

Cyfrowe przetwarzanie sygnału przetwornika obrotowo-impulsowego

Eligiusz PAWŁOWSKI

*Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii
ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, email: elekp@elektron.pol.lublin.pl*

Streszczenie. Szybka transformata Fouriera (FFT) jest cennym i często stosowanym w technice pomiarowej narzędziem analizy sygnałów. W referacie przedstawia się problematykę analizy częstotliwościowej w przypadku, gdy zmienna w czasie wielkość mierzona jest przetwarzana na zmienną w czasie częstotliwość, tzn. gdy chwilowe wartości częstotliwości reprezentują wartości chwilowe mierzonej wielkości fizycznej.

Summary. The Fast Fourier Transform (FFT) is a powerful tools for analyzing signals in many measurement applications. This paper presents several problems of Fourier series analysis application in situation, when the fluctuating values of a measurand are converted to a frequency signal, i.e. when instantaneous frequency represents instantaneous values of measured quantity.

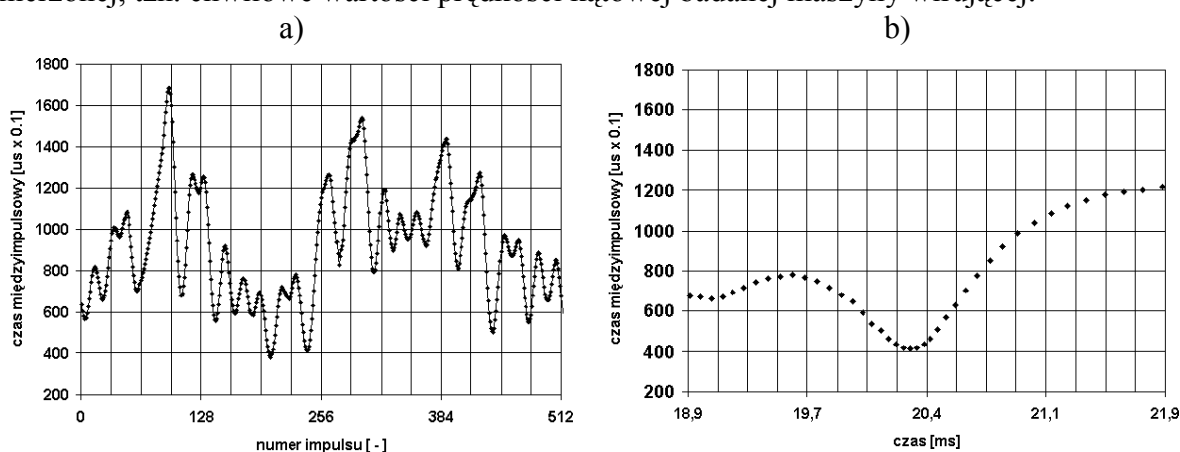
1. Wstęp

Częstotliwość impulsowego sygnału wyjściowego inkrementalnego przetwornika obrotowo - impulsowego jest proporcjonalna do prędkości obrotowej sprzęgniętej z nim maszyny wirującej. W stanie ustalonym cyfrowy pomiar tej częstotliwości oraz dalsze cyfrowe przetwarzanie uzyskanych danych są możliwe za pomocą wielu znanych algorytmów [1]. Jeśli jednak badana maszyna wirująca znajduje się w stanie nieustalonym, to częstotliwość sygnału wyjściowego z przetwornika jest zmienna w czasie i wyznaczenie wartości chwilowych prędkości obrotowej na podstawie chwilowych wartości częstotliwości sygnału impulsowego stanowi w takim przypadku istotny problem. Pomiar wartości chwilowej częstotliwości zmiennej w czasie wymaga bowiem zastosowania odpowiednich układów i algorytmów pomiarowych [2]. Zagadnienie dodatkowo komplikuje się, gdy konieczne jest zrealizowanie cyfrowych algorytmów przetwarzania sygnałów, takich jak filtrowanie cyfrowe i analiza częstotliwościowa za pomocą FFT, które opracowano przy założeniu, że próbki przetwarzanego sygnału są rozmieszczone równomiernie w czasie, tzn. że odstępy czasu pomiędzy wszystkimi kolejnymi próbkami są jednakowe [3]. To podstawowe założenie nie może być w rozpatrywanym przypadku spełnione, gdyż przy zmieniającej się prędkości obrotowej kolejne wartości wyjściowego sygnału częstotliwościowego przetwornika obrotowo – impulsowego, wyznaczone jako odwrotności z kolejnych jego okresów, w naturalny sposób są rozmieszczone nierównomiernie w czasie. Tym samym znane algorytmy DSP zakładające równomierne w czasie próbkowanie przetwarzanego sygnału nie mogą być w rozpatrywanym przypadku wprost zastosowane. W referacie przedstawiono przykład praktycznego wykorzystania algorytmu resamplingu [4], [5] umożliwiającego uzyskanie z sygnału wyjściowego przetwornika obrotowo-impulsowego ciągu próbek rozmieszczonych równomiernie w czasie i przeprowadzenie analizy widmowej za pomocą transformaty FFT.

2. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy umożliwiający zrealizowanie przedstawionych we wstępie zadań powinien zapewniać pomiar chwilowych wartości częstotliwości sygnału wyjściowego przetwornika obrotowo – impulsowego. Pomiar częstotliwości chwilowej sygnału, rozumianej jako pochodna fazy sygnału względem czasu [2], wymaga wyznaczenia stosunku przyrostu fazy sygnału do odpowiadającego mu przyrostu czasu. Dla sygnału impulsowego najmniejszym możliwym do wyznaczenia przyrostem fazy jest jeden okres, można więc jedynie zmierzyć częstotliwość uśrednioną za czas równy co najmniej jednemu okresowi sygnału lub jego wielokrotność. W celu uniknięcia pewnych niekonsekwencji pojęciowych dla sygnałów o zmiennej częstotliwości, w miejsce okresu sygnału impulsowego stosowane będzie w dalszej części sformułowanie czas międzyimpulsowy.

Zbudowane stanowisko pomiarowe bazuje na repulsyjnym silniku małej mocy. Silnik repulsyjny jest komutatorowym silnikiem prądu przemiennego z możliwością regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę kąta położenia szczotek. Charakteryzuje się stosunkowo dużą nierównomiernością obrotów, co jest korzystnym efektem w badanych zagadnieniach. Z silnikiem sprzęgnięty jest inkrementalny przetwornik obrotowo – impulsowy generujący 512 impulsów na jeden obrót wału silnika. Do pomiaru częstotliwości zastosowano kartę pomiarową CTM-PER firmy KEITHLEY [6] współpracującą z komputerem klasy IBM PC. Karta CTM-PER zawiera 28 bitowy licznik zliczający wzorcowy sygnał zegarowy 10 MHz, współpracujący z pamięcią FIFO zapewniającą bezkolizyjny odczyt licznika “w locie” i transfer wyników do pamięci komputera. Zastosowanie tej karty umożliwia pomiar czasu międzyimpulsowego zakresie od 0.1 ms do 26.8 s i zgromadzenie w pamięci komputera zadanej liczby wyników pomiarów. Na potrzeby przeprowadzonych badań rejestrowano rekordy danych zawierające każdorazowo 512 wyników pomiarów czasu międzyimpulsowego, a więc odpowiadające jednemu obrotowi wału maszyny wirującej. Na rys.1 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów czasu międzyimpulsowego w funkcji numeru impulsu (a) oraz w funkcji czasu (b). Przebieg przedstawiony na rys.1.b ilustruje nierównomierne w czasie rozmieszczenie wyników pomiaru. Przedstawiony w kolejnym punkcie algorytm ma za zadanie ze zgromadzonych wyników pomiarów czasu międzyimpulsowego odtworzyć równomiernie rozmieszczone w czasie wartości wielkości mierzonej, tzn. chwilowe wartości prędkości kątowej badanej maszyny wirującej.



Rys.1. Wyniki pomiarów czasu międzyimpulsowego za jeden obrót wału: a) w funkcji numeru impulsu, b) w funkcji czasu - fragment obejmujący 41 impulsów (od 220 do 260 impulsu)

3. Algorytm przetwarzania danych pomiarowych

Zarejestrowany w omówionym powyżej układzie pomiarowym sygnał, przedstawiony na rys.1, reprezentowany jest przez N -elementowy ciąg liczbowy (1), którego kolejne wartości $T(n)$ są równe zmierzonym przedziałom czasu pomiędzy kolejnymi impulsami wyjściowymi przetwornika obrotowo-impulsowego, czyli kolejnym czasom międzyimpulsowym.

$$\{T(n)\}, \quad n = 1, \dots, N \quad (1)$$

W rozpatrywanym przykładzie za jeden pełny obrót wału silnika zarejestrowano w prezentowanym przykładzie $N=512$ wartości czasu międzyimpulsowego $T(n)$, przedstawionych na rys.1.a. Kolejne wartości $T(n)$ nie są równomiernie rozmieszczone w czasie (rys1.b), gdyż są one uzyskiwane z pomiarów w kolejnych chwilach czasu $t(n)$, określonych przez chwilę początkową t_0 rozpoczęcia pomiarów i odpowiednią sumę dotychczasowych wartości $T(n)$:

$$t(n) = t_0 + \sum_{i=1}^n T(i) \quad (2)$$

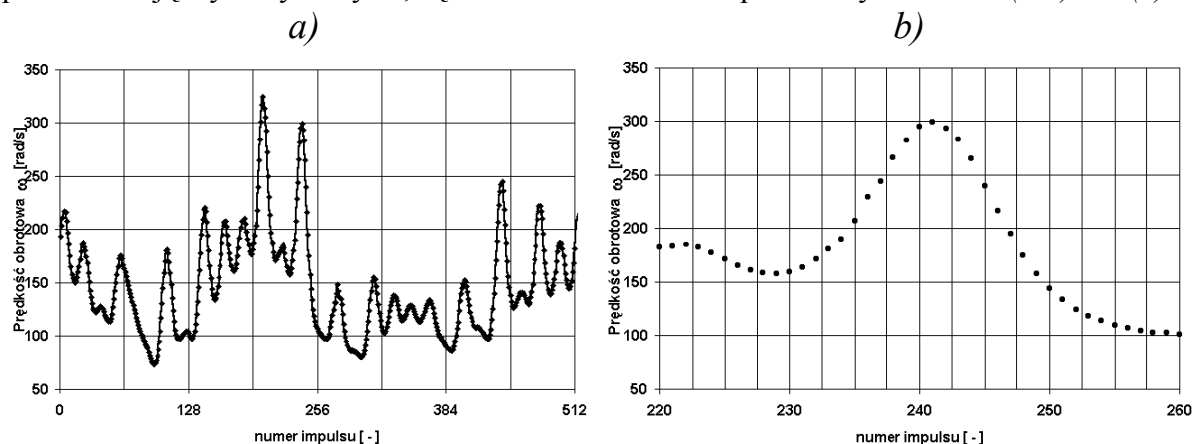
Całkowity czas T_p trwania pomiarów i rejestracji N wartości czasu międzyimpulsowego $T(n)$ jest równy:

$$T_p = \sum_{i=1}^N T(i) \quad (3)$$

Kolejne wartości czasu międzyimpulsowego $T(n)$ uzyskiwane z pomiarów kartą CTM-PER w kolejnych chwilach $t(n)$ reprezentują kolejne wartości prędkości kątowej $\omega(n)$ badanego silnika. Dla przetwornika generującego k impulsów na pełny obrót wału, prędkość kątowa $\omega(n)$ jest określona zależnością:

$$\omega(n) = \frac{2\pi}{k} \cdot \frac{1}{T(n)} \quad (4)$$

Wyznaczone na podstawie zależności (4) kolejne wartości prędkości kątowej $\omega(n)$ przedstawiają wykresy na rys.2, są to wartości średnie za przedziały czasu od $t(n-1)$ do $t(n)$.



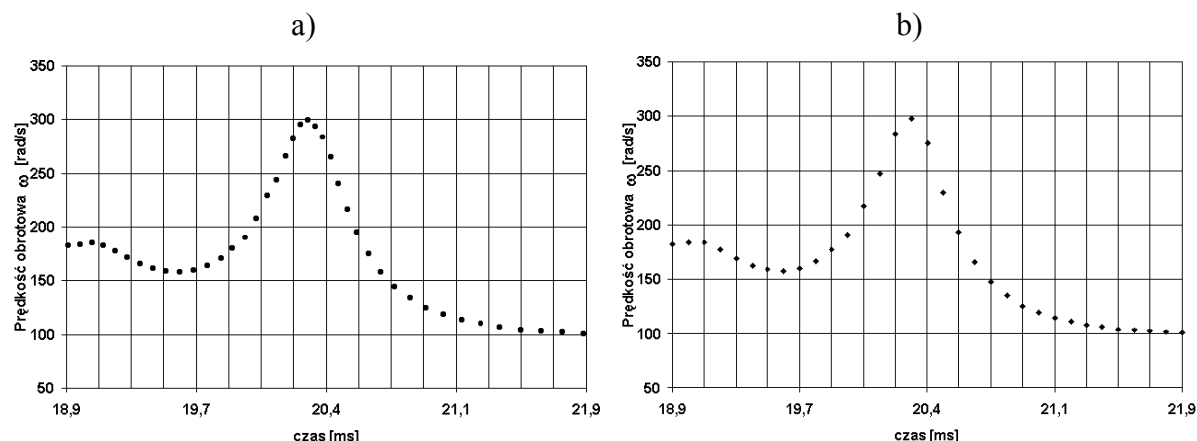
Rys.2. Wartości prędkości kątowej $\omega(n)$ w funkcji numeru impulsu, a) 512 wartości za jeden obrót wału, b) fragment obejmujący 41 impulsów odpowiadający punktom z rys.1.a

Ze względu na występujący w tej sytuacji błąd dynamiczny [7], konieczne jest przypisanie uzyskiwanych wartości $\omega(n)$ odpowiednio dobranym chwilom czasowym $t^*(n)$, przy czym w ogólności $t(n-1) \leq t^*(n) \leq t(n)$. Przyjęto, że uzasadnione jest przyjęcie chwil $t^*(n)$ leżących w połowie przedziału czasu od $t(n-1)$ do $t(n)$ [2], [7] :

$$t^*(n) = \frac{t(n-1) + t(n)}{2} = t_0 + \sum_{i=1}^{n-1} T(i) + \frac{1}{2} T(n) . \quad (5)$$

Obliczone według zależności (5) wartości $t^*(n)$ umożliwiają przedstawienie na rys.3.a prędkości kątowej $\omega(n)$ w funkcji czasu. Wykresy przedstawione na rys.2.b i 3.a obejmują ten sam zakres danych pomiarowych; przebieg zmienności $\omega(n)$ w funkcji numeru impulsu (kąta obrotu wału) i w funkcji czasu różnią się wyraźnie. Niestety, z oczywistych względów kolejne wartości $\omega(n)$, przedstawione na rys.3.a, nie są od siebie równo odległe w czasie. Dwie kolejne wartości $\omega(n-1)$ i $\omega(n)$ są od siebie odległe o czas $T^*(n)$:

$$T^*(n) = \frac{T(n-1) + T(n)}{2} . \quad (6)$$



Rys.3. Wartości prędkości kątowej funkcji czasu, a) 41 wartości $\omega(n)$ odpowiadających wykresowi z rys.2.b, b) próbki równomierne $\omega_R(m)$ uzyskane w wyniku resamplingu

W celu uzyskania wartości równomiernie rozmieszczonych w czasie należy przeprowadzić operację resamplingu [4], [5], która na podstawie ciągów wartości $\omega(n)$ i $t^*(n)$ wyznaczy M - elementowy ciąg wartości $\omega_R(m)$ (7), odległych od siebie o stały czas T_R .

$$\{\omega_R(m)\}, \quad m = 1, \dots, M \quad (7)$$

Liczba M i okres próbkowania równomiernego T_R muszą być dobrane tak, aby wartości $\omega(n)$ i $\omega_R(m)$ opisywały przetwarzany sygnał za ten sam czas pomiaru T_p :

$$T_R = \frac{T_p}{M-1} . \quad (8)$$

Zastosowany algorytm resamplingu polega na pobraniu M wartości $\omega_R(m)$ w chwilach czasowych $t_R^*(m)$ wyznaczonych zależnością (9), aproksymując sygnał linią prostą w przedziałach od $t^*(n-1)$ do $t^*(n)$ według reguły (10). Wartość pierwszą $\omega_R(1)$ i ostatnią $\omega_R(M)$ należy wyznaczyć ekstrapolując sygnał przed chwilą $t^*(1)$ i po chwili $t^*(N)$. Uzyskane

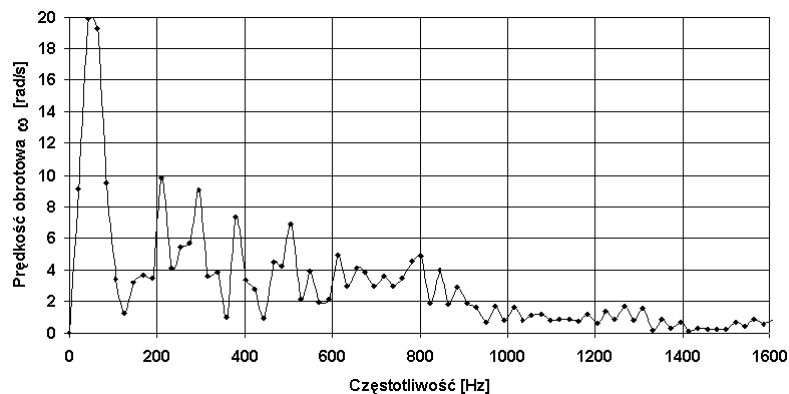
po resamplingu wartości $\omega_R(m)$ przedstawia wykres na rys.3.b, który przedstawia przetwarzany sygnał za ten sam przedział czasu co wykresy na rys.2.b i rys.3.a., ale próbki sygnału są tym razem rozmieszczone równomiernie w czasie.

$$t_R^*(m) = t_0 + (m-1)T_R \quad (9)$$

$$\omega_R(m) = \omega(n-1) + \frac{\omega(n) - \omega(n-1)}{t^*(n) - t^*(n-1)} \cdot (t_R^*(m) - t^*(n-1)), \quad t^*(n-1) \leq t_R^*(m) \leq t^*(n) \quad (10)$$

4. Uzyskane rezultaty

Przedstawiony algorytm resamplingu zrealizowano praktycznie, wszystkie wykresy przedstawione na rys.1-3 pochodzą z danych uzyskanych w rzeczywistym układzie pomiarowym przedstawionym w początkowej części referatu. Na uzyskanych próbkach sygnału równomiernie rozmieszczonych w czasie można zrealizować znane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów [3], co nie jest możliwe w stosunku do surowych danych uzyskiwanych z przetwornika obrotowo-impulsowego. Dla analizy nierównomierności ruchu obrotowego badanego silnika wyznaczono za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT widmo sygnału prędkości obrotowej, przedstawione na rys.4. Dla przejrzystości wykresu pominięto składową stałą o wartości 133 rad/s. Czas pomiaru T_p wynosił 47,3 ms i był równy czasowi trwania jednego obrotu wału silnika. Przyjęto jednakową liczbę próbek sygnału przed i po resamplingu $M=N=512$. Okres próbkowania równomiernego wyniósł w tym przypadku $T_R=92,6 \mu s$, co odpowiada szybkości próbkowania ok. 10800 próbek/s. Uzyskana rozdzielczość widma wyniosła 21 Hz. Widoczne są dominujące drżenia wału silnika z częstotliwością 50 Hz.



Rys.4. Widmo sygnału prędkości kątowej (bez składowej stałej) wyznaczone na podstawie próbek $\omega_R(m)$ przedstawionych na rys.3.b uzyskanych po zastosowaniu algorytmu resamplingu

5. Podsumowanie

Przedstawiony algorytm przetwarzania sygnału przetwornika obrotowo-impulsowego sprawdzono praktycznie w układzie rzeczywistym. Może być on zastosowany w tych wszystkich przypadkach, w których częstotliwość sygnału niesie informację o wartościach

chwilowych przetwarzanej wielkości fizycznej. Poza rozpatrywanymi w przedstawionej pracy badaniami ruchu obrotowego maszyn wirujących można wymienić tu: badania w stanach dynamicznych przetworników z wyjściem częstotliwościowym - w tym również generatorów sterowanych napięciem VCO, badania stabilności generatorów, pomiary stabilności częstotliwości sieci energetycznej itp. Optymalizacja przedstawionego algorytmu oraz ocena dokładności odtwarzania sygnału i jego widma z nierównomiernie pobranych próbek wymaga dalszych prac. W szczególności ważnym zagadnieniem jest przypisywanie uzyskanych z pomiarów wartości średnich odpowiednim chwilom czasowym, aproksymacja wartości sygnału pomiędzy próbkami właściwie dobraną funkcją oraz równomierny w czasie resampling odtwarzanego sygnału z odpowiednią częstotliwością. Korzystny może okazać się również resampling z nadpróbkowaniem sygnału, cyfrową filtracją dolnoprzepustową i decymacją próbek [8]. Istotnym zagadnieniem jest też ocena wpływu błędu kwantowania i błędu dynamicznego na dokładność odtwarzania sygnału i jego widma.

Bibliografia

- [1] **D.Świsulski, E.Pawłowski, P.Porzeziński: Metoda zliczania zależnego w pomiarach i rejestracji prędkości obrotowej**, Elektronizacja 1999, nr 11,12.
- [2] **J.R.Jasik., E.Pawłowski: Pomiary częstotliwości chwilowej sygnałów impulsowych**, Pomiary Automatyka Kontrola 1998, nr 2.
- [3] **A.V.Oppenheim, R.W.Schafer: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów**, WKiŁ, Warszawa 1979.
- [4] **E. Pawłowski: Analiza widmowa sygnałów pomiarowych w układach czujników z wyjściem częstotliwościowym**, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, seria: Konferencje, nr 2/2000, Konferencja Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2000, Gliwice – czerwiec 2000.
- [5] **E. Pawłowski: Analiza widmowa w systemach pomiarowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji**, Krajowy Kongres Metrologii KKM 2001, Warszawa 2001.
- [6] **CTM-PER Continous-Period Counter, User's Guide**; Keithley MetraByte Co. 1990.
- [7] **D.Świsulski: Błąd dynamiczny w torze pomiarowym z częstotliwościowym nośnikiem informacji**, Pomiary Automatyka Kontrola 2000, nr 2.
- [8] **R. G. Lyons: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów**, WKiŁ, Warszawa 1999.