

**Dariusz ŚWISULSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

## Problemy opóźnień wynikających z czasu obliczeń w cyfrowym przetwarzaniu napięcie częstotliwość

Dr hab. inż. Dariusz ŚWISULSKI

Adiunkt w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Autor lub współautor ponad stu artykułów w czasopiśmie naukowych lub materiałach konferencyjnych oraz ponad dwudziestu wdrożeń w przemyśle. Autor i współautor dwóch książek z serii „Komputerowa Technika Pomiarowa” wydanych przez Agencję Wydawniczą PAK. Obszar zainteresowań obejmuje metrologię, systemy pomiarowe, przetwarzanie sygnałów pomiarowych.



e-mail: dswis@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono rozwiązanie cyfrowego przetwornika napięcie-częstotliwość. Opisano algorytm działania przetwornika, w którym odstęp między impulsami sygnału częstotliwościowego wyznaczany jest z ekstrapolacji z dwóch próbek napięcia (pierwszej i drugiej, pierwszej i ostatniej lub przedostatniej i ostatniej). Porównano błędy przetwornika dla opisanych metod. Przedstawiono problem zwiększenia wartości błędów w wyniku opóźnień związanych z czasem obliczeń. Zaproponowano modyfikację metody pozwalającą na eliminację tych błędów.

**Słowa kluczowe:** przetwornik napięcie-częstotliwość.

### Problems with delay due to time calculation in digital voltage-to-frequency conversion

#### Abstract

The paper presents solution of digital voltage-to-frequency converter. Algorithm of the converter has been described. The time interval between pulses is calculated from two voltage samples (first and second, first and last or last but one and last). A comparison of errors for described methods has been made. Problems with increase of error due to delay of time calculation have been described. Modification of the method for elimination this error is presented.

**Keywords:** voltage-to-frequency converter.

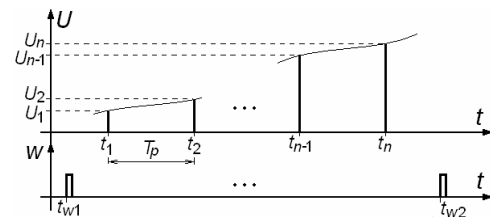
## 1. Wstęp

W artykule [1] przedstawiono koncepcję cyfrowego przetwornika napięcie-częstotliwość jako alternatywę dla analogowych przetworników napięcia wykonanych w postaci układów scalonych (np. firmy Analog Devices [2]). Jego budowa opiera się na zastąpieniu układów analogowych przez procesor wyznaczający chwile, w których zostają wygenerowane impulsy wyjściowe. W układach analogowych reakcja na zmianę sygnału wejściowego może nastąpić po jednym lub większej liczbie okresów sygnału impulsowego. W przedstawionej realizacji cyfrowej reakcja na zmiany sygnału wejściowego występuje już w bieżącym okresie sygnału impulsowego. Inną zaletą jest możliwość dowolnego kształtowania charakterystyki przetwornika, łatwość zmiany stałej przetwarzania, czy wprowadzenie linearyzacji. Układ taki pozwala również na pracę w trybie symulacji, zarówno ze stałą, jak i zmienną częstotliwością sygnału wyjściowego. Pozwala to na testowanie działania wykorzystywanych układów pomiarowych cyfrowego przetwarzania sygnałów [3].

## 2. Zasada działania przetwornika

W skład przetwornika napięcie-częstotliwość wchodzi przetwornik analogowo-cyfrowy, próbkujący przetwarzany sygnał wejściowy, mikroprocesor wykonujący obliczenia oraz generator

impulsów. W przetworniku analogowo-cyfrowym otrzymane w wyniku próbkowania napięcie zostaje przypisane do odpowiedniego poziomu, na podstawie którego w procesie kodowania wyznaczana jest odpowiadająca mu liczba. Następnie w procesorze zostaje wyznaczone położenie kolejnego impulsu wyjściowego. Informacja ta przekazana zostaje do generatora impulsów, na wyjściu którego w odpowiedniej chwili zostaje wygenerowany impuls wyjściowy przetwornika.



Rys. 1. Przebiegi czasowe sygnałów w przetworniku  
Fig. 1. Timing charts of signals in converter

Chwila  $t_{w2}$ , w której na wyjściu zostaje wygenerowany impuls, zostaje wyznaczona na podstawie wartości napięć  $U_1, U_2, \dots, U_n$ , zmierzonych po ostatnim impulsie wyjściowym oraz chwili  $t_{w1}$ , w której został wygenerowany ostatni impuls na wyjściu przetwornika (rys. 1). Jeżeli chwila  $t_{w2}$  wypada po chwili, w której zostanie pobrana następna próbka napięcia ( $t_{w2} > t_n + T_p$ , gdzie  $t_n$  jest chwilą pobrania ostatniej próbki napięcia, a  $T_p = 1/f_p$  okresem próbkowania), to działanie programu zostaje wstrzymane do tego momentu, po którym wyznaczane jest nowe położenie impulsu wyjściowego. Jeżeli  $t_{w2} \leq t_n + T_p$ , to w chwili  $t_{w2}$  zostaje wygenerowany impuls wyjściowy z przetwornika. Po pobraniu kolejnej próbki napięcia cały proces jest powtarzany.

Chwila  $t_{w2}$  wyznaczana jest tak, by odległość między dwoma sąsiednimi impulsami wyjściowego sygnału impulsowego była proporcjonalna do średniej wartości wejściowego napięcia w czasie między tymi impulsami:

$$\frac{1}{t_{w2} - t_{w1}} = K \cdot U_{sr} \quad (1)$$

Chwila  $t_{w2}$  może zostać wyznaczona różnymi metodami. W artykule [4] przedstawione zostały trzy metody: obliczenie na podstawie pojedynczej próbki napięcia, obliczenie z ekstrapolacji na podstawie dwóch próbek napięcia, wykorzystanie średniej wartości próbek napięcia od ostatniego impulsu. Wykonana analiza wykazała, że dla małych częstotliwości sygnału mierzonego i większych częstotliwości sygnału wyjściowego mniejsze błędy daje metoda polegająca na ekstrapolacji z dwóch próbek napięcia. Dlatego w tej publikacji ograniczono się do tej metody.

## 3. Wybór próbek do obliczeń

W metodzie wykorzystującej do wyznaczenia chwili  $t_{w2}$  dwie próbki napięcia  $U_a$  i  $U_b$  oraz informację o ich położeniu, wartość napięcia  $U'$  w środkowym punkcie między impulsami w chwilach  $t_{w1}$  i  $t_{w2}$  obliczana jest z ekstrapolacji przy założeniu liniowej zmiany sygnału wejściowego:

$$U' = U_a + (U_b - U_a) \cdot \frac{t_{w1} + t_{w2} - 2t_a}{2(t_b - t_a)} \quad (2)$$

Chwilę  $t_{w2}$  można obliczyć z równania kwadratowego, uzyskano po podstawieniu do równania (1) w miejsce  $U_{sr}$  zależności na  $U'$  z wzoru (2) i jego przekształceniu:

$$K(U_b - U_a)t_{w2}^2 + 2K(U_a t_b - U_b t_a)t_{w2} + K \cdot t_{w1}[2U_b t_a - 2U_a t_b - (U_b - U_a)t_{w1}] - 2(t_b - t_a) = 0 \quad (3)$$

Równanie (3) ma dwa rozwiązania, z których wykorzystane zostaje drugie (pierwsze ma wartość ujemną):

$$t_{w2} = \frac{-2K(U_a t_b - U_b t_a) + \sqrt{\Delta}}{2K(U_b - U_a)} \quad (4)$$

gdzie:

$$\Delta = 4K^2(U_a t_b - U_b t_a)^2 - 4K^2 \cdot t_{w1}(U_b - U_a)(2U_b t_a - 2U_a t_b) + 4K^2(U_b - U_a)^2 t_{w1}^2 + 8K(U_b - U_a)(t_b - t_a) \quad (5)$$

Przy większej liczbie próbek pobranych w czasie od ostatniego impulsu w chwili  $t_{w1}$  (rys. 1), do obliczeń można wykorzystać próbki: dwie pierwsze po chwili  $t_{w1}$  ( $t_a = t_1$ ,  $t_b = t_2$ ), pierwszą i ostatnią ( $t_a = t_1$ ,  $t_b = t_n$ ), dwie ostatnie ( $t_a = t_{n-1}$ ,  $t_b = t_n$ ).

Przedstawione metody wyznaczenia chwili  $t_{w2}$  zostaną porównane przy założeniu sinusoidalnej zmiany napięcia wejściowego przetwornika, dla fazy początkowej równej 0:

$$u(t) = U_0 + U_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t) \quad (6)$$

Błąd względny metody wyznaczany jest jako:

$$\delta = \frac{U_{sr1} - U_{sr}}{U_{sr}} \quad (7)$$

gdzie  $U_{sr1}$  jest średnią wartością napięcia między impulsami sygnału wyjściowego  $t_{w1}$  i  $t_{w2}$ , odtworzoną na podstawie długości przedziału międzyimpulsowego dla danej metody:

$$U_{sr1} = \frac{1}{K(t_{w2} - t_{w1})} \quad (8)$$

a  $U_{sr}$  jest wartością średnią napięcia wejściowego przetwornika między chwilami  $t_{w1}$  i  $t_{w2}$ :

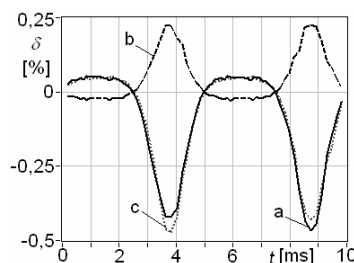
$$U_{sr} = \frac{1}{t_{w2} - t_{w1}} \int_{t_{w1}}^{t_{w2}} (U_0 + U_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)) dt = U_0 + \frac{U_{max} T_s (\cos(2\pi f_s t_{w1}) - \cos(2\pi f_s t_{w2}))}{2\pi(t_{w2} - t_{w1})} \quad (9)$$

Błędy przetwornika w funkcji czasu przy sinusoidalnym napięciu wejściowym, dla  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ , przy częstotliwości próbkowania sygnału wejściowego  $f_p=100kHz$  oraz dla  $K=0,0025Hz/V$  są przedstawione na rys. 2. Przebieg a został sporządzony dla metody wykorzystującej dwie ostatnie próbki napięcia, przebieg b dla metody wykorzystującej próbkę pierwszą i ostatnią, przebieg c dla metody z pierwszą i drugą próbką.

Jak widać z wykresu, wykorzystanie dwóch sąsiednich próbek, bez względu na ich położenie, daje zbliżone wartości błędów. Mniejsze błędy występują w sytuacji, gdy jedna z próbek będzie na początku przedziału czasowego, druga na końcu.

Analiza błędów w funkcji czasu jest niewygodna, dlatego dla danych warunków pomiaru został wyznaczony błąd maksymalny  $\delta_m$  jako największa wartość bezwzględna błędu  $\delta$ . Powtórzenie symulacji dla różnych warunków pomiaru pozwoliło na sporządzenie

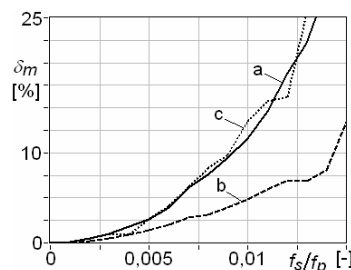
wykresów błędu maksymalnego w funkcji  $K$  oraz stosunku  $f_s/f_p$ .



Rys. 2. Błędy przetwornika w funkcji czasu przy sinusoidalnym napięciu wejściowym dla  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; chwila impulsu wyznaczona z dwóch próbek napięcia z ekstrapolacji: a – przedostatniej i ostatniej, b – pierwszej i ostatniej, c – pierwszej i drugiej

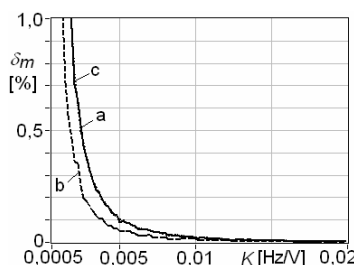
Fig. 2. Converter errors vs. time for sinusoidal input voltage, for  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; pulse instant calculated from two voltage samples from extrapolation: a – last but one and last, b – first and last, c – first and second

Na rys. 3 przedstawiony jest maksymalny błąd przetwornika w funkcji stosunku częstotliwości sinusoidalnego napięcia wejściowego do częstotliwości próbkowania, a na rys. 4 w funkcji współczynnika  $K$ .



Rys. 3. Maksymalne błędy przetwornika w funkcji stosunku częstotliwości sygnału do częstotliwości próbkowania przy sinusoidalnym napięciu wejściowym dla  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; chwila impulsu wyznaczona z dwóch próbek napięcia z ekstrapolacji: a – przedostatniej i ostatniej, b – pierwszej i ostatniej, c – pierwszej i drugiej

Fig. 3. Maximum converter errors vs. signal frequency to sampling frequency ratio, for  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; pulse instant calculated from two voltage samples from extrapolation: a – last but one and last, b – first and last, c – first and second



Rys. 4. Maksymalne błędy przetwornika w funkcji  $K$  przy sinusoidalnym napięciu wejściowym dla  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ; chwila impulsu wyznaczona z dwóch próbek napięcia z ekstrapolacji: a – przedostatniej i ostatniej, b – pierwszej i ostatniej, c – pierwszej i drugiej

Fig. 4. Maximum converter errors vs.  $K$ , for  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ; pulse instant calculated from two voltage samples from extrapolation: a – last but one and last, b – first and last, c – first and second

Zgodnie z przewidywaniem, ze wzrostem stosunku  $f_s/f_p$  wartość błędu zwiększa się (rys. 3). Wynika to z tego, że dla większej wartości stosunku  $f_s/f_p$ , w czasie pojedynczego okresu sygnału mierzonego zostanie pobrana mniejsza liczba próbek napięcia. Przy większej odległości między sąsiednimi próbkami, zmiana

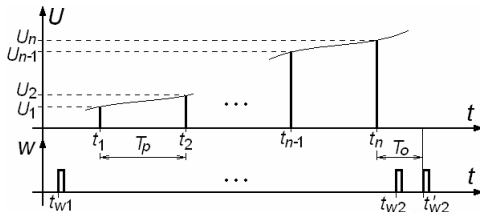
napięcia zgodnie z funkcją sinusoidalną będzie bardziej odbiegała od założonej zmiany liniowej.

Z rys. 4 wynika, że duże błędy wystąpią dla małej wartości  $K$ . Jest to spowodowane tym, że dla małych  $K$  będziemy mieli małą częstotliwość sygnału impulsowego. Ze względu na duży odstęp między impulsami wyjściowymi, w czasie tym zmiany napięcia wejściowego mogą być większe i odbiegające od założonej zmiany zgodnie z charakterystyką liniową.

Porównując omawiane algorytmy można stwierdzić, że mniejsze błędy daje wykorzystanie dwóch skrajnych próbek napięcia. Dlatego w kolejnym rozdziale będzie analizowana jedynie ta metoda.

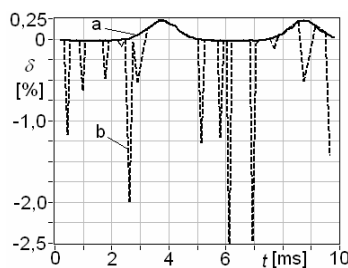
#### 4. Wpływ czasu obliczeń

Wyznaczenie chwili  $t_{w2}$  wymaga wykonania szeregu obliczeń zajmujących czas procesora. Załóżmy, że czas tych obliczeń wynosi  $T_o$ . Jeżeli po kolejnej chwili  $t_n$  próbkowania napięcia wejściowego wykonamy obliczenia i otrzymamy wynik wskazujący, że impuls wyjściowy powinien pojawić się w chwili  $t_{w2}$  (rys. 5), to będzie się on mógł pojawić dopiero w chwili  $t'_{w2}$  (po zakończeniu obliczeniach).



Rys. 5. Przebiegi czasowe sygnałów z uwzględnieniem czasu obliczeń  
Fig. 5. Timing charts of signals with regard to time calculation

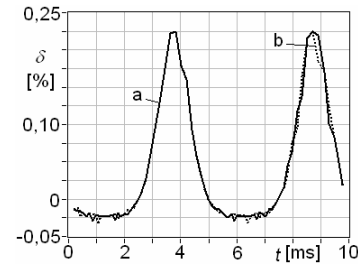
Dla impulsów, przy których wystąpi takie przesunięcie, wystąpi znacznie większy błąd, w porównaniu z przedstawionymi w poprzednim rozdziale. Na rysunku 6 pokazany jest ten błąd w funkcji czasu dla takich samych parametrów pomiaru jak na rys. 2. Jak widać wartość maksymalna tego błędu zwiększyła się ok. 10 razy.



Rys. 6. Błędy przetwornika w funkcji czasu przy sinusoidalnym napięciu wejściowym dla  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; chwila impulsu wyznaczona z pierwszej i ostatniej próbki napięcia z ekstrapolacji: a – bez uwzględnienia czasu obliczeń, b – z uwzględnieniem czasu obliczeń  $T_0=3\mu s$

Fig. 6. Converter errors vs. time for sinusoidal input voltage, for  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; pulse instant calculated from first and last voltage samples from extrapolation: a – without regard to time calculation, b – with regard to time calculation  $T_0=3\mu s$

Ta niekorzystna właściwość przedstawionej metody wymaga jej modyfikacji. Polega ona na tym, że generator impulsów zostaje zaprogramowany na generację impulsu w chwili  $t_{w2}$  nie dla warunku  $t_{w2} \leq t_n + T_p$ , jak przedstawiono w rozdziale 2, ale dla warunku  $t_{w2} \leq t_n + T_p + T_o$ . Oznacza to, że w sytuacji, gdy kolejny impuls powinien pojawić się w czasie krótszym od czasu obliczeń po kolejnej chwili próbkowania, obliczenia po tej chwili próbkowania nie są powtarzane.



Rys. 7. Błędy przetwornika w funkcji czasu przy sinusoidalnym napięciu wejściowym dla  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; chwila impulsu wyznaczona z pierwszej i ostatniej próbki napięcia z ekstrapolacji: a – bez uwzględnienia czasu obliczeń, b – z czasem obliczeń  $T_0=3\mu s$  uwzględnianym przy wyznaczeniu położenia impulsu

Fig. 7. Converter errors vs. time for sinusoidal input voltage, for  $U_0=30V$ ,  $U_m=10V$ ,  $f_s=200Hz$ ,  $f_p=100kHz$ ,  $K=0,0025Hz/V$ ; pulse instant calculated from first and last voltage samples from extrapolation: a – without regard to time calculation, b – with delay  $T_0=3\mu s$  regarded to calculation of pulse instant

Na rys. 7 przedstawiono wartości błędów w funkcji czasu przy pominięciu opóźnień związanych z czasem obliczeń oraz z uwzględnieniem czasu obliczeń, ale z zastosowaniem metody zmodyfikowanej. Porównując te wykresy można stwierdzić, że dla założonego sinusoidalnego sygnału mierzonego wprowadzenie modyfikacji metody nie powoduje znaczącej zmiany wartości błędów. Eliminuje natomiast znaczne błędy przedstawione na rys. 6, związane z opóźnieniem impulsów wyjściowych ze względu na czas wykonywanych obliczeń.

#### 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono cyfrowy przetwornik napięcie-częstotliwość, w którym położenie kolejnego impulsu wyjściowego wyznaczane jest z próbki napięcia pobranej bezpośrednio po poprzednim impulsie i z ostatniej próbki napięcia. Wykonywane obliczenia powodują opóźnienie, które może być przyczyną dodatkowych błędów. Błędy te zostały wyeliminowane przez modyfikację metody, polegającą na zwiększeniu wyprzedzenia, z jakim wyznaczane jest położenie impulsu wyjściowego po pobraniu ostatniej próbki napięcia. Przeprowadzone symulacje wykazały, że modyfikacja ta ma niewielki wpływ na wartość błędu przetwarzania. Przedstawiona metoda może być stosowana w systemach z torami pomiarowymi z częstotliwościowym nośnikiem informacji [5]. Cyfrowy przetwornik może w niektórych aplikacjach zastąpić stosowane do tej pory źródła sygnału impulsowego [6].

#### 6. Literatura

- [1] D. Świsulski: Koncepcja cyfrowego przetwornik napięcie-częstotliwość. *Pomiary Automatyka Kontrola* 2007, nr 4, s. 91-93.
- [2] Data Sheets Voltage-to-Frequency Converters: AD537, AD650, AD652, AD654, ADVFC32, AD7740/41/42. Analog Devices.
- [3] E. Pawłowski: Symulacja czujnika z wyjściem częstotliwościowym w stanach dynamicznych. *Pomiary Automatyka Kontrola* 2006, nr 9bis, s. 104 106.
- [4] D. Świsulski: Cyfrowy przetwornik napięcie-częstotliwość. Materiały Kongresu Metrologii, Kraków 9-13 września 2007.
- [5] D. Świsulski: Cyfrowa rejestracja sygnałów impulsowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
- [6] N. V. Kirianaki, S. Y. Yurish, N. O. Shpak, V. P. Denega: Data acquisition and signal processing for smart sensors. John Wiley & Sons, Ltd, Baffins Lane 2001.