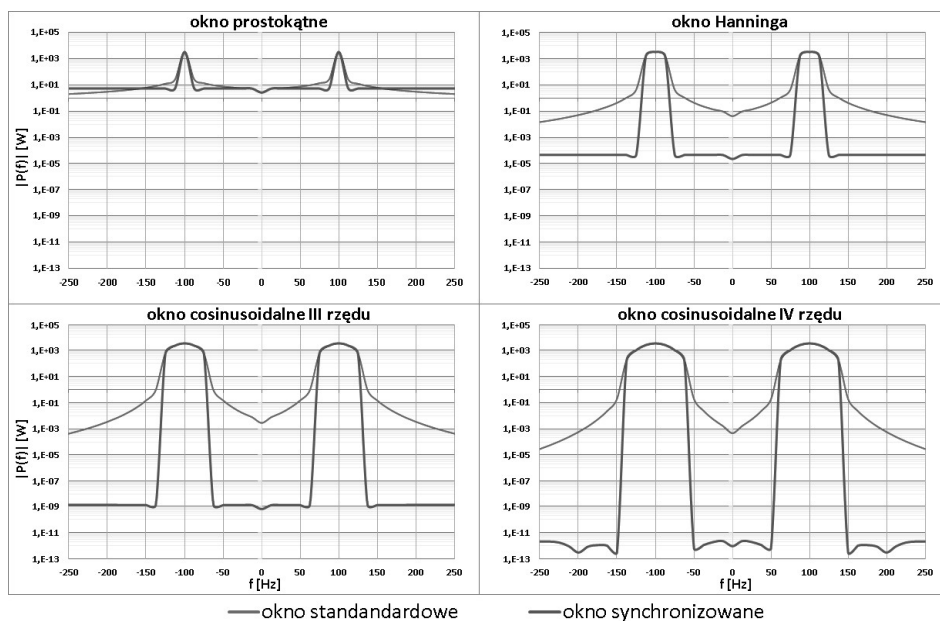
$$f_{(0)}(k) = \frac{k}{N'} f_s, \quad k = \pm(p, p+1, p+2, \dots), \quad (9)$$

gdzie: f_s to częstotliwość próbkowania, p jest rzędem okna cosinusoidalnego.

Niektóre z tych częstotliwości pokrywają się z częstotliwościami składowych harmonicznymi analizowanego sygnału. Dzięki temu wzajemny wpływ harmonicznymi sygnału wywołany przeciekiem widma jest w znacznym stopniu eliminowany.

Zastosowanie okien synchronizowanych do wyznaczenia mocy czynnej znacznie obniża błędy uzyskiwanych wartości. Skuteczność wykorzystania tych okien można zaobserwować analizując widma mocy chwilowej przedstawione na rysunku 3. Uzyskano je dla sinusoidalnego napięcia i prądu o częstotliwości $f = 49,950050$ Hz, przesuniętych względem siebie o $\varphi = 90^\circ$, co powoduje, że moc czynna jest równa zero. Do analizy wzięto $N = 400$ próbek przypadających na 4 okresy sygnałów próbkowanych z częstotliwością $f_s = 5000$ Hz. Próbkowanie jest niesynchroniczne, przyjęta wartość $\Delta = N - N' = 0,4$. Na rys. 3 na czterech układach współrzędnych przedstawione są obwiednie widma mocy uzyskane z zastosowaniem poszczególnych okien cosinusoidalnych różnego rzędu, w wersji standardowej i synchronizowanej. W obrazie widm dominują listki główne zlokalizowane w miejscu występowania składowej zmiennej mocy chwilowej (odpowiadającej mocy biernej) dla częstotliwości około ± 100 Hz. Jest to podwojona częstotliwość napięcia i prądu będąca efektem mnożenia sygnałów. Spodziewana w tym przykładzie zerowa moc czynna pozwala zaobserwować wpływ przecieku

widma na dokładność wyznaczania mocy czynnej – wartość składowej stałej widma mocy różniaca się od zera jest wartością błędu mocy czynnej. Jak widać to na wykresach, w przypadku stosowania okien synchronizowanych uzyskuje się zdecydowanie mniejsze wartości błędu. Dzieje się tak dzięki synchronizacji okien prowadzącej do korzystniejszej lokalizacji miejsc zerowych widma okna dokładnie dla częstotliwości składowych harmonicznnych, w tym składowej stałej stanowiącej moc czynną.



Rys. 3. Przykładowe widma mocy chwilowej uzyskane z zastosowaniem różnych okien
Fig. 3. Examples of instantaneous power spectra obtained using different windows

Algorytm Dušana Agreža wyznaczania mocy czynnej, przedstawiony w punkcie 3.1, został zmieniony przez zastąpienie standardowych okien cosinusoidalnych oknami synchronizowanymi. Schemat blokowy zmodyfikowanego algorytmu przedstawiony jest na rysunku 4.

$$w[n] = \sum_{i=0}^{p-1} a_i \cos\left(\frac{2\pi}{N'} i \left(n - \frac{N-1}{2}\right)\right) \longrightarrow W(0) = \sum_{n=0}^{N-1} w[n] \longrightarrow P = \frac{1}{W(0)} \sum_{n=0}^{N-1} w[n] \cdot u[n] \cdot i[n]$$

Rys. 4. Schemat blokowy zmodyfikowanego algorytmu Dušana Agreža
Fig. 4. Block diagram of Dušan Agrež modified algorithm

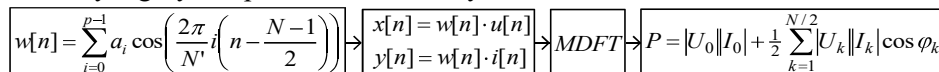
3.4. Wykorzystanie modyfikowanego dyskretnego przekształcenia Fouriera (MDFT) z synchronizowanym oknem czasowym

Wyznaczając widmo sygnału okresowego próbkowanego niesynchronicznie za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT), częstotliwości wyznaczanych składowych harmonicznymi (próbek widma) różnią się od częstotliwości składowych harmonicznymi analizowanego sygnału. Rozbieżność ta wynika z niezgodności czasu trwania określonej liczby okresów sygnału z czasem obserwacji sygnału wyrażającym się iloczynem liczby próbek i okresu próbkowania, $\Delta t = N \cdot T_s$. Modyfikacja dyskretnego przekształcenia Fouriera polega na dopasowaniu częstotliwości (pulsacji) funkcji bazowych szeregu Fouriera do częstotliwości składowych harmonicznymi analizowanego sygnału [2,3]. Uzyskuje się to przez zastąpienie w formule przekształcenia całkowitej liczby próbek N niecałkowitą (rzeczywistą) liczbą okresów próbkowania N' przypadających na całkowitą liczbę okresów sygnału (4). Formuła MDFT ma postać:

$$X(k) = \frac{2}{N'} \sum_{n=0}^{N'-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N'} kn} \quad (10)$$

gdzie: $X(k)$ jest zespoloną amplitudą k -tej harmonicznej, $x[n]$ są próbkami sygnału, N jest całkowitą liczbą próbek najbliższą niecałkowitej liczbie okresów próbkowania N' .

MDFT pozwala na znaczne zwiększenie dokładności wyznaczenia widma sygnałów okresowych w przypadku niesynchronicznego próbkowania. Wymaga jednak znajomości częstotliwości sygnału oraz użycia do analizy zestawu próbek o liczbie N najbliższej liczbie okresów próbkowania N' przypadających na całkowitą liczbę okresów sygnału [2,3]. Znaczny wzrost dokładności estymacji składowych harmonicznymi uzyskuje się stosując okna synchronizowane [4]. Algorytm wyznaczenia mocy czynnej z wykorzystaniem MDFT i okien synchronizowanych działa na tej samej zasadzie co algorytm wykorzystujący DFT opisany w punkcie 3.2 zgodnie ze wzorem (7). Schemat blokowy algorytmu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat blokowy algorytmu wyznaczenia mocy z zastosowaniem MDFT z synchronizowanym oknem czasowym

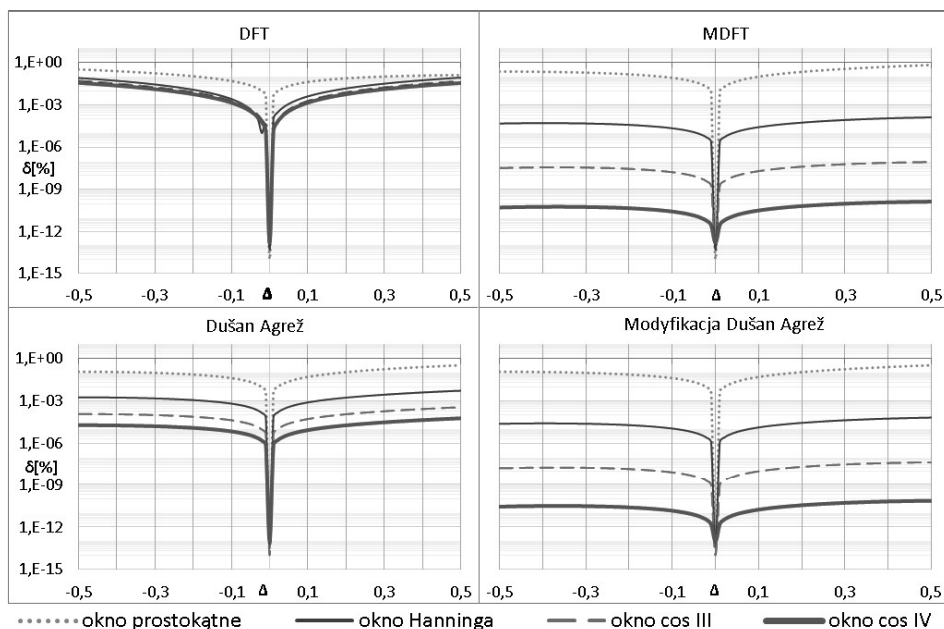
Fig. 5. Block diagram of the power determination algorithm using MDFT with a synchronized time window

4. BADANIA SYMULACYJNE

Przeprowadzono badania symulacyjne, które miały na celu porównanie dokładności estymacji mocy czynnej za pomocą algorytmów opisanych w punkcie 3. stosowanych w przypadku niesynchronicznego próbkowania okresowych sygnałów napięcia i prądu. Założono wykorzystywanie ciągów próbek przypadających na całkowitą liczbę okresów sygnałów, tzn. liczba próbek N jest jak najbliższa liczbie okresów próbkowania N' . W tej sytuacji różnica Δ między tymi liczbami, zdefiniowana przez (5), mieści się w zakresie $[-0,5; 0,5]$ i jej wartość stanowi miarę odstępstwa od próbkowania synchronicznego. Porównywane były wartości błędów względnych wyznaczenia mocy według poszczególnych algorytmów zastosowanych do tego samego zestawu próbek. Dokładna wartość mocy, stanowiąca odniesienie dla wyników działania algorytmów, obliczana była na podstawie zadawanych parametrów sygnałów napięcia i prądu.

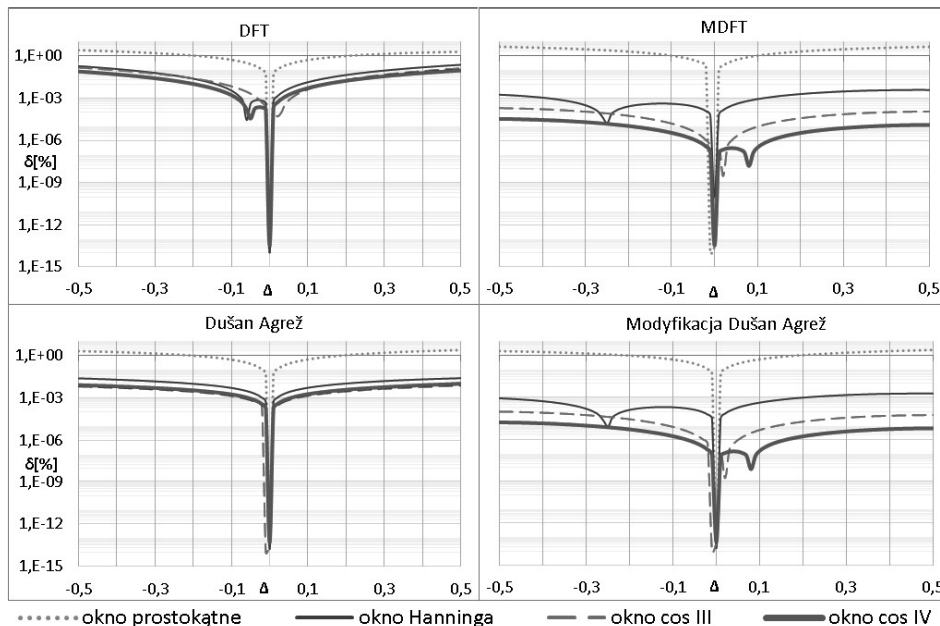
Badania przeprowadzono za pomocą specjalnie przygotowanej aplikacji umożliwiającej porównanie algorytmów [5]. W aplikacji tej można zadawać takie parametry jak: faza początkowa napięcia, przesunięcie fazowe między napięciem a prądem φ , liczba okresów sygnału, liczba próbek na okres, rząd cosinusoidalnego okna czasowego oraz parametr Δ w zakresie 0,5 do -0,5. W aplikacji do wyboru są sygnały o następujących przebiegach: sinusoidalnym oraz piłokształtnym i prostokątnym o ograniczonym widmie – na zasadzie określania liczby uwzględnianych harmonicznych. Program umożliwia przeprowadzanie symulacji seryjnych z inkrementacją wybranych parametrów i zapisem wyników do pliku, jest to przydatne do tworzenia różnego rodzaju charakterystyk.

Na rysunkach 6. i 7. przedstawiono porównanie błędów względnych wyznaczania mocy czynnej według różnych algorytmów w funkcji Δ , dla różnych okien, dla sygnałów o parametrach: faza początkowa napięcia 30° , kąt przesunięcia fazowego między napięciem a prądem (dla podstawowej harmonicznej) $\varphi = 30^\circ$, 20 próbek na okres, 4 okresy sygnału. Na rysunku 6. przedstawiono wartości błędów dla sygnałów sinusoidalnych natomiast na rysunku 7. dla sygnałów poliharmonicznych stanowiących 9 początkowych harmonicznych sygnału piłokształtnego.



Rys. 6. Porównanie błędów względnych wyznaczenia mocy czynnej badanych algorytmów dla różnych okien czasowych dla sygnałów sinusoidalnych napięcia i prądu
 Fig. 6. Comparison of the relative errors in determining the active power of the tested algorithms for different time windows for sinusoidal voltage and current signals

Dla przebiegów sinusoidalnych (rys. 6.) błędy uzyskiwane za pomocą algorytmów wykorzystujących okna synchronizowane są zdecydowanie mniejsze niż błędy uzyskiwane za pomocą algorytmów standardowych. Znaczenie ma rząd okna, wraz z jego wzrostem wartości błędów maleją około tysiąckrotnie. Porównując wyniki dla zmodyfikowanego algorytmu Dušana Agreža działającego w dziedzinie czasowej z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem MDFT można zauważyć niewielką różnicę na korzyść tego pierwszego. Prawdopodobnie wynika to z większej złożoności obliczeniowej algorytmu opartego na MDFT.



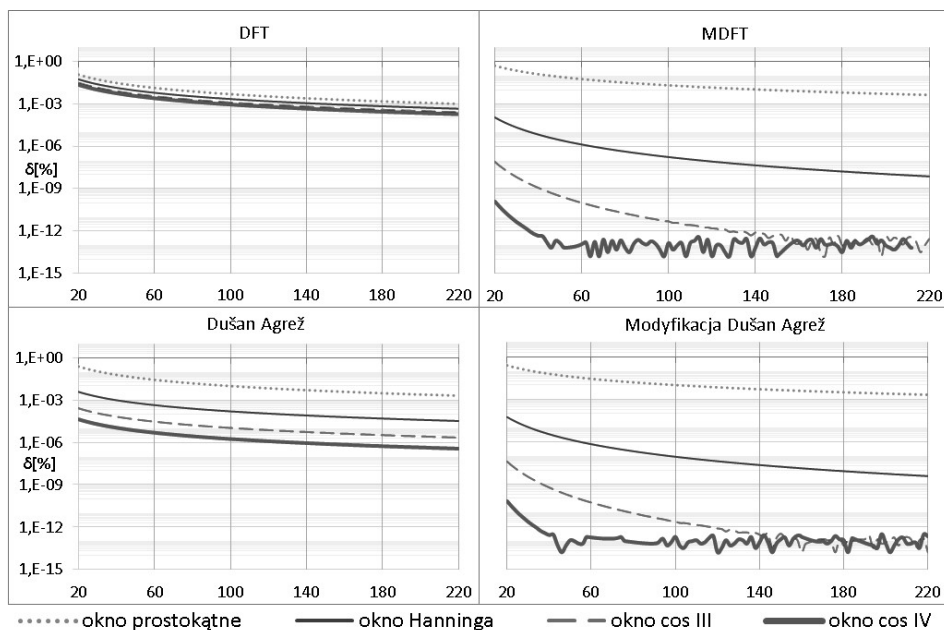
Rys. 7. Porównanie błędów względnych wyznaczania mocy czynnej badanych algorytmów dla różnych okien czasowych dla sygnałów poliharmonicznych napięcia i prądu

Fig. 7. Comparison of the relative errors in determining the active power of the tested algorithms for different time windows for poly-harmonic voltage and current signals

Dla sygnałów poliharmonicznych (rys. 7.), w opisanym przykładzie błędy uzyskiwane za pomocą algorytmów wykorzystujących okna synchronizowane są mniejsze ale jedynie o dwa rzędy w porównaniu do algorytmów standardowych. Wyjątek stanowi algorytm wykorzystujący MDFT z oknem prostokątnym dający nieznacznie gorsze wyniki niż wersja z DFT. Prawdopodobnie przyczyną tego zjawiska jest to że okno prostokątne nie może być synchronizowane, jego formuła nie zawiera składników cosinusoidalnych.

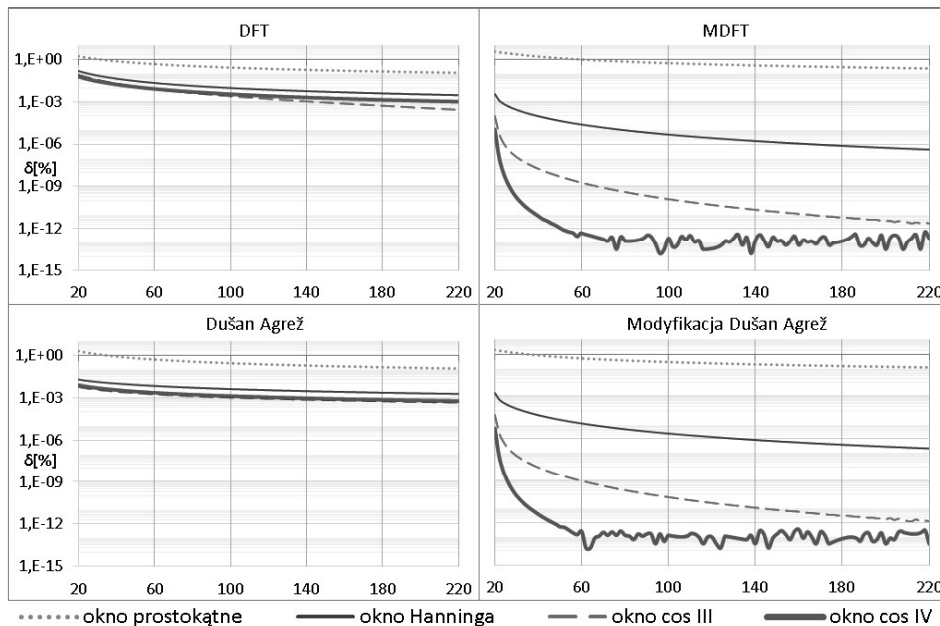
Wartym zauważenia jest fakt, że charakterystyki błędów mają nieregularne przebiegi, ale dla obu modyfikowanych algorytmów są niemal identyczne. Możliwe, że źródłem tych błędów jest słaba reprezentacja najwyższej występującej tutaj dziewiątej harmonicznej, na jej okres przypada niewiele ponad 2 próbki (około 2,2 okresu próbkowania). Tę hipotezę mogą potwierdzać wyniki przedstawione na rysunku 9., z których wynika, że gdy liczba próbek na okres jest większa, to dla sygnałów poliharmonicznych uzyskuje się dokładność zbliżoną jak dla przebiegów sinusoidalnych.

Na rysunkach 8. i 9. przedstawiono porównanie błędów względnych wyznaczenia mocy czynnej za pomocą badanych algorytmów dla różnych okien czasowych w zależności od liczby próbek przypadających na okres sygnału. Przyjęto parametry oraz rodzaje sygnałów takie same jak poprzednio, przy czym badania przeprowadzono dla jednej wartości $\Delta = 0,4$. Na rysunku 8. przedstawiono wartości błędów dla sygnałów sinusoidalnych natomiast na rysunku 9. przedstawiono wartości błędów dla sygnałów poliharmonicznych stanowiących 9 początkowych harmonicznych sygnału piłokształtnego.



Rys. 8. Porównanie błędów względnych wyznaczenia mocy czynnej algorytmów dla różnych okien czasowych w zależności od liczby próbek na okres dla sygnałów sinusoidalnych

Fig. 8. Comparison of relative errors in determining the active power of algorithms for different time windows depending on the number of samples per period for sinusoidal signals



Rys. 9. Porównanie błędów względnych wyznaczania mocy czynnej algorytmów dla różnych okien czasowych w zależności od liczby próbek na okres dla sygnałów poliharmonicznych

Fig. 9. Comparison of relative errors in determining the active power of algorithms for different time windows depending on the number of samples per period for polyharmonic signals

Podobnie jak poprzednio, widoczne jest, że wykorzystanie okien synchronizowanych daje zdecydowanie mniejsze błędy. Dla algorytmów standardowych zwiększenie liczby próbek na okres (zwiększenie częstotliwości próbkowania) przynosi tylko nieznaczny spadek błędów niezależnie od rzędu okna i rodzaju sygnałów.

Dla algorytmów wykorzystujących okna synchronizowane widać znaczny spadek wartości błędów wraz ze wzrostem liczby próbek na okres, szczególnie dla mniejszych wartości tej liczby. Dla okna III i IV rzędu widać zjawisko nasycenia objawiające się tym, że od pewnej wartości liczby próbek na okres dalsze jej zwiększanie nie zmniejsza wartości błędów. Prawdopodobnie osiągnięty jest poziom błędów wynikający z ograniczonej precyzji reprezentacji liczb.

Dla większej liczby próbek na okres dla algorytmów zmodyfikowanych niewielkie znaczenie ma kształt przebiegów sygnałów.

Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 6.–9. pozwala stwierdzić, że zastosowanie okien synchronizowanych znacznie zwiększa dokładność badanych algorytmów wyznaczania mocy czynnej. Im wyższy jest rząd zastosowanego okna tym błędy są mniejsze.

W przypadku stosowania okien synchronizowanych różnica dokładności między algorytmami działającymi w dziedzinie czasowej i częstotliwościowej jest nieznaczna.

5. WNIOSKI

Zastosowanie okien synchronizowanych prowadzi do znacznego obniżenia błędów wyznaczania mocy czynnej na podstawie próbek napięcia i prądu zebranych niesynchronicznie, niezależnie od tego czy obliczenia przeprowadza się w dziedzinie czasowej, czy częstotliwościowej.

Uzyskane w wyniku symulacji, tak niskie wartości błędów są nieosiągalne w rzeczywistych warunkach, jednak wykonane analizy pokazują przydatność okien synchronizowanych w tego typu obliczeniach. Pozwalają też oszacować parametry próbkowania tak, aby błędy wynikające z przyjętego algorytmu obliczeń nie miały wpływu na błąd wyznaczania mocy.

Można się spodziewać, że dokładność algorytmów wykorzystujących okna synchronizowane w dużym stopniu zależy od dokładności wyznaczenia częstotliwości sygnałów.

LITERATURA

1. Agrež D.: Power measurement in the non-coherent sampling, *Science Direct Measurement* 41 2008, p. 230-235.
2. Kłosiński R.: Modification of the DFT for improving accuracy of a non-coherently sampled periodic signal spectrum estimation, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9, 2008, s. 153-158.
3. Kłosiński R.: Zastosowanie MDFT do analizy widmowej sygnałów okresowych próbkowanych niesynchronicznie, *PAK*, vol. 54, nr 6, 2008, s. 337-339.
4. Kłosiński R.: Synchronizacja okien czasowych przy wyznaczaniu widma za pomocą MDFT, *PAK*, vol. 60, nr 11 2014, s. 951-953.
5. Jurojć T.: Wyznaczanie mocy czynnej oraz wartości skutecznej napięcia i prądu na podstawie próbek, Praca dyplomowa magisterska, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2020.