

BŁĘDY CYFROWEJ REJESTRACJI PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ Z WYKORZYSTANIEM PRZETWORNIKA OBROTOWO-IMPULSOWEGO

Dariusz ŚWISULSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
tel.: 58 347 1397, e-mail: d.swisulski@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zasadę działania przetwornika obrotowo-impulsowego w zastosowaniu do pomiaru prędkości obrotowej. Omówiono metody rejestracji on-line sygnału impulsowego z przetwornika obrotowo-impulsowego. W metodach tych prędkość obrotowa wyznaczana jest na podstawie ostatniego przedziału międzyimpulsowego lub na podstawie dwóch ostatnich przedziałów międzyimpulsowych z ekstrapolacji. Dla sinusoidalnej zmiany prędkości udowodniono, że metoda, przy której uzyskujemy mniejszą wartość błędu pomiaru, zależy od zmian prędkości oraz parametrów pomiaru.

Słowa kluczowe: pomiar prędkości obrotowej, przetwornik obrotowo-impulsowy, pomiar on-line sygnału impulsowego.

1. WPROWADZENIE

Prędkość obrotowa mierzona jest najczęściej przy użyciu inkrementalnego przetwornika obrotowo-impulsowego. Częstotliwość impulsowego sygnału wyjściowego takiego przetwornika jest proporcjonalna do prędkości obrotowej. Dlatego prędkość możemy wyznaczyć na podstawie czasu między dwoma ostatnimi impulsami sygnału. Znana jest też metoda, w której prędkość wyznaczana jest z ekstrapolacji na podstawie czasów dwóch ostatnich przedziałów międzyimpulsowych.

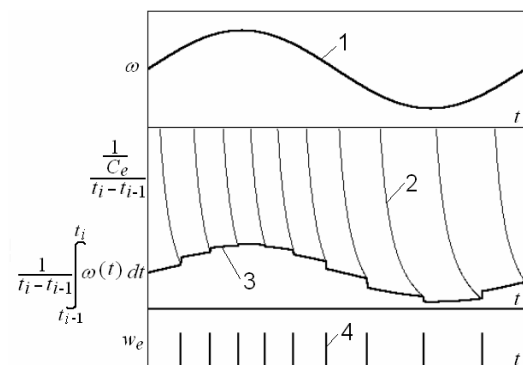
Z przeprowadzonych przez autora i przedstawionych w artykule wyników badań wynika, że zastąpienie pomiaru z wykorzystaniem pojedynczego przedziału na pomiar z dwóch przedziałów międzyimpulsowych przy pewnych warunkach może spowodować zwiększenie błędów. Zależy to od wartości i charakteru zmian mierzonej prędkości obrotowej, ale również od warunków pomiaru (rozdzielczość przetwornika obrotowo-impulsowego i częstotliwość generatora wzorcowego).

2. ZASADA DZIAŁANIA PRZETWORNIKA OBROTOWO-IMPULSOWEGO

Przetwornik obrotowo-impulsowy zbudowany jest z zamocowanej na wale tarczy, na obwodzie której znajdują się szczeliny. Po jednej stronie tarczy umieszczone jest źródło światła, po drugiej fotoelement. W trakcie obrotu tarczy strumień światła jest okresowo przerywany, a sygnał elektryczny na wyjściu czujnika fotoelektrycznego zależy od zmian położenia tarczy. Liczba impulsów jest równa liczbie

szczelin, które przeszły przez pole strumienia świetlnego. Ze względu na wymaganą przez fotoelement energię świetlną, pojedyncza szczelina musi być duża. Aby nie ograniczało to rozdzielczości przetwornika, między źródłem światła i tarczą umieszczona jest dodatkowa nieruchoma maska, ze szczelinami z takim samym odstępem jak szczeliny na tarczy. Dzięki temu strumień świetlny przechodzi jednocześnie przez kilka szczelin.

Powstawanie sygnału impulsowego na wyjściu przetwornika obrotowo-impulsowego, przedstawione jest na rysunku 1.



Rys. 1. Powstawanie sygnału impulsowego na wyjściu przetwornika obrotowo-impulsowego

Załóżmy, że mierzona prędkość obrotowa $\omega(t)$ zmienia się zgodnie z funkcją sinusoidalną (przebieg 1 na rysunku 1).

Impuls na wyjściu przetwornika obrotowo-impulsowego pojawi się w chwili t_i , w której średnia prędkość obrotowa w czasie od poprzedniego impulsu t_{i-1} (lewa strona równania (1)) będzie równa stosunkowi kąta obrotu tarczy określonego odwrotnością rozdzielczości (czułości) C_e przetwornika inkrementalnego (liczba impulsów przypadająca na jeden obrót) do czasu $t_i - t_{i-1}$, w którym tarcza obraca się o ten kąt (prawa strona (1)). Czyli gdy spełniony jest warunek:

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

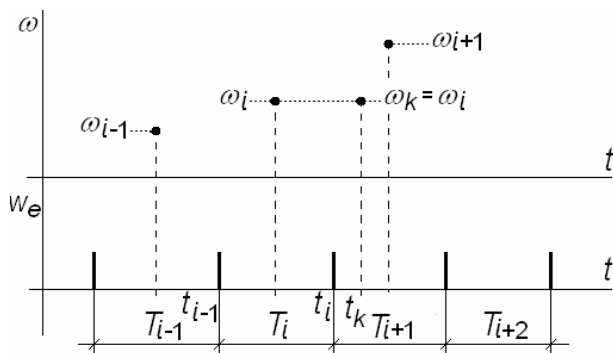
Obie strony równania (1) przedstawiają przebiegi 2 i 3 na rysunku 1.

Przebieg 4 na rysunku 1 pokazuje chwile, w których pojawiły się impulsy sygnału w_e na wyjściu przetwornika obrotowo-impulsowego.

3. PRZETWARZANIE POŁOŻENIA IMPULSÓW NA WARTOŚĆ PRĘDKOŚCI

Najprostszy sposób wyznaczenia prędkości obrotowej na podstawie sygnału z przetwornika obrotowo-impulsowego polega na tym, że wartość ta dla dowolnej chwili t_k obliczana jest z wzoru (2) na podstawie długości ostatniego przedziału międzyimpulsowego $T_i = t_i - t_{i-1}$ poprzedzającego chwilę t_k (rys. 2) [1].

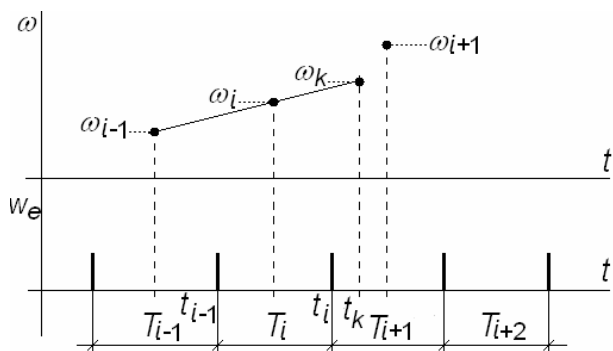
$$\omega_k = \frac{1}{C_e \cdot T_i} \quad (2)$$



Rys. 2. Pomiar prędkości obrotowej z ostatniego przedziału międzyimpulsowego

Jeżeli wartości mierzonej prędkości zmieniają się w czasie pomiaru, w wyniku czego zmieniają się też odstępy czasu między impulsami, przy większym okresie sygnału impulsowego, a w rezultacie dłuższym czasie między zakończeniem okresu T_i i chwilą t_k , wartość uzyskana z pomiaru ω_k może odbiegać od wartości w chwili próbkowania.

Dlatego w przypadku zmian mierzonej prędkości, wartość w dowolnej chwili t_k można wyznaczyć z wzoru (3) z wykorzystaniem ekstrapolacji z dwóch kolejnych przedziałów międzyimpulsowych poprzedzających chwilę t_k , przy założeniu liniowej zmiany prędkości oraz założeniu, że wartość prędkości ω_i uzyskana z pomiaru przedziału T_i jest równa chwilowej wartości prędkości w środkowym punkcie tego przedziału (rys. 3) [1].



Rys. 3. Pomiar prędkości obrotowej z ekstrapolacji z dwóch ostatnich przedziałów międzyimpulsowych T_{i-1} i T_i

$$\omega_k = \omega_{i-1} + \frac{(\omega_i - \omega_{i-1}) \left(t_k - \left(\sum_{j=1}^{i-2} T_j + \frac{1}{2} T_{i-1} \right) \right)}{\left(\sum_{j=1}^{i-1} T_j + \frac{1}{2} T_i \right) - \left(\sum_{j=1}^{i-2} T_j + \frac{1}{2} T_{i-1} \right)} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{C_e} \left(\frac{1}{T_{i-1}} + \frac{2 \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i-1}} \right) \left(t_k - \sum_{j=1}^{i-2} T_j - \frac{1}{2} T_{i-1} \right)}{T_{i-1} + T_i} \right)$$

Rozwiązanie takie może prowadzić jednak do zwiększenia błędów pomiaru w sytuacji, gdy prędkość nie zmienia się w sposób liniowy, ale przypadkowy. Wyznaczona częstotliwość na podstawie dwóch ostatnich przedziałów może znacznie odbiegać od jej bieżącej wartości.

4. BŁĘDY POMIARU PRĘDKOŚCI

Załóżmy, że do pomiaru prędkości obrotowej wykorzystujemy przetwornik obrotowo-impulsowy o rozdzielczości C_e , a w odstępach między impulsami z przetwornika obrotowo-impulsowego zliczamy okresy sygnału z generatora wzorcowego o częstotliwości f_g .

Położenie kolejnego impulsu t_i z przetwornika obrotowo-impulsowego można wyznaczyć jako czas od poprzedniego impulsu 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 [2]. Tarcza przetwornika obrotowo-impulsowego w czasie między dwoma impulsami obraca się o $1/C_e$ obrotu. Stąd otrzymujemy równanie (1).

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

Założmy, że 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 ω_0 nałożone są wahania prędkości o amplitudzie ω_m i częstotliwości f_p .

Aby jeszcze lepiej zamodelować warunki rzeczywiste, dodajmy wartość losową $\Delta\omega_z$, wynikającą z nierównomierności ruchu obrotowego układu napędowego oraz błędów przetwornika obrotowo-impulsowego [3].

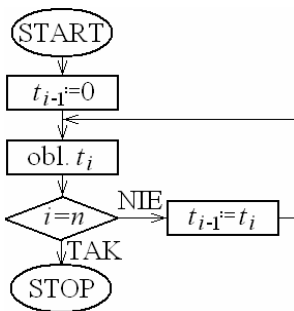
$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_m \sin(2\pi f_p t) + \Delta\omega_z \quad (5)$$

Po przekształceniu zależności (1) i (5) otrzymujemy równanie:

$$\begin{aligned} & (\omega_0 + \Delta\omega_z) t_i - (\omega_0 + \Delta\omega_z) t_{i-1} + \\ & + \frac{\omega_m \cos(2\pi f_p t_{i-1})}{2\pi f_p} - \frac{\omega_m \cos(2\pi f_p t_i)}{2\pi f_p} - \frac{1}{C_e} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Z równania (6) można wyznaczyć chwilę, w której pojawi się impuls na wyjściu przetwornika obrotowo-impulsowego.

Zakładając położenie pierwszego impulsu w chwili $t=0$, z (6) wyznaczamy położenie następnego impulsu t_i , które przy kolejnym obliczeniu traktowane jest jako położenie poprzednie t_{i-1} (rys. 4).

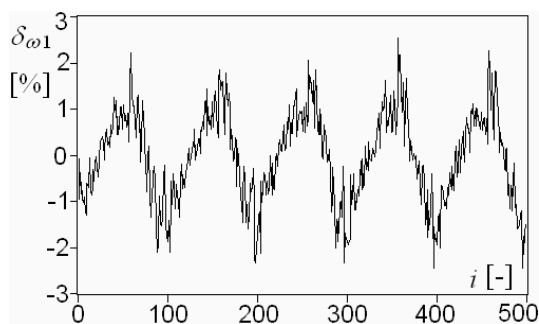


Rys. 4. Algorytm obliczania położenia impulsów

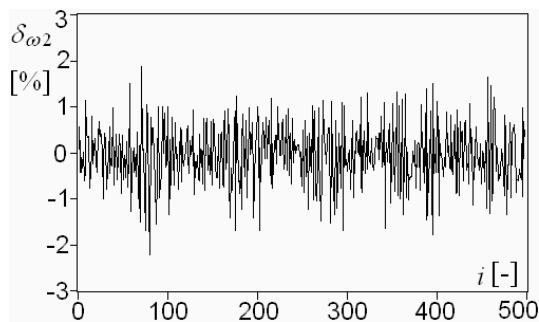
Dla porównaniu obu metod dla przetwornika o rozdzielczości $C_e = 500$ obliczono wartości błędów względnych δ_ω pomiaru prędkości w funkcji numeru kolejnych pomiarów, przy założeniu, że wartość składowej stałej prędkości obrotowej wynosi $\omega_0 = 10$ obr/s, amplituda składowej przemiennej $\omega_m = 2$ obr/s i jej częstotliwość $f_p = 50$ Hz. Założono ponadto, że czasy kolejnych przedziałów międzyimpulsowych T_i określane są na podstawie liczby impulsów C_i sygnału z generatora wzorcowego o częstotliwość $f_g = 20$ MHz:

$$T_i = \frac{C_i}{f_g} \quad (8)$$

Wyniki obliczeń pokazane są na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Błąd względny kolejnych pomiarów z pojedynczego okresu dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $\omega_m = 2$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $\Delta\omega_{zmax} = 0,05$ obr/s, $C_e = 500$, $f_g = 20$ MHz

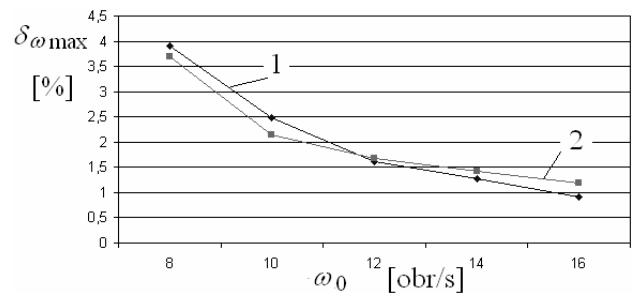


Rys. 6. Błąd względny kolejnych pomiarów z dwóch okresów dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $\omega_m = 2$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $\Delta\omega_{zmax} = 0,05$ obr/s, $C_e = 500$, $f_g = 20$ MHz

Wartości błędów obliczono z wartości prędkości otrzymanej dla danej metody (wzory (2) i (3)) i rzeczywistej wartości prędkości w danej chwili.

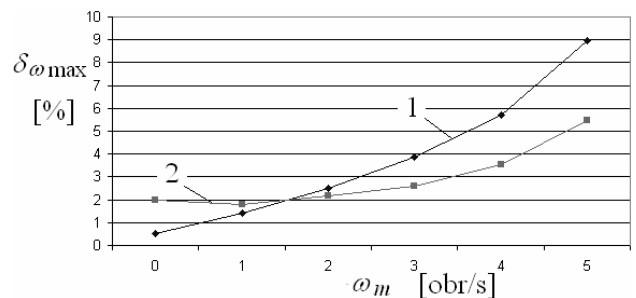
Na rysunkach 7...11 przedstawiono maksymalną wartość modułu względnego pomiaru prędkości przy wykorzystaniu pojedynczego przedziału międzyimpulsowego i dwóch ostatnich przedziałów, w funkcji parametrów mierzonej prędkości i parametrów układu pomiarowego.

Ze wzrostem składowej stałej prędkości błąd się zmniejsza (rys. 7), przy czym zmiany są większe dla pomiaru z pojedynczego okresu. Dlatego przy mniejszych wartościach składowej stałej prędkości mniejszy błąd uzyskujemy w metodzie wykorzystującej dwa okresy, przy większych prędkościach – w metodzie z jednym okresem.

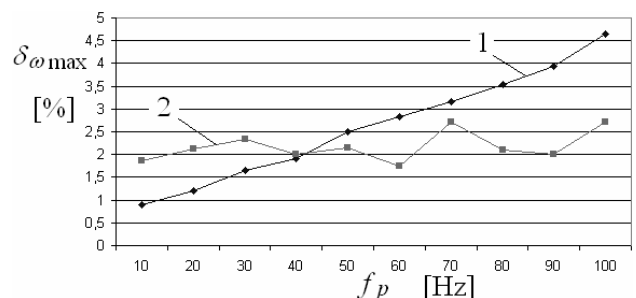


Rys. 7. Maksymalny błąd względny w funkcji ω_0 dla $\omega_m = 2$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $\Delta\omega_{zmax} = 0,05$ obr/s, $C_e = 500$, $f_g = 20$ MHz; pomiar z: 1 – pojedynczego okresu, 2 – dwóch okresów

Jeżeli zwiększa się amplituda składowej przemiennej prędkości, błąd się zwiększa (rys. 8), przy czym zmiany są większe dla pomiaru z pojedynczego okresu. Dlatego przy mniejszych wartościach amplitudy składowej przemiennej prędkości mniejszy błąd uzyskujemy w metodzie wykorzystującej jeden okres, przy większych wartościach – w metodzie z dwoma okresami.



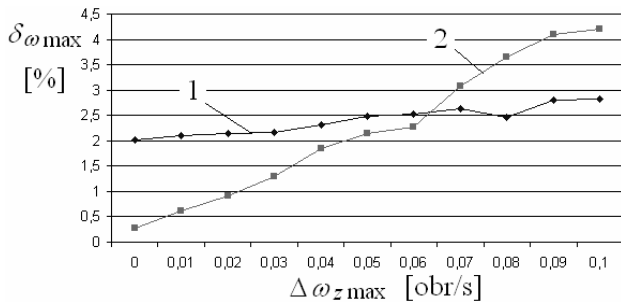
Rys. 8. Maksymalny błąd względny w funkcji ω_m dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $\Delta\omega_{zmax} = 0,05$ obr/s, $C_e = 500$, $f_g = 20$ MHz; pomiar z: 1 – pojedynczego okresu, 2 – dwóch okresów



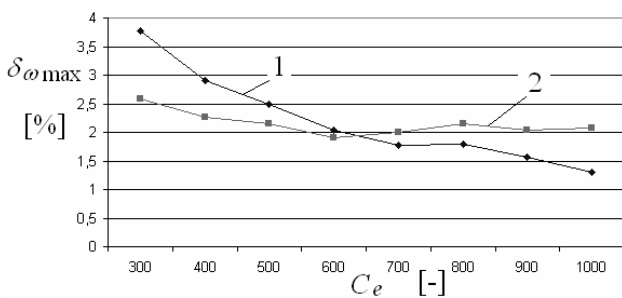
Rys. 9. Maksymalny błąd względny w funkcji f_p dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $\omega_m = 2$ obr/s, $\Delta\omega_{zmax} = 0,05$ obr/s, $C_e = 500$, $f_g = 20$ MHz; pomiar z: 1 – pojedynczego okresu, 2 – dwóch okresów

Przy wzroście częstotliwości składowej przemiennnej prędkości błąd się zwiększa dla pomiaru z pojedynczego okresu (rys. 9). Dla metody z dwoma okresami częstotliwość składowej przemiennnej prędkości nie wpływa na wartość błędu. Dlatego przy mniejszych wartościach częstotliwości składowej przemiennnej prędkości mniejszy błąd uzyskujemy w metodzie wykorzystującej jeden okres, przy większych wartościach – w metodzie z dwoma okresami.

Ze wzrostem wartości składowej losowej prędkości błąd się zwiększa (rys. 10), przy czym zmiany są większe dla pomiaru z dwóch okresów. Dlatego przy mniejszych wartościach składowej losowej prędkości mniejszy błąd uzyskujemy w metodzie wykorzystującej dwa okresy, przy większych wartościach – w metodzie z jednym okresem.



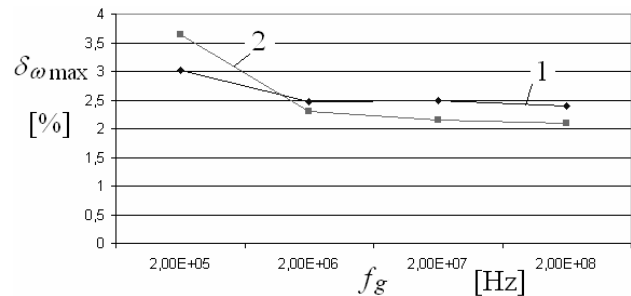
Rys. 10. Maksymalny błąd względny w funkcji $\Delta\omega_{z\max}$ dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $\omega_m = 2$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $C_e = 500$, $f_g = 20$ MHz; pomiar z: 1- pojedynczego okresu, 2 - dwóch okresów



Rys. 11. Maksymalny błąd względny w funkcji C_e dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $\omega_m = 2$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $\Delta\omega_{z\max} = 0,05$ obr/s, $f_g = 20$ MHz; pomiar z: 1- pojedynczego okresu, 2 - dwóch okresów

Dla większej rozdzielczości enkodera C_e błąd się zmniejsza (rys. 11), przy czym zmiany są większe dla pomiaru z pojedynczego okresu. Dlatego przy mniejszych wartościach C_e mniejszy błąd uzyskujemy w metodzie wykorzystującej dwa okresy, przy większych wartościach – w metodzie z jednym okresem.

Ze wzrostem częstotliwości generatora wzorcowego błąd się zmniejsza (rys. 12), przy czym zmiany są większe dla pomiaru z dwóch okresów. Dlatego przy mniejszych wartościach częstotliwości generatora mniejszy błąd uzyskujemy w metodzie wykorzystującej jeden okres, przy większych wartościach – w metodzie z dwoma okresami.



Rys. 12. Maksymalny błąd względny w funkcji f_g dla $\omega_0 = 10$ obr/s, $\omega_m = 2$ obr/s, $f_p = 50$ Hz, $\Delta\omega_{z\max} = 0,05$ obr/s, $C_e = 500$; pomiar z: 1- pojedynczego okresu, 2 - dwóch okresów

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione w artykule wyniki analiz wykazały, że wybór metody cyfrowego pomiaru prędkości na podstawie sygnału z przetwornika obrotowo-impulsowego nie jest jednoznaczny. Na wartość błędu pomiaru wpływają parametry mierzonej prędkości (składowa stała, amplituda i częstotliwość składowej przemiennnej, składowa losowa), a także parametry układu pomiarowego (rozdzielczość przetwornika obrotowo-impulsowego i częstotliwość generatora wzorcowego). W zależności od wartości tych parametrów, mniejszą wartość błędu można uzyskać przy pomiarze z wykorzystaniem pojedynczego przedziału międzyimpulsowego lub z ekstrapolacji z dwóch ostatnich przedziałów międzyimpulsowych.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Świsulski D.: Metody równoczesnej akwizycji w systemach z napięciowymi i częstotliwościowymi torami pomiarowymi, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10b/2012, s. 29-31.
2. Świsulski D., Referowski L.: Simulation of incremental encoder signals, Przegląd Elektrotechniczny, nr 6/2009, s. 87-89.
3. Świsulski D.: Effect of the incremental encoder's errors while measuring the angular velocity, Proceedings XIV IMEKO World Congress, 1-6 June 1997, Tampere, Finland, vol. 8, Topic 14, s. 222-227.

ERRORS OF ROTATIONAL SPEED DIGITAL ACQUISITION USING INCREMENTAL ENCODER

In this paper the principle of incremental encoder applied to rotational speed measurement is presented. Methods for processing of frequency-modulated pulse signal from incremental encoder are presented. In measurements on-line measured value is determined based on the position of pulses preceding the moment of measurement. Describes the method by which the measured value is determined from the last period and the method by which the measured value is determined from extrapolation from two last periods. It has been proven that for a sinusoidal changes of rotational speed the method by which we obtain a lower value of measurement error, depending on changes in speed (constant component, the amplitude and frequency of variable component, the component of random) and measurement parameters (number of pulses from incremental encoder in one rotation, frequency of standard generator).

Keywords: rotational speed measurement, incremental encoder, on-line measurement of pulse signal.