

Andrzej BIENÍ
Zakład Metrologii
Akademia Górniczo-Hutnicza

POMIAR MOCY CZYNNEJ Z WYKORZYSTANIEM CYFROWEGO PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW NAPIĘCIA I PRĄDU

Streszczenie. Pomiar mocy czynnej za pomocą systemu pomiarowego realizującego przetwarzanie sygnałów napięcia i prądu w sposób cyfrowy wymaga przybliżenia zależności definicyjnych. Przedstawiona praca proponuje wykorzystanie wzoru Gregoriego (2) do celów obliczenia całki w zależności definicyjnej (1) lub użycie jednego przetwornika A/C z multiplexerem, a następnie użycie filtrów cyfrowych w celu wyrównania opóźnień pomiędzy próbkowanymi sygnałami. Proponowane rozwiązania umożliwiają zbudowanie systemu pomiarowego pracującego w czasie rzeczywistym.

ACTIVE POWER MEASUREMENT WITH DIGITAL PROCESSING OF VOLTAGE AND CURRENT SIGNALS

Summary. Idea of active power measurement based on digital processing of voltage and current signals should be introduced with closer look at some definitions. The paper is describing usage of Gregory expression (2) for integral calculation purposes in expression (1) or using a single A/D converter with multiplexer and digital filters compensating delay between sampled signals. Suggested solutions make possible a construction of real-time measurement system.

1. WYZNACZANIE WARTOŚCI MOCY CZYNNEJ Z PRÓBEK SYGNAŁÓW NAPIĘCIA I PRĄDU

Moc czynna jest jedną z najczęściej mierzonych wielkości elektrycznych. Jest to wielkość złożona i praktyczne realizacje przeważnie stosują pewne uproszczenia w celu jej

obliczenia. Definicja mocy czynnej dla napięcia i prądu o skończonym czasie trwania jest następująca [1]:

$$P = \frac{1}{t_b - t_a} \int_{t_a}^{t_b} u(t)i(t)dt, \quad (1)$$

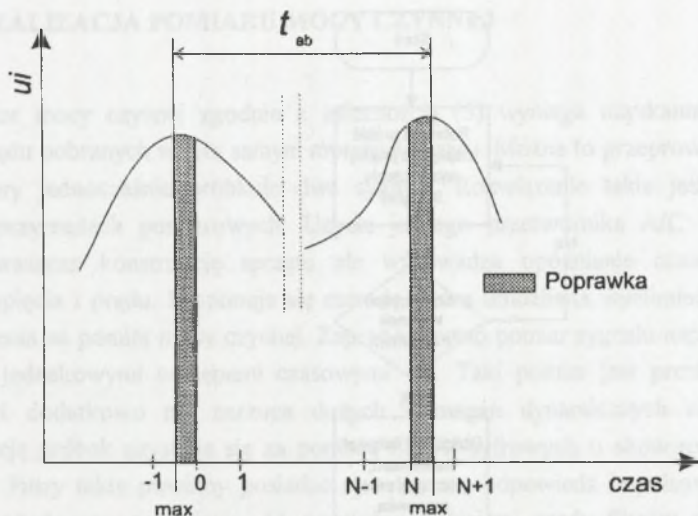
gdzie: (t_a, t_b) - przedział czasu obserwacji napięcia $u(t)$ i prądu $i(t)$.

Realizacje cyfrowe definicji (1) sprowadzają się do zastąpienia całkowania sumowaniem próbek sygnałów napięcia u_k i prądu i_k , np. w pracy [3] zamiana ta sprowadza się do wyznaczenia całki (1) za pomocą sumowania iloczynów próbek napięcia i prądu (metoda prostokątów). Przybliżenie to umożliwia zbudowanie prostego algorytmu działającego w czasie rzeczywistym, jednak jego wpływ i wpływ znajomości granic całkowania z rozdzielczością do okresu próbkowania prowadzi do stosunkowo dużych błędów obliczeń. Błędy te są ograniczane poprzez zmniejszanie okresu próbkowania, co z kolei prowadzi do zapotrzebowania na większą moc obliczeniową używanego sprzętu oraz na szybsze przetworniki A/C. Całkę (1) można wyznaczyć stosując bardziej złożone algorytmy, np. trapezów [1], [2]. Metoda ta, oparta na wielu węzłach, prowadzi do równie prostego algorytmu co metoda prostokątów [4], [7]. Na podstawie prac [4], [5], [7] zaproponowano jeszcze dokładniejszą metodę wyznaczenia całki z zależności (1), opartą na wzorze Gregoriego:

$$K = \Delta t \left[\frac{9}{24} u_0 i_0 + \frac{28}{24} u_1 i_1 + \frac{23}{24} u_2 i_2 + u_3 i_3 + \dots + u_{N-3} i_{N-3} + \frac{23}{24} u_{N-2} i_{N-2} + \frac{28}{24} u_{N-1} i_{N-1} + \frac{9}{24} u_N i_N \right], \quad (2)$$

gdzie: Δt - okres próbkowania sygnałów napięcia i prądu.

Sposób ten znacznie poprawia dokładność obliczeń całki (np. [5], [7]), lecz w celu uzyskania dużych dokładności wyrażenia (1) konieczne jest również dokładniejsze wyznaczenie przedziału (t_a, t_b) . Zaproponowano wybór przedziałów całkowania pomiędzy kolejnymi maksimumami $u(t)i(t)$ oraz wniesienie poprawki uwzględniającej pola pomiędzy estymatami maksimumów a miejscami próbkowania. Rozwiązanie to ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Sposób wyznaczania wartości mocy (1) z uwzględnieniem poprawek
 Fig. 1. Method of active power measurement with corrections

Miejsca występowania maksimum wyznaczono ich estymatami t_{\max} jako wartości maksimum parabol przechodzących przez trzy najbliższe położone zarejestrowane punkty:

$$\tilde{t}_{\max} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{p(n_{\max} - 1) - p(n_{\max} + 1)}{p(n_{\max} + 1) - 2p(n_{\max}) + p(n_{\max} - 1)}, \quad (3)$$

gdzie: n_{\max} - miejsce wystąpienia maksimum $p(n_{\max}) = u_{\max} \cdot i_{\max}$.

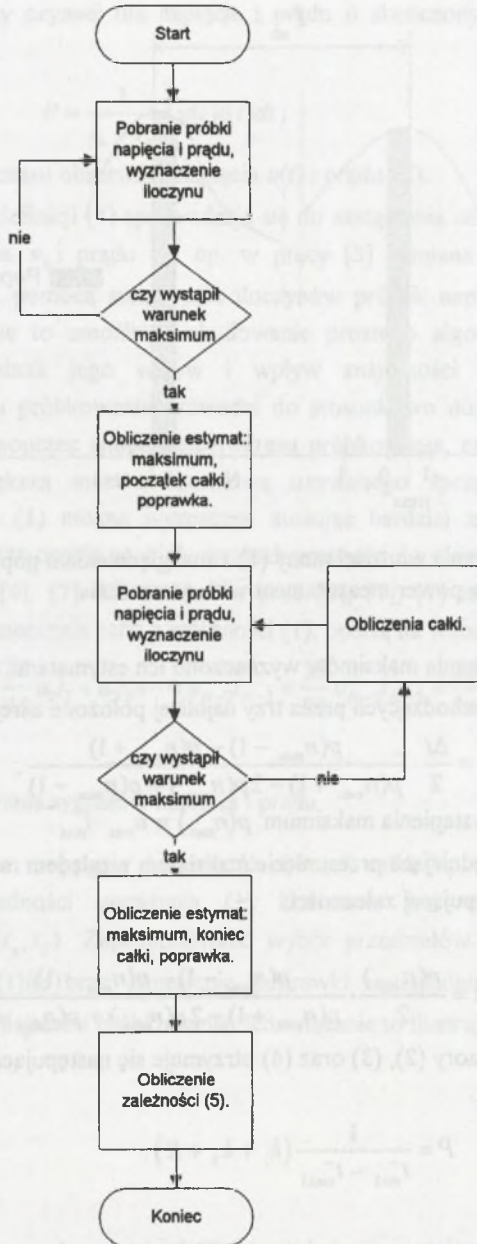
Poprawka uwzględniająca przesunięcie maksimum względem momentów próbkowania jest wyznaczana z następującej zależności:

$$k = \frac{p(n_{\max})}{2} \cdot \frac{p(n_{\max} - 1) - p(n_{\max} + 1)}{p(n_{\max} + 1) - 2p(n_{\max}) + p(n_{\max} - 1)}. \quad (4)$$

Wykorzystując wzory (2), (3) oraz (4) otrzymuje się następującą zależność na moc czynną:

$$P = \frac{1}{\tilde{t}_{\max 2} - \tilde{t}_{\max 1}} (k_1 + k_2 + K). \quad (5)$$

Algorytm wyznaczający moc z zależności (5) jest następujący:



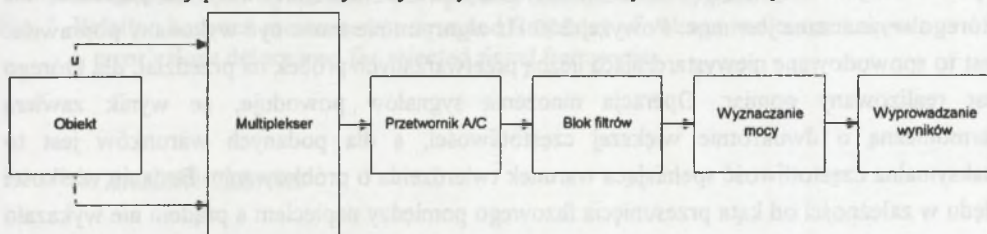
Rys.2. Algorytm pomiaru mocy czynnej wg zależności (5)

Fig. 2. Active power measurement algorithm according to expression (5)

Pętla służy do wyznaczania całki dla wskaźnika próbki od 3 do $N-3$, natomiast początek i koniec zależności (3) jest wyznaczany we fragmencie obliczającym poprawki związane z estymacją maksimum.

2. REALIZACJA POMIARU MOCY CZYNNEJ

Pomiar mocy czynnej zgodnie z zależnością (5) wymaga uzyskania ciągu próbek napięcia i prądu pobranych w tym samym momencie czasu. Można to przeprowadzić używając sprzętu, który jednocześnie próbkuje dwa sygnały. Rozwiązanie takie jest spotykane w niektórych przyrządach pomiarowych. Użycie jednego przetwornika A/C i multiplexera znacznie upraszcza konstrukcję sprzętu ale wprowadza opóźnienie czasowe pomiędzy próbkami napięcia i prądu. Proponuje się metodę, która umożliwia wyeliminowanie wpływu tego opóźnienia na pomiar mocy czynnej. Zaproponowano pomiar sygnału napięcia i prądu na przemian z jednakowymi odstępami czasowymi Δt . Taki pomiar jest prosty do realizacji sprzętowej i dodatkowo nie narzuca dużych wymagań dynamicznych na multiplexer. Synchronizację próbek uzyskuje się za pomocą filtrów cyfrowych o skończonej odpowiedzi impulsowej. Filtry takie powinny posiadać symetryczną odpowiedź impulsową [6]. W celu uzyskania pożądanego opóźnienia Δt pomiędzy wyjściami rzędy filtrów różnią się o 1. Schemat blokowy pomiaru mocy z wykorzystaniem filtrów przedstawia rys.3.



Rys.3. Pomiar mocy czynnej za pomocą jednego przetwornika A/C z multiplexersiem

Fig. 3. Active power measurement with single A/D converter and multiplexer

3. BADANIA MODELOWE

Przedstawiony sposób pomiaru mocy czynnej przed zbudowaniem przyrządu został sprawdzony poprzez wykonanie szeregu eksperymentów na zbudowanym modelu symulacyjnym. Do badań modelowych posłużono się środowiskiem MATLAB. Po sprawdzeniu poprawności zbudowanego modelu stwierdzono, że przyrząd może mierzyć moc czynną. Następnie przeprowadzono badania w celu określenia dokładności pomiaru i wpływu na dokładność parametrów konstrukcyjnych. Badania prowadzono dla jednej częstotliwości próbkowania sygnałów, tj. 1 kHz, co dla wybranej metody daje częstotliwość pracy przetwornika A/C 2 kHz, czyli krytyczne fragmenty programu realizującego pomiar muszą być wykonane w czasie mniejszym niż 500 μ s. Sygnałem testowym był sygnał sinusoidalny. Błąd wyznaczany podczas badań wyznaczano z następującej zależności:

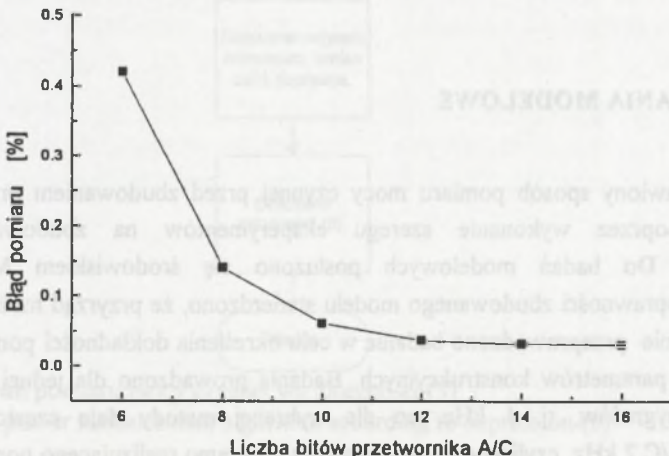
$$\delta = \left| \frac{P_d - P_w}{P_z} \right|, \quad (6)$$

gdzie: P_d - moc wyznaczona na podstawie definicji (1),

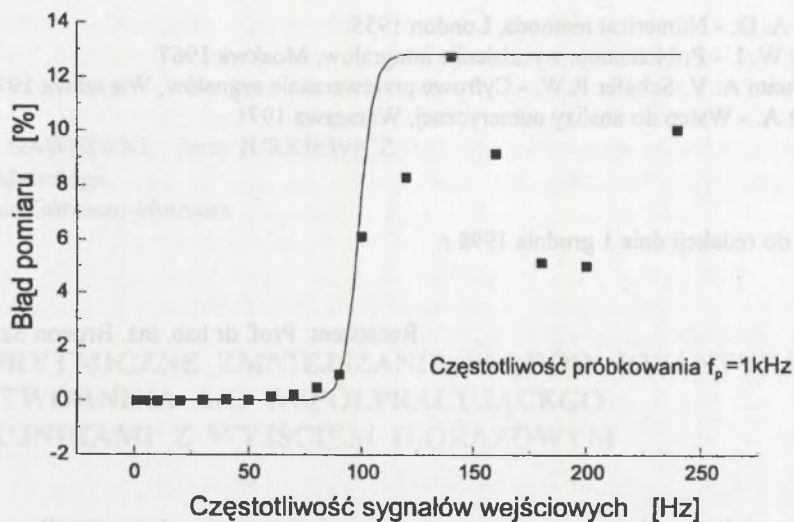
P_w - moc wyznaczona podczas badań symulacyjnych,

P_z - wartość mocy odpowiadająca zakresowi badanego modelu.

Rysunek 4 prezentuje zależność błędu pomiaru mocy od ilości bitów przetwornika A/C dla sygnału napięcia i prądu o częstotliwości 50Hz. Można zauważyć, że błąd pomiaru maleje wraz ze wzrostem liczby bitów przetwornika, ale od 12 bitów spadek wielkości błędu jest nieznaczny. Niewielka wartość błędu mniejsza od 0.5% nawet dla małej liczby bitów jest wynikiem właściwości uśredniających całkowania, wynikających wprost z definicji (1). Krzywa ta sugeruje możliwość pewnego ograniczania liczby bitów przetwornika A/C w celu uzyskania wystarczająco małego (oczekiwanego) błędu. Na rys. 5 przedstawiono zależność błędu pomiaru od częstotliwości sygnałów napięcia i prądu dla przetwornika A/C o rozdzielczości 12 bitów. Gwałtowna zmiana wielkości błędu powyżej 100 Hz wskazuje, że algorytm całkowania wprowadza już duży błąd, dla efektywnej liczby próbek mniejszej od 5 na przedział, dla którego wyznaczana jest moc. Powyżej 250 Hz algorytm nie może być wykonany poprawnie. Jest to spowodowane niewystarczającą liczbą przetwarzanych próbek na przedział, dla którego jest realizowany pomiar. Operacja mnożenia sygnałów powoduje, że wynik zawiera harmoniczną o dwukrotnie większej częstotliwości, a dla podanych warunków jest to maksymalna częstotliwość spełniająca warunek twierdzenia o próbkowaniu. Badanie wielkości błędu w zależności od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem a prądem nie wykazało zauważalnej zmiany wartości błędu od kąta przesunięcia fazowego.



Rys.4. Zależność pomiędzy błędem pomiaru mocy a liczbą bitów przetwornika A/C
 Fig. 4. Relation between measurement error and bits number of A/D converter



Rys. 5. Zależność błędu pomiaru od częstotliwości sygnałów napięcia i prądu
- wartości błędu wyznaczone dla wybranej częstotliwości sygnałów

Fig. 5. Relation between measurement error and frequency of voltage and current signals
- error values determined for selected signal frequencies

4. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione wyniki badań modelowych potwierdzają trafność rozwiązania pomiaru mocy czynnej za pomocą przetwornika A/C z multiplekserem. Stanowiły one podstawę do zbudowania przyrządu opartego na procesorze sygnałowym i działającego w czasie rzeczywistym.

LITERATURA

1. Bień A. Czajkowski J. Morończyk A. - Wyznaczanie wartości skutecznych prądu fazowego i jego składowych podczas rozruchu maszyny synchronicznej jawnobiegunowej - badania modelowe, III Konferencja Elektrotechnika Prądów Niesinusoidalnych, Materiały konferencyjne Tom1, Zielona Góra 1997
2. Bień A. Czajkowski J. Morończyk A. - Algorytm pomiaru wartości skutecznej w czasie rzeczywistym, IV Szkoła - Konferencja, Elektrotechnika Prądy Niesinusoidalne. Tom1, Zielona Góra 1998
3. Bolikowski J. Czarnecki L. Miłek M. - Pomiary wartości skutecznych i mocy w obwodach o przebiegach niesinusoidalnych, Warszawa 1990

4. Booth, A. D. - Numerical methods, London 1955
5. Kryłow W. I. - Pribliżennoje wycislenije integralów, Moskwa 1967
6. Oppenheim A. V. Schafer R.W. - Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Warszawa 1979
7. Ralston A. - Wstęp do analizy numerycznej, Warszawa 1971

Wpłynęło do redakcji dnia 1 grudnia 1998 r.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Brunon Szadkowski

Abstract

Idea of active power measurement based on real-time digital processing of voltage and current signals should be introduced with closer look at definition (1).

In the paper author proposed integral calculation method based on Gregory expression (2), correction of integration period estimation and integration result correction taking values related with ends of integration period into account.

In described method integral is calculated between two consecutive maximums of voltage and current product (see fig. 1).

Expressions (3), (4) and (5) are used for evaluation of active power value.

To measure voltage and current signals author used system with digital signal processor and A/D converter with multiplexer, followed by digital filters. Impulse response of the filters is symmetric [6] and filter orders differ between by 1. Block scheme of the instrument is shown on fig. 3.

Presented, active power measurement method was checked by building instrument simulation model. Experiment results are located on fig. 4 and 5.

Estimated measurement error is less then 0.5 percent of range for following parameters:

- 12-bit analog/digital converter ADC
- sample frequency: 1 kHz
- type of signal: 50 Hz voltage and current.

As noticed (fig. 5), measurement result is correct for voltage and current signals frequencies corresponding to at least 10 samples per period.