

Dariusz ŚWISULSKI

POLITECHNIKA GDAŃSKA  
KATEDRA MIERNICTWA ELEKTRYCZNEGO

## Błąd dynamiczny w torze pomiarowym z częstotliwościowym nośnikiem informacji

Dr inż. Dariusz ŚWISULSKI

– absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej (1987 r.). Od 1988 roku pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Miernictwa Elektrycznego Politechniki Gdańskiej. Rozprawę doktorską obronił w 1994 roku. Obszar jego zainteresowań obejmuje cyfrową technikę pomiarową, systemy pomiarowe, przyrządy wirtualne.



### Streszczenie

W artykule przedstawiono błędy dynamiczne wynikające z cyfrowego pomiaru okresu, w torze pomiarowym z częstotliwościowym nośnikiem informacji, przy zmianie mierzonej wielkości według typowych funkcji. Przedstawiono rozważania w przypadku przypisania wyniku pomiaru do chwili po zakończeniu okresu, w którym przeprowadzony jest pomiar i do chwili leżącej w środku tego okresu.

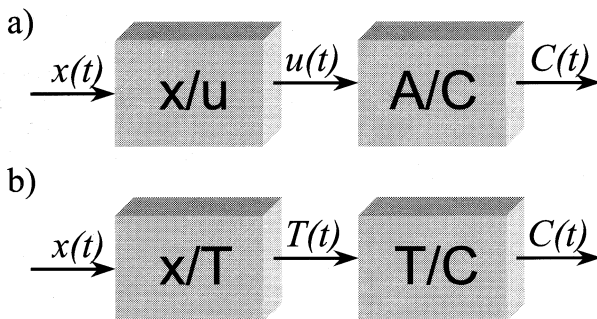
### Abstract

The paper presents dynamic error of the measurement channel with frequency modulation due to the digital measurement of time. The estimation of the error considers the measurands of forms of typical functions. The analysis concerns two cases. In the first one the measured result is assigned to an instant of a measurement end. In the second case the result is assigned to an instant in the middle of the conversion period.

### Wstęp

Tematem artykułu są błędy związane ze zmianą mierzonej wielkości w czasie pomiaru w przypadku, gdy mierzona wielkość (np. wartość chwilowa napięcia, prędkości obrotowej) przetwarzana jest na sygnał modulowany częstotliwościowo, a jej wartość określana jest na podstawie wyniku pomiaru metodą cyfrową okresu sygnału pośredniego.

Stosowane współcześnie układy umożliwiają dokładne pomiary okresu metodami cyfrowymi. Pomiar taki jest jednak dokładny jedynie w warunkach statycznych. Jeżeli wielkość mierzona zmienia się w czasie pomiaru, powstają dodatkowe błędy dynamiczne. Błędy te mogą przyjmować bardzo duże wartości. Wartość błędu dynamicznego zależy m.in. od chwili, do której przypisany jest wynik pomiaru.



Rys. 1. Tor pomiarowy: a) z napięciowym nośnikiem informacji, b) z częstotliwościowym nośnikiem informacji

### Tor pomiarowy z częstotliwościowym nośnikiem informacji

W technice pomiarowej, przy przetwarzaniu dowolnej wielkości na postać cyfrową, bardzo często wykorzystywany jest tor pomiarowy, w którym mierzona wielkość przetwarzana jest na napięcie, które w bloku przetwornika analogowo-cyfrowego przetwarzane jest na postać cyfrową (rys. 1a).

W niektórych wypadkach jako sygnały pośrednie w torze pomiarowym wykorzystywane są sygnały okresowe modulowane częstotliwościowo (rys. 1b). Okres takiego sygnału zależy od wartości przetwarzanej wielkości [7].

Założmy, że wielkością mierzoną  $x(t)$  jest wartość chwilowa sygnału pomiarowego. W przetworniku  $x/T$  wielkość mierzona przetwarzana jest na sygnał o częstotliwości zależnej od jej wartości. W bloku  $T/C$  sygnał częstotliwościowy przetwarzany jest na postać cyfrową.

Przetworniki różnych wielkości elektrycznych (np. [9, 16]) i nieelektrycznych (np. [1, 3]) na częstotliwość stosowane są często ze względu na małą wrażliwość na zakłócenia i prosty sposób przetworzenia sygnału wyjściowego na postać cyfrową. Prace nad takimi przetwornikami prowadzone są również w Polsce (np. [17]). Do przetworników tych należą również przetworniki obrotowo-impulsowe stosowane do pomiaru prędkości obrotowej [14].

Znanych jest wiele metod przetwarzania częstotliwości i okresu na postać cyfrową. Wśród metod tych można wyróżnić proste metody cyfrowego pomiaru częstotliwości i okresu oraz metody bardziej zaawansowane, np. kombinowana metoda jednoczesnego zliczania impulsów i pomiaru czasu, stałego mijającego czasu, pojedynczego i podwójnego buforowania itd. [11]. Metody te polegają na zliczaniu okresów sygnału z generatora wzorcowego w czasie kilku (w zależności od metody) kolejnych okresów przetwarzanego sygnału.

Główne źródła błędów przy pomiarze okresu to błąd kwantowania, błąd częstotliwości generatora wzorcowego i błąd brankowania [2]. Dodatkowe błędy powstają, gdy przetwarzany okres zmienia się w czasie pomiaru.

Próby zdefiniowania błędu dynamicznego podejmowano już wiele lat temu [19]. Ponieważ w opisie składowych błędów statycznego pomiaru okresu operuje się zwykle błędami maksymalnymi, również z różnych miar błędu dynamicznego [4] najwygodniej zastosować wartość maksymalną tego błędu.

Błąd dynamiczny można zdefiniować jako wynikającą ze zmiany wartości mierzonej różnicę między wartością uzyskaną z pomiaru i jej wartością faktyczną w danym momencie czasu [13].

Przy próbie wyznaczenia błędu dynamicznego pomiaru okresu pojawia się problem określenia okresu chwilowego (lub częstotliwości chwilowej  $f = 1/T$ ). Jeżeli jako definicję częstotliwości przyjmujemy stosunek liczby okresów przebiegu okresowego występujących w określonym przedziale czasu do wartości tego przedziału [10], to zdefiniowana w ten sposób częstotliwość jest wartością średnią w danym przedziale czasu. Podana w [10] definicja częstotliwości chwilowej, oparta na pochodnej kąta fazowego, dotyczy tylko przebiegu kwaziharmonicznego.

Rozwiązaniem w takiej sytuacji może być wykorzystanie definicji błędu sprowadzonego do wejścia przetwornika [8]. Błąd ten jest równy różnicy między wartością prawdziwą sygnału wejściowego i taką wartością sygnału wejściowego, przy której sygnał wyjściowy modelu jest równy sygnałowi prawdziwemu.

### Błąd dynamiczny przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym

Jeżeli wielkość mierzona jest funkcją czasu, błąd dynamiczny możemy obliczyć jako różnicę między wartością średnią w czasie okresu  $T_m$ , w którym przeprowadzony jest pomiar, rozpoczynającego się w chwili  $t_i$  i wartością chwilową wielkości mierzonej w chwili  $t_k$ , do której przypisany jest wynik pomiaru:

$$\Delta_d x = \frac{1}{T_m} \int_{t_i}^{t_i+T_m} x(t) dt - x(t_k) \quad (1)$$

Błąd dynamiczny przy cyfrowym pomiarze okresu składa się z dwóch składowych [6]:

- błędów uśredniania, mogących przyjmować większe wartości przy długim czasie pomiaru [18],
- błędów wynikających z przypisania wyniku pomiaru do danej chwili czasowej.

Wartość składowej błędów wynikającej z przypisania do danej chwili czasowej  $t_k$  zależy od wyboru tej chwili. Wynik pomiaru otrzymany jest z opóźnieniem spowodowanym czasem potrzebnym na wykonanie pomiaru i czasem potrzebnym na wykonanie obliczeń. Dlatego przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym wynik pomiaru może być przypisany do chwili  $t_k = t_i + T_m + T_c$ , gdzie  $t_i$  – chwila, w której rozpoczyna się mierzony okres,  $T_m$  – długość mierzzonego okresu,  $T_c$  – czas potrzebny na wykonanie obliczeń.

W przypadku gdy wielkość mierzona zmienia się w sposób liniowy  $x(t) = X_0 + at$ , względny błąd dynamiczny można wyrazić zależnością (2). Błąd ten został odniesiony do wartości wielkości mierzonej w chwili uzyskania wyniku pomiaru  $t_k$ .

$$\delta_d = -\frac{a \left( \frac{T_m}{2} + T_c \right)}{a(t_i + T_m + T_c) + X_0} \quad (2)$$

Jeżeli mierzona wielkość nie zmienia się w czasie pomiaru ( $a=0$ ) błąd dynamiczny jest równy zero. Dla  $a \neq 0$  błąd może przyjmować znaczne wartości, nawet kilkadziesiąt procent (np. dla  $X_0 = 0$ ,  $T_c = 0$  otrzymujemy  $\delta_d = -50\%$ ).

Przy zmianie wielkości mierzonej według funkcji wykładniczej:

$$x(t) = X_s \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_w}} \right) \quad (3)$$

względny błąd dynamiczny można wyrazić zależnością:

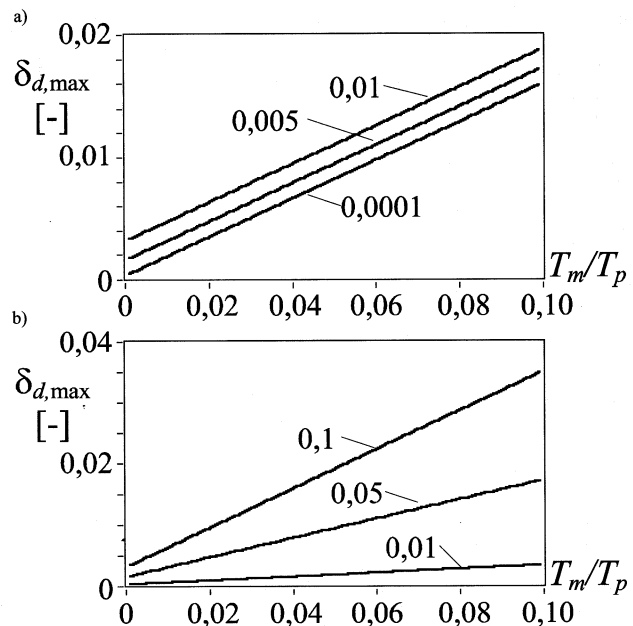
$$\delta_d = \frac{\frac{T_w}{T_m} e^{-\frac{t_i+T_m}{T_w}} - \frac{T_w}{T_m} e^{-\frac{t_i}{T_w}} + e^{-\frac{t_i+T_m+T_c}{T_w}}}{1 - e^{-\frac{t_i+T_m+T_c}{T_w}}} \quad (4)$$

Maksymalny błąd dynamiczny wystąpi dla największego nachylenia przebiegu wielkości mierzonej, tzn. dla  $t_i = 0$ . Błąd ten dla małych wartości stosunku  $T_m/T_w$  może osiągnąć wartość nawet 50%, przy większych wartościach tego stosunku jest znacznie mniejszy.

Jeżeli wielkość mierzona zmienia się zgodnie z funkcją sinusoidalną ze składową stałą  $X_0$  i składową zmienną o amplitudzie  $X_m$  i częstotliwości  $f_p = 1/T_p$  (wzór (5)), to względny błąd dynamiczny (odniesiony do wartości chwilowej w chwili  $t_k$ ) określony jest zależnością (6) [15].

$$x(t) = X_0 + X_m \sin(2\pi f_p t) \quad (5)$$

$$\delta_d = \frac{\sin\left(\pi \left( 2 \cdot \frac{t_i}{T_p} + \frac{T_m}{T_p} \right)\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{T_m}{T_p}\right) - \pi \frac{T_m}{T_p} \sin\left(2\pi \left( \frac{t_i}{T_p} + \frac{T_m}{T_p} + \frac{T_c}{T_p} \right)\right)}{\pi \frac{X_0 \cdot T_m}{X_m \cdot T_p} + \pi \frac{T_m}{T_p} \sin\left(2\pi \left( \frac{t_i}{T_p} + \frac{T_m}{T_p} + \frac{T_c}{T_p} \right)\right)} \quad (6)$$



Rys. 2. Wykres maksymalnego błęd dynamicznego w funkcji  $T_m/T_p$ :

a) dla  $X_m/X_0 = 0,05$  i  $T_c/T_p = 0,0001, 0,005$  i  $0,01$ ,

b) dla  $T_c/T_p = 0,005$  i  $X_m/X_0 = 0,01, 0,05$  i  $0,1$

Maksymalna wartość błęd dynamicznego i chwila, przy którym ona występuje zależą od wartości stosunków:  $T_m/T_p$ ,  $T_c/T_p$  i  $X_m/X_0$ .

Wykres maksymalnego błęd dynamicznego  $\delta_{d,max}$  w funkcji  $T_m/T_p$  dla różnych wartości  $T_c/T_p$  jest przedstawiony na rys. 2a, a dla różnych wartości  $X_m/X_0$  na rys. 2b. Jak widać błąd ten jest w przybliżeniu proporcjonalny do stosunku  $T_m/T_p$ .

Wzór na maksymalny błąd dynamiczny posiada złożoną postać, dlatego zastąpiono go zależnością przybliżoną, określoną wzorem (7).

$$\delta_{d,max} = \frac{X_m}{X_0} \left( 3 \cdot \frac{T_m}{T_p} + 6,5 \cdot \frac{T_c}{T_p} \right) \quad (7)$$

Wzór ten uzyskano przez zastosowanie regresji liniowej, po przeanalizowaniu różnych postaci funkcji. Daje on zadowalające wyniki dla występujących w praktyce wartości stosunków  $T_m/T_p$ ,  $T_c/T_p$  i  $X_m/X_0$ .

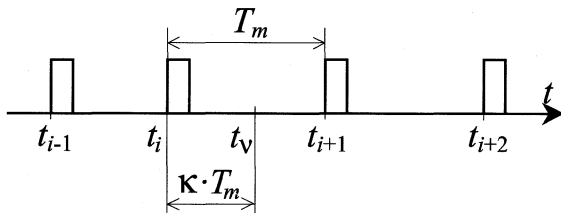
Główny wpływ na przedstawione błędy ma opóźnienie związane z czasem potrzebnym na wykonanie pomiaru i obliczeń. Znacznie mniejsze wartości błędów dynamicznych uzyskuje się przy przetwarzaniu w czasie własnym, gdy w czasie pomiaru wyniki są rejestrowane w celu późniejszego przetworzenia. Zarejestrowane wyniki pojedynczych pomiarów mogą być w takim wypadku przypisane do dowolnej chwili, nawet przed końcem okresu, w którym przeprowadzany był pomiar.

### Wyznaczenie chwili, do której można przypisać wynik pomiaru

W celu właściwego wyboru chwili, do której przypisany jest wynik pomiaru, można wyznaczyć wartość  $t_v$ , w której wartość chwilowa wielkości mierzonej jest równa wartości średniej w czasie mierzzonego okresu (uzyskanej z pomiaru).

Rysunek 3 przedstawia chwile ...,  $t_{i-1}$ ,  $t_i$ ,  $t_{i+1}$ ,  $t_{i+2}$ , ..., w których rozpoczynają się kolejne mierzone okresy. Jeżeli okresy sygnału z generatora wzorcowego zliczane są w czasie  $T_m$  między chwilami  $t_i$  i  $t_{i+1}$ , to wartość średnia w tym odstępzie czasu jest równa wartości chwilowej w chwili  $t_v$ . Chwila  $t_v$  może poprzedzać chwilę końcową tego przedziału  $t_{i+1}$  o czas  $(1-\kappa)T_m$ , gdzie  $0 < \kappa < 1$ . Wartość  $\kappa$  można wyznaczyć z zależności (8).

$$\frac{1}{T_m} \int_{t_i}^{t_i+T_m} x(t) dt = x(t_i + \kappa \cdot T_m) \quad (8)$$

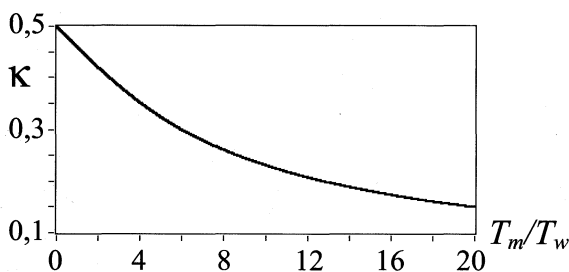


Rys. 3. Okres  $T_m$ , w którym następuje pomiar i chwila  $t_v$  w której wartość chwilowa wielkości mierzonej jest równa wartości średniej między  $t_i$  i  $t_{i+1}$

Jeżeli wielkość mierzona  $x(t)$  zmienia się w sposób liniowy, z równania (8) otrzymujemy  $\kappa = 0,5$ , tzn. wartość średnia jest równa wartości chwilowej w środkowym punkcie przedziału, za który następuje uśrednianie. Dla zmiany  $x(t)$  według funkcji wykładniczej wielkość  $\kappa$  określona jest wzorem:

$$\kappa = -\frac{T_w}{T_m} \cdot \ln \left( \frac{T_w}{T_m} \left( e^{-\frac{t_i}{T_w}} - e^{-\frac{t_i+T_m}{T_w}} \right) \right) - \frac{t_i}{T_m} \quad (9)$$

Wykres zmiany  $\kappa$  w funkcji  $T_m/T_w$  przedstawiony jest na rys. 4. Dla małych wartości stosunku  $T_m/T_w$ , wielkość  $\kappa$  ma wartość zbliżoną do 0,5. Przy większych wartościach tego stosunku,  $\kappa$  przyjmuje mniejsze wartości – wartość średnia jest równa wartości chwilowej w chwili przesuniętej ze środka przedziału w stronę początku przedziału, za który następuje uśrednianie.



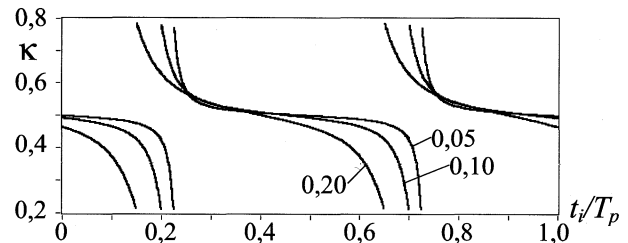
Rys. 4. Wielkość  $\kappa$  w funkcji  $T_m/T_w$  przy zmianie  $x(t)$  według funkcji wykładniczej

Jeżeli wielkość mierzona  $x(t)$  zmienia się zgodnie z funkcją sinusoidalną, wielkość  $\kappa$  można wyrazić zależnością:

$$\kappa = \frac{T_p}{2\pi \cdot T_m} \arcsin \left( \frac{\cos \left( 2\pi \frac{t_i}{T_p} \right) - \cos \left( 2\pi \frac{t_i + T_m}{T_p} \right)}{2\pi \frac{T_m}{T_p}} \right) - \frac{t_i}{T_m} \quad (10)$$

Rysunek 5 przedstawia  $\kappa$  w funkcji  $t_i/T_p$  dla trzech różnych wartości stosunku  $T_m/T_p = 0,05, 0,10$  i  $0,20$ .

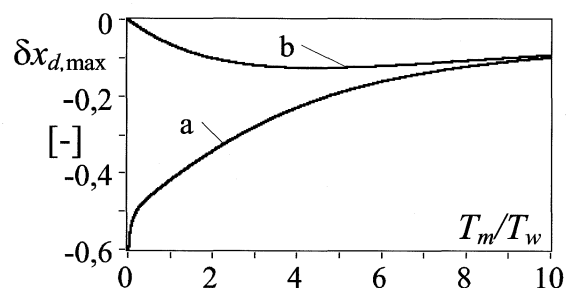
Gdy wielkość mierzona ma największe nachylenie (tzn. gdy  $t_i/T_p$  ma wartość w pobliżu 0, 0,5 i 1,0) wartość średnia jest zbliżona do wartości chwilowej w środku przedziału, za który następuje uśrednianie. Gdy przedział uśredniania przypada w pobliżu maksimum lub minimum funkcji sinusoidalnej, wartość  $\kappa$  może znacznie odbiegać od 0,5.



Rys. 5. Wielkość  $\kappa$  w funkcji  $t_i/T_p$  przy zmianie  $x(t)$  według funkcji sinusoidalnej dla  $T_m/T_p = 0,05, 0,10$  i  $0,20$

### Błąd dynamiczny przy przetwarzaniu w czasie własnym

Jak wynika z przedstawionych rozważań, dla nieznannej funkcji wielkości mierzonej  $x(t)$  w czasie pomiaru, nie jest możliwy wybór takiej chwili  $t_v$ , dla której wartość średnia (uzyskana z pomiaru) będzie zawsze równa wartości chwilowej w chwili  $t_v$ . Najwygodniejszym rozwiązaniem w takiej sytuacji jest przypisanie wyniku pomiaru do chwili znajdującej się w środku przedziału, za który następuje uśrednianie, czyli do chwili  $t_k = t_i + 0,5T_m$ . Takie założenie przy wyznaczaniu błędów dynamicznych przyjęto m.in. w [12].



Rys. 6. Maksymalny błąd dynamiczny w funkcji stosunku  $T_m/T_w$  przy zmianie mierzonej wielkości zgodnie z funkcją wykładniczą przy przetwarzaniu: a) w czasie rzeczywistym (dla  $T_c/T_w = 0,01$ ), b) w czasie własnym

Przy zmianie wielkości mierzonej w sposób liniowy, błąd dynamiczny jest w takim wypadku równy zero. Przy zmianie mierzonej wielkości zgodnie z funkcją wykładniczą, błąd dynamiczny można obliczyć ze wzoru (11):

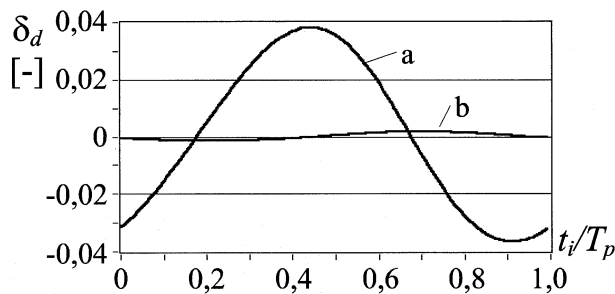
$$\delta_d = \frac{\frac{T_w}{T_m} e^{-\frac{t_i+T_m}{T_w}} - \frac{T_w}{T_m} e^{-\frac{t_i}{T_w}} + e^{-\frac{t_i+\frac{1}{2}T_m}{T_w}}}{\frac{t_i+\frac{1}{2}T_m}{T_w}} \quad (11)$$

Podobnie jak przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym maksymalny błąd dynamiczny wystąpi dla największego nachylenia przebiegu mierzonej wartości, czyli dla  $t_i = 0$ . Na rys. 6 przedstawiono

maksymalny błąd dynamiczny (dla  $t_i = 0$ ) w funkcji stosunku  $T_m/T_p$  przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym i w czasie własnym.

Przetwarzanie w czasie własnym wielkości mierzonej zmieniającej się według funkcji wykładniczej pozwala znacznie zmniejszyć błąd dynamiczny, szczególnie dla małych wartości stosunku okresu uśredniania do stałej czasowej przebiegu wykładniczego. Przy zmianie wielkości mierzonej w sposób sinusoidalny, błąd dynamiczny przy przetwarzaniu w czasie własnym można wyrazić zależnością:

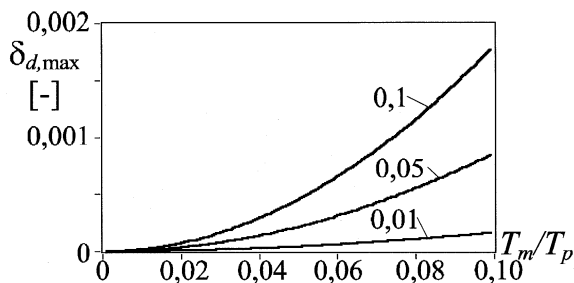
$$\delta_d = \frac{\sin\left(\pi\left(2\frac{t_i}{T_p} + \frac{T_m}{T_p}\right)\right) \sin\left(\pi\frac{T_m}{T_p}\right) - \pi\frac{T_m}{T_p} \sin\left(\pi\left(2\frac{t_i}{T_p} + \frac{T_m}{T_p}\right)\right)}{\pi\frac{X_0 \cdot T_m}{X_m \cdot T_p} + \pi\frac{T_m}{T_p} \sin\left(\pi\left(2\frac{t_i}{T_p} + \frac{T_m}{T_p}\right)\right)} \quad (12)$$



Rys. 7. Błąd dynamiczny w funkcji stosunku  $t_i/T_p$  przy zmianie wielkości mierzonej zgodnie z funkcją sinusoidalną dla  $T_m/T_p = 0,1$ ,  $X_m/X_0 = 0,1$ , przy przetwarzaniu: a) w czasie rzeczywistym (dla  $T_c/T_p = 0,01$ ), b) w czasie własnym

Na rys. 7 przedstawiono przebieg błędu dynamicznego w funkcji stosunku  $t_i/T_p$  przy sinusoidalnej zmianie wielkości mierzonej, dla przykładowych wartości  $T_m/T_p$  i  $X_m/X_0$ . Dzięki przypisaniu wyniku pomiaru do chwili leżącej w środkowym punkcie przedziału, za który następuje uśrednianie, błąd dynamiczny w stosunku do błędu przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym zmniejszył się kilkadziesiąt razy.

Wykres maksymalnej wartości  $\delta_{d,max}$  błędu dynamicznego przy przetwarzaniu w czasie własnym w funkcji  $T_m/T_p$  dla różnych wartości  $X_m/X_0$  jest przedstawiony na rys. 8. Błąd ten rośnie ze wzrostem  $T_m/T_p$ , przy czym dla większych wartości  $T_m/T_p$  wzrost ten jest większy.



Rys. 8. Wykres maksymalnej wartości błędu dynamicznego w funkcji  $T_m/T_p$  dla  $X_m/X_0 = 0,01$ ,  $0,05$  i  $0,1$

Wzór na maksymalną wartość błędu dynamicznego przy przetwarzaniu w czasie własnym można zastąpić zależnością przybliżoną (13):

$$\delta_{d,max} = \frac{X_m}{X_0} \cdot \left( 1 - \frac{\sin\left(\pi\frac{T_m}{T_p}\right)}{\pi\frac{T_m}{T_p}} \right) \quad (13)$$

## Przykład

Jako przykład rozważmy błędy występujące przy pomiarze prędkości chwilowej na podstawie pomiaru okresu sygnału z przetwornika obrotowo-impulsowego. Długość okresu  $T$  sygnału na wyjściu takiego przetwornika zależy od prędkości obrotowej  $\omega$  i liczby okresów na wyjściu przetwornika przy jednym obrocie tarczy  $C_e$ :

$$T = \frac{2\pi/C_e}{\omega} \quad (14)$$

Jeżeli prędkość obrotowa  $\omega$  zmienia się w trakcie pomiaru, okres  $T$  odpowiada średniej prędkości w czasie pomiaru. W kolejnych pomiarach może mieć on różną wartość.

Załóżmy, że zmierzona prędkość zmienia się zgodnie z funkcją (5), gdzie na stałą prędkość obrotową  $\omega_0 = 31,4$  rad/s (300 obr/min) nałożone są wahania prędkości o amplitudzie  $\omega_m = 0,02\omega_0$  i częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości wirowania wału.

Załóżmy, że długość kolejnych okresów sygnału z przetwornika obrotowo-impulsowego mierzona jest przez zliczanie okresów sygnału z generatora wzorcowego o częstotliwości  $f_g = 10$  MHz, a czas potrzebny na wykonanie obliczeń po zakończonym okresie wynosi  $T_c = 10$   $\mu$ s.

Tabela. Maksymalne wartości błędów kwantowania  $\delta_{z,max}$  i dynamicznego  $\delta_{d,max}$  przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym i w czasie własnym dla różnych wartości  $C_e$

$C_e$	$\delta_{z,max}$	$\delta_{d,max}$	
		w czasie rzeczywistym	w czasie własnym
okresów/obrót	%	%	%
250	0,013	0,049	0,0002
500	0,026	0,025	0,00005
1000	0,051	0,012	0,00001

W tabeli przedstawiono maksymalne wartości błędów kwantowania  $\delta_{z,max}$  i dynamicznego  $\delta_{d,max}$  przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym (wynik pomiaru uzyskany po zakończonym pomiarze i obliczeniach) i w czasie własnym (wynik pomiaru przypisany do chwili znajdującej się w środku przedziału, w którym następuje pomiar).

Błąd częstotliwości generatora wzorcowego dla używanych współcześnie układów zwykle nie przekracza wartości 0,0001%. Tak mały błąd jest przy tym pomiarze pomijalny. Kolejny błąd składowy, błąd bramkowania, jest odwrotnie proporcjonalny do nachylenia przebiegu sygnału w chwili wyzwolenia [18]. Jeżeli sygnałem wyjściowym przetwornika obrotowo-impulsowego jest sygnał prostokątny, również błąd bramkowania ma pomijalne wartości.

Większe błędy mogą wynikać z błędów przetwornika obrotowo-impulsowego: błędy związane z tworzeniem rysunku znaczników i nanoszeniem ich na tarczę, błędy mimośrodowości ruchu wału, błędy w układzie powielającym i przetwarzającym na sygnał cyfrowy. Wartość tych błędów zależy od technologii wykonania przetwornika [5] i w zależności od typu przetwornika może mieć różne wartości.

Jak wynika z tabeli przy wykorzystaniu przetwornika obrotowo-impulsowego o  $C_e = 250$  okresach sygnału wyjściowego przy jednym obrocie i pomiarze w czasie rzeczywistym, główny wpływ na dokładność pomiaru ma błąd dynamiczny.

Wykorzystanie przetwornika o dwukrotnie większej liczbie okresów sygnału wyjściowego przy jednym obrocie wprawdzie zwiększyło błąd kwantowania, ale zmniejszenie błędu dynamicznego pozwoliło zmniejszyć błąd całkowity. Dalsze zwiększanie  $C_e$  jest bezcelowe. Wprawdzie maleje błąd dynamiczny, ale główny wpływ na dokładność ma rosnący błąd kwantowania.

Inaczej wygląda sytuacja przy przetwarzaniu w czasie własnym. Błędy dynamiczne są wtedy znacznie mniejsze i główny wpływ na dokładność ma błąd kwantowania. Dlatego

można zastosować przetwornik o mniejszej liczbie okresów sygnału wyjściowego przy jednym obrocie.

### Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionych rozważań, błędy dynamiczne mogą mieć duży wpływ na dokładność pomiaru okresu w torze pomiarowym z częstotliwościowym nośnikiem informacji.

Wartość tych błędów zależy od zmian wartości mierzonej w czasie pomiaru, długości i położenia okresu, w którym wykonywany jest pomiar. Wpływ na wartość błędu dynamicznego ma też chwila, do której przypisany jest wynik pomiaru. Przypisanie wyniku pomiaru do chwili po zakończonym pomiarze, opóźnionym dodatkowo o czas potrzebny na wykonanie obliczeń daje znacznie większy błąd, niż przypisanie wyniku do chwili leżącej w środkowym punkcie przedziału, w którym wykonywany był pomiar.

Możliwość oszacowania błędu dynamicznego pozwala tak dobrać charakterystykę przetwornika danej wielkości na sygnał częstotliwościowy, aby całkowity błąd pomiaru był jak najmniejszy [15].

### Literatura

- [1] G. J. A. van DIJK, J. H. HUIJSING: Bridge-Output-to-Frequency Converter for Smart Thermal Air-Flow Sensors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 44, No 4, August 1995.
- [2] Fundamentals of Time Interval Measurements. Application Note 200-3. Hewlett-Packard Company 1997.
- [3] G. de GRAFF, R. F. WOLFFENBUTTEL: Light-to-Frequency Converter Using Integrating Mode Photodiodes. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 46, No 4, August 1997.
- [4] R. HAGEL, J. ZAKRZEWSKI: Miernictwo dynamiczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
- [5] J. IGIELSKI, A. CHROSTOWSKI: Wpływ technologii na poprawność pracy przetworników obrotowo-impulsowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Konferencje, z. 1, Warszawa 1991.
- [6] J. R. JASIK, E. PAWŁOWSKI: Pomiary częstotliwości chwilowej sygnałów impulsowych. Pomiary Automatyka Kontrola 1998, nr 2.
- [7] J. JAWORSKI: Matematyczne podstawy metrologii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
- [8] J. JAWORSKI, R. MORAWSKI, J. Olędzki: Wstęp do metrologii i techniki eksperymentu. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
- [9] K. MOCHIZUKI, K. WATANABE: A High-Resolution, Linear Resistance-to-Frequency Converter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 45, No 3, August 1996.
- [10] Praca zbiorowa: Mała encyklopedia metrologii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989.
- [11] M. PROKIN: Dynamic Response of a Frequency Measuring System. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 41, No 3, June 1992.
- [12] G. SAHNER: Wstęp do miernictwa cyfrowego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
- [13] A. SOWIŃSKI: Cyfrowa technika pomiarowa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1975.
- [14] D. ŚWISULSKI: Effect of the incremental encoder's errors while measuring the angular velocity. Proceedings of XIV IMEKO World Congress, vol. VIII, Tampere 1997.
- [15] D. ŚWISULSKI: Wpływ błędów dynamicznego na dobór okresu sygnału impulsowego przy przetwarzaniu T/C. Materiały IV Szkoły-Konferencji „Metrologia Wspomagana Komputerowo”, tom 2, Rynia k/Warszawy 1999.
- [16] F. N. TROFIMENKOFF, F. SABOURI, J. QIN, J. W. HASLETT: A Square-Rooting Voltage-to-Frequency Converter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 46, No 5, October 1997.
- [17] H. URZĘDNICZOK: Optymalizacja konstrukcji pewnej klasy przetworników typu „parametr/okres” ze względu na błędy dynamiczne. Pomiary Automatyka Kontrola 1998, nr 2.
- [18] J. ZAKRZEWSKI: Dynamic accuracy of multiperiod counters. Measurement 1995, nr 15.
- [19] A. ŻUCHOWSKI: O założeniach i definicjach teorii pomiarów dynamicznych. Pomiary Automatyka Kontrola 1967, nr 2.

Artykuł recenzowany

## karty pomiarowe



karty pomiarowe firmy



obudowy 19" komputerów i monitorów  
szufladki 19" na klawiaturę  
klawiatury wodoodporne i membranowe  
karty wieloportowe RS232 i RS485  
konwertery RS232 na RS485 i pętlę prąd.

## OPTIMUS-SEKO

43-300 Bielsko-Biała, ul. Jutrzenki 20  
tel. (039) 124160, (033) 140101, fax (033) 140071  
e-mail: oseko@onet.pl http://www.seko.com.pl

## OFERTA W ZAKRESIE SYSTEMÓW AUTOMATYZACJI PRZEDSIĘBIORSTW PRODUKCYJNYCH

### Rozwiązania kompleksowe

- zintegrowany system sterowania i wizualizacji procesów przemysłowych
- modułowy system zarządzania produkcją VPPS (MRP II) niemieckiej firmy infor

### Systemy automatyzacji firmy SIEMENS

- sterowniki programowalne rodziny SIMATIC S5 i S7
- systemy wizualizacji COROS
- sieci przemysłowe SIMATIC NET (PROFIBUS, AS-I)

### Realizacja i wdrażanie

- systemy automatyzacji urządzeń przemysłowych
- systemy sterowania i monitorowania produkcji
- systemy wizualizacji procesów



41-500 CHORZÓW, ul. Długa 1  
tel. (0-32) 246 44 22, 246 41 71, 246 25 91  
fax (0-32) 246 44 22 w. 100  
e-mail: office@iss.katowice.pl  
http://www.iss.katowice.pl