

**Dariusz ŚWISULSKI, Eligiusz PAWŁOWSKI**POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin**Wpływ metody akwizycji sygnałów częstotliwościowych na dokładność pomiaru****Dr hab. inż. Dariusz ŚWISULSKI**

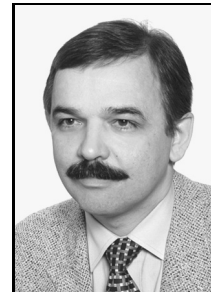
Profesor w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Autor lub współautor ponad stu pięćdziesięciu artykułów w czasopiśmie naukowych lub materiałach konferencyjnych oraz ponad dwudziestu wdrożeń w przemyśle. Obszar zainteresowań obejmuje metrologię, systemy pomiarowe, przetwarzanie sygnałów pomiarowych.



e-mail: d.swisulski@ely.pg.gda.pl

**Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI**

Adiunkt w Katedrze Automatyki i Metrologii na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Autor lub współautor ponad 60 publikacji w czasopiśmie naukowych oraz materiałach konferencyjnych. Obszar zainteresowań naukowych obejmuje metrologię wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, w szczególności pomiary częstotliwości i czasu, przetwarzanie sygnałów pomiarowych, systemy pomiarowe z częstotliwościowym nośnikiem informacji.



e-mail: e.pawlowski@pollub.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono metody przetwarzania impulsowego sygnału częstotliwościowego. Opisane metody pozwalają na odtworzenie wartości wielkości mierzonej w stałych odstępach czasu w trybie on-line i off-line. Przeprowadzono symulację pomiaru prędkości obrotowej przetwornikiem obrotowo-impulsowym, wyznaczając wartości błędu pomiaru i efektywnej liczby bitów. Wykazano mniejszą wartość błędu i większą wartość efektywnej liczby bitów dla metody wykorzystującej dwa przedziały międzyimpulsowe.

**Słowa kluczowe:** akwizycja sygnałów, sygnał impulsowy modulowany częstotliwościowo.

**Effect of the method of frequency signal acquisition on the measurement accuracy****Abstract**

Methods for processing a frequency-modulated pulse signal are presented in this paper. The methods allow acquiring information about the frequency of a pulse signal with constant sampling frequency. These methods, depending on the time instant for which the measurement result is determined, can be divided into two groups. In measurements on-line the measured value is determined based only on the position of pulses preceding the moment of measurement. The method in which the measured value is determined from the last period and that in which the measured value is determined from extrapolation of two last periods (Fig. 1) are described. In measurements off-line, first there is saved the location of all pulses in the time of recording, and after there is determined the value measured in the assumed moments of the measurement. Therefore, in this case the measured value is determined not only by the position of pulses before the moment of measurement, but also those occurring after this time. The method in which the measured value is determined from the current period and that in which the measured value is determined from interpolation of two periods (Fig. 2) are described in the paper. The accuracy of conversion is determined by a relative error or the number of bits, and thus by the resolution. The noise added to the useful signal has a significant impact on the processing accuracy in real measurements. Therefore the ENOB (Effective Number of Bits), the number of digital signal bits above the noise, is more useful than the resolution. The paper presents examples of simulation results for speed measurements (Tables 1, 2). As it can be seen from the results, increase in the standard generator frequency allows increasing the effective number of bits only to a certain limit. Further increase in the frequency does not increase the ENOB value due to the noise being a result of the method used.

**Keywords:** signal acquisition, pulse frequency modulation signal.

**1. Wstęp**

W technice pomiarowej, przy przetwarzaniu dowolnej wielkości na postać cyfrową, często jako sygnały pośrednie wykorzystywane są sygnały impulsowe modulowane częstotliwościowo [1, 2]. Sygnał częstotliwościowy jako sygnał pośredni jest stosowany chętnie ze względu na prosty sposób przetwarzania na postać

cyfrową i małą wrażliwość na zakłócenia np. przy przesyłaniu na większe odległości.

Istotny problem występuje, gdy przetwarzana wielkość zmienia się w czasie, powodując zmianę częstotliwości impulsowego sygnału pośredniego (kolejne impulsy sygnału częstotliwościowego na wyjściu czujnika generowane są z różnym odstępem czasu, zależnym od średniej wartości wielkości wejściowej w czasie od poprzedniego impulsu [3]). Uzyskanie w torze częstotliwościowym próbek sygnału rozmieszczonych równomiernie w określonych chwilach czasu, czego wymagają często stosowane współcześnie algorytmy DSP, wymusza zastosowania specjalnych metod przetwarzania. Celem pracy jest porównanie dokładności różnych metod takiego przetwarzania.

**2. Metody przetwarzania impulsowego sygnału częstotliwościowego**

W torze pomiarowym z impulsowym sygnałem częstotliwościowym odstęp czasu pomiędzy kolejnymi impulsami zmieniają się zależnie od wartości średniej wielkości przetwarzanej w systemie, w czasie od poprzedniego impulsu. Uzyskanie ciągu próbek sygnału w torze częstotliwościowym, położonych w określonych chwilach czasu rozmieszczonych równomiernie wymaga zastosowania specjalnej metody.

Metody przetwarzania sygnału impulsowego, w zależności od chwili, dla której wyznaczany jest wynik pomiaru, można podzielić na dwie grupy [2]. W pomiarach w trybie on-line wartość zmierzona wyznaczana jest tylko na podstawie położenia impulsów poprzedzających chwilę pomiaru.

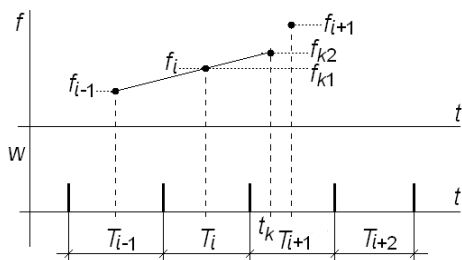
Przy pomiarze w trybie off-line, najpierw zapamiętuje się położenie wszystkich impulsów w czasie rejestracji, a po zakończonym pomiarze wyznacza wartość zmierzona w przyjętych chwilach pomiaru. Dlatego w tym przypadku wartość zmierzona wyznaczana jest nie tylko na podstawie położenia impulsów poprzedzających chwilę pomiaru, ale również występujących po tej chwili.

Najprostszym sposobem rejestracji sygnału impulsowego on-line polega na tym, że wartość tego sygnału w dowolnej chwili  $t_k$  obliczana jest na podstawie długości ostatniego przedziału międzyimpulsowego  $T_i$  poprzedzającego chwilę  $t_k$  (wartość  $f_{ki}$  na rysunku 1) [4].

Jeżeli wartości mierzonego sygnału zmieniają się w czasie pomiaru, w wyniku czego zmieniają się też odstęp czasu między impulsami, przy dłuższym okresie sygnału impulsowego, a w rezultacie dłuższym czasie między zakończeniem okresu  $T_i$  i chwilą  $t_k$ , wartość uzyskana z pomiaru może znacząco się różnić od wartości w chwili próbkowania.

Dlatego w przypadku zmian wielkości mierzonej, wartość w dowolnej chwili  $t_k$  można wyznaczyć dokładniej na podstawie ekstrapolacji z dwóch sąsiednich przedziałów międzyimpulsowych  $T_{i-1}$  i  $T_i$  poprzedzających chwilę  $t_k$ , przy założeniu liniowej zmiany częstotliwości oraz założeniu, że wartość częstotliwości  $f_i$

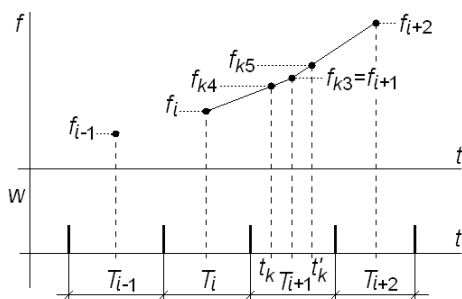
uzyskana z pomiaru przedziału  $T_i$  jest równa chwilowej wartości częstotliwości w środkowym punkcie tego przedziału (wartość  $f_{k2}$  na rysunku 1) [4, 5].



Rys. 1. Pomiar częstotliwości w trybie on-line  
Fig. 1. Frequency measurement in on-line mode

W trybie off-line, najpierw rejestrujemy położenie impulsów, a dopiero po zakończeniu rejestracji wyznaczamy wartości wielkości mierzonej w zadanych chwilach próbkowania. Dlatego do wyznaczenia wartości mierzonej z przebiegu impulsowego w dowolnej chwili  $t_k$  można wykorzystać nie tylko położenie impulsów poprzedzających chwilę  $t_k$ , ale również impulsów po niej występujących.

Najprostszą realizacją metody w trybie off-line jest obliczenie wartości mierzonej tylko z przedziału międzyimpulsowego, w którym znajduje się chwila  $t_k$ , czyli z położenia impulsu poprzedzającego tę chwilę i następującego po tej chwili. Wartość w dowolnej chwili  $t_k$  leżącej w przedziale czasu pomiędzy dwoma sąsiednimi impulsami przyjmowana jest jako wartość średnia przetwarzanego sygnału w tym przedziale czasu. Wartość średnia w dowolnej chwili w czasie przedziału  $T_{i+1}$  jest przyjmowana jako równa wartości chwilowej w środku tego przedziału, a więc:  $f_{k3} = f_{i+1}$  (rys. 2).



Rys. 2. Pomiar częstotliwości w trybie off-line  
Fig. 2. Frequency measurement in off-line mode

Jeżeli wielkość mierzona zmienia się w czasie pomiaru, lepszym rozwiązaniem jest wyznaczenie wartości częstotliwości z dwóch sąsiednich przedziałów międzyimpulsowych, przy założeniu liniowej zmiany częstotliwości [4, 6]. Przy takim założeniu można wykazać, że wartość częstotliwości  $f_i$  uzyskana z pomiaru przedziału  $T_i$  jest równa chwilowej wartości częstotliwości w środkowym punkcie tego przedziału [5].

W zależności od położenia chwili, dla której wyznaczamy wartość częstotliwości, otrzymujemy  $f_{k4}$  z przedziałów  $T_i$  i  $T_{i+1}$  dla chwili  $t_k$  (gdy  $t_k$  wypada w pierwszej połowie przedziału  $T_{i+1}$ ) lub  $f_{k5}$  z przedziałów  $T_{i+1}$  i  $T_{i+2}$  dla chwili  $t_k'$  (gdy  $t_k'$  wypada w drugiej połowie przedziału  $T_{i+1}$ ) (rys. 2) [4].

### 3. Błąd i rozdzielczość przetwarzania

Dokładność przetwarzania analogowo-cyfrowego można określić m.in. przez błąd przetwornika oraz przez liczbę bitów, a więc przez jego rozdzielczość.

Błąd względny wartości  $f_k$  uzyskanej z pomiaru dla chwili  $t_k$  można obliczyć jako względną różnicę między wartością uzyskaną z pomiaru i wartością rzeczywistą  $f_{kr}$  w chwili  $t_k$ :

$$\delta_f = \frac{f_k - f_{kr}}{f_{kr}} \quad (1)$$

Dla kanałów pomiarowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji, ze względu na wykorzystanie licznika jako przetwornika wielkości analogowej na cyfrową, rozdzielczość zależy od czasu pomiaru i częstotliwości wzorcowej, jeśli tylko zastosowano licznik o wystarczająco dużej pojemności. Dobierając odpowiednio pojemność licznika i częstotliwość wzorcową [5] można w prosty sposób uzyskać przetwornik o rozdzielczości 16 bitów lub większej, co przy zastosowaniu przetwornika a/c może nastroczać trudności.

W pomiarach rzeczywistych znaczący wpływ na dokładność przetwarzania ma poziom szumów dodających się w torze pomiarowym do sygnału użytecznego. Dlatego wiarygodniejszą miarą dokładności przetwarzania jest tzw. efektywna liczba bitów ENOB (ang. *Effective Number of Bits*), określająca uzyskiwaną w torze pomiarowym rozdzielczość na podstawie stosunku sygnału użytecznego do poziomu szumów SNR na jego wyjściu [5]:

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SNR}_{\text{dB}} - 1,76}{6,02} \quad (2)$$

W praktyce zamiast SNR wykorzystuje się współczynnik SINAD, jako stosunek sygnału do szumu i zniekształceń (ang. *Signal to Noise and Distortion Ratio*).

Zależność (2) może być wykorzystana do pomiaru efektywnej liczby bitów w układzie próbkującym badany sygnał z częstotliwością  $f_s$ . Z bloku zapamiętanych próbek obliczane jest widmo częstotliwościowe sygnału wejściowego przetwornika, na podstawie tego widma wyznaczany jest stosunek sygnału do szumu i zniekształceń SINAD, a z niego efektywna liczba bitów ENOB [5].

Klasyczna metoda rejestracji sygnałów impulsowych modulowanych częstotliwościowo, polegająca na zliczaniu impulsów z generatora wzorcowego w czasie między impulsami sygnału zmodulowanego, ze względu na zmienny czas międzyimpulsowy (próbkowanie nierównomierne) nie pozwala na obliczanie FFT [3], a w rezultacie na bezpośrednie wyznaczenie efektywnej liczby bitów.

Takiego problemu nie ma przy zastosowaniu przedstawionych metod, w których mierzona wartość odtwarzana jest dla założonych chwil próbkowania na podstawie długości pojedynczego przedziału międzyimpulsowego lub dwóch sąsiednich przedziałów międzyimpulsowych.

### 4. Przykładowa symulacja

Jako przykład opracowano symulację pomiaru prędkości obrotowej z wykorzystaniem przetwornika obrotowo-impulsowego (enkodera inkrementalnego) o  $C_e$  impulsach przy każdym obrocie [7, 8].

Założono, że pomiar wykonywany jest przez zliczanie w odstępach między rosnącymi zboczami sygnału z przetwornika okresowy sygnał z generatora wzorcowego o częstotliwości  $f_g$  [9].

Otrzymane wyniki przeliczane są według przedstawionych metod w celu uzyskania wartości prędkości obrotowej w stałych odstępach czasu.

Położenie  $t_i$  kolejnego zbocza sygnału z przetwornika obrotowo-impulsowego można wyznaczyć jako czas od poprzedniego zbocza  $t_{i-1}$ , z zależności na średnią prędkość między chwilami  $t_{i-1}$  i  $t_i$ , która jest równa stosunkowi pokonanego w tym czasie kąta do tego czasu. Tarcza przetwornika obrotowo-impulsowego w czasie między dwoma zboczami obraca się o  $1/C_e$  obrotu. Stąd otrzymujemy równanie:

$$\frac{1}{t_i - t_{i-1}} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \omega(t) dt = \frac{1}{C_e} \quad (3)$$

Podstawiając w miejsce  $\omega(t)$  funkcję, według której następuje zmiana prędkości obrotowej, po przekształceniach otrzymujemy położenie impulsu  $t_i$ .

Jeżeli mierzona prędkość zmienia się zgodnie z funkcją sinusoidalną:

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_m \sin(2\pi f_p t) \quad (4)$$

gdzie na stałą prędkość obrotową  $\omega_0$  nałożone są wahania prędkości o amplitudzie  $\omega_m$  i częstotliwości  $f_p$ , po przekształceniu zależności (3) i (4) otrzymujemy równanie:

$$\omega_0 t_i - \omega_0 t_{i-1} + \frac{\omega_m \cos(2\pi f_p t_{i-1})}{2\pi f_p} - \frac{\omega_m \cos(2\pi f_p t_i)}{2\pi f_p} - \frac{1}{C_e} = 0 \quad (5)$$

Z równania (5) można wyznaczyć chwile, w których pojawia się zbocza sygnału na wyjściu przetwornika obrotowo-impulsowego.

Zakładając położenie pierwszego zbocza w chwili  $t=0$ , z (5) wyznaczamy położenie następnego zbocza  $t_i$ , które przy kolejnym obliczeniu traktowane jest jako położenie poprzednie  $t_{i-1}$ .

Załóżmy, że wartość składowej stałej prędkości obrotowej wynosi  $\omega_0 = 10$  obr/s, amplituda składowej przemiennej  $\omega_m = 2$  obr/s i jej częstotliwość  $f_p = 50$  Hz.

## 5. Wyniki symulacji

W tabeli 1 i 2 przedstawiono maksymalną wartość błędu względnego  $\delta_{\max}$  oraz wartości SINAD i ENOB dla założonych parametrów pomiaru i częstotliwości generatora wzorcowego  $f_g = 2, 5, 10, 20, 50, 100$  i  $200$  MHz oraz dla  $C_e = 500$ . Tabela 1 zawiera wyniki symulacji pomiaru w trybie on-line, natomiast tabela 2 w trybie off-line.

Tab. 1. Wyniki symulacji w trybie on-line  
Tab. 1. Results of simulation in on-line mode

$f_g$ MHz	pomiar on-line					
	1 okres $T_i$			2 okresy $T_{i+1}$ i $T_i$		
	$\delta_{\max}$ %	SINAD dB	ENOB b	$\delta_{\max}$ %	SINAD dB	ENOB b
2	2,2	34	5,3	1,0	34	5,4
5	2,1	34	5,4	0,42	41	6,5
10	2,0	34	5,4	0,31	47	7,5
20	2,0	34	5,4	0,28	51	8,1
50	2,0	34	5,4	0,29	52	8,4
100	2,0	34	5,4	0,28	53	8,5
200	2,0	34	5,4	0,29	53	8,5

Tab. 2. Wyniki symulacji w trybie off-line  
Tab. 2. Results of simulation in off-line mode

$f_g$ MHz	pomiar off-line					
	1 okres $T_{i+1}$			2 okresy $T_i$ i $T_{i+1}$ lub $T_{i+1}$ i $T_{i+2}$		
	$\delta_{\max}$ %	SINAD dB	ENOB b	$\delta_{\max}$ %	SINAD dB	ENOB b
2	0,83	34	5,4	0,24	46	7,3
5	0,70	35	5,5	0,096	53	8,5
10	0,67	35	5,5	0,049	59	9,5
20	0,65	35	5,5	0,030	65	10
50	0,65	35	5,5	0,029	69	11
100	0,64	35	5,5	0,027	73	12
200	0,64	35	5,5	0,028	72	12

Jak wynika z przedstawionych wyników symulacji, zarówno przy pomiarze w trybie on-line, jak i trybie off-line, mniejszą wartość błędu i większą wartość efektywnej liczby bitów ENOB uzyskujemy dla metody, w której wynik wyznaczany jest z dwóch okresów.

Zwiększanie częstotliwości generatora wzorcowego pozwala na zmniejszenie błędu i zwiększenie ENOB przy pomiarze z wykorzystaniem dwóch okresów, i to tylko do pewnej częstotliwości, powyżej której dalsze zwiększanie  $f_g$  nie poprawia dokładności. Przy pomiarze z wykorzystaniem jednego okresu, ze względu na wpływ innych składowych błędów, składowa wynikająca z rozdzielczości, związana z częstotliwością generatora wzorcowego jest mniej znacząca.

Zastąpienie pomiarów w trybie on-line pomiarem w trybie off-line pozwala na znaczne zmniejszenie błędów, a w metodzie wykorzystującej dwa okresy pozwala na zwiększenie efektywnej liczby bitów. Wpływ trybu pomiaru na ENOB przy pomiarze metodą wykorzystującą pojedynczy okres jest już mniej znaczący. Wynika to z tego, że w obu trybach zawartość zakłóceń wynikających z metody pomiaru jest zbliżona. Ponieważ przebieg odtworzony w trybie on-line jest dodatkowo opóźniony w porównaniu z trybem off-line, wartości błędów są większe.

## 6. Podsumowanie

Z przedstawionej w artykule analizy metod akwizycji sygnału impulsowego w stałych odstępach próbkowania wynika, że wybór metody uzależniony jest od trybu pomiaru (on-line lub off-line). W obu trybach można wykorzystywać prostą metodę, w której wynik pomiaru wyznaczany jest na podstawie pojedynczego przedziału międzyimpulsowego, a także metodę wykorzystującą dwa okresy i ekstrapolację (on-line) lub interpolację (off-line). Wybór metody wpływa na wartość błędów oraz rozdzielczość określaną efektywną liczbą bitów.

## 7. Literatura

- [1] Kirianaki N. V., Yurish S. Y., Shpak N. O., Denega V. P.: Data acquisition and signal processing for smart sensors. John Wiley & Sons, Ltd, Baffins Lane 2002.
- [2] Świsulski D.: Cyfrowa rejestracja sygnałów impulsowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
- [3] Pawłowski E.: Spectrum analysis of measuring signals in sensor circuits with frequency outputs, Proc. SPIE 4516, Optoelectronic and Electronic Sensors IV, 181 (August 8, 2001); doi:10.1117/12.435920; http://dx.doi.org/10.1117/12.435920.
- [4] Świsulski D.: Metody równoczesnej akwizycji w systemach z napięciowymi i częstotliwościowymi torami pomiarowymi. Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 NR 10a/2012, s. 29-31.
- [5] Pawłowski E.: Rozdzielczość toru pomiarowego z równomiernym próbkowaniem sygnału częstotliwościowego, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 58, nr 11/2012, s. 937-940.
- [6] Świsulski D.: Wielokanałowa akwizycja z torami pomiarowymi z napięciowym i częstotliwościowym nośnikiem informacji. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 6/2006, s. 27-29.
- [7] Świsulski D.: Parametry akwizycji w systemach z napięciowymi i częstotliwościowymi torami pomiarowymi. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka. R. LVII, nr 3(219)/2011, s. 41-52.
- [8] Merry R.J.E., van de Molengraaf M.J.G., Steinbuch M.: Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders, Mechatronics, Volume 20, Issue 1, February 2010, s. 20-26.
- [9] Pawłowski E.: Symulacja sygnału czujnika z wyjściem częstotliwościowym, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, nr 10b/2012, str. 78-81.

otrzymano / received: 29.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper