

## POMIAR PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ Z UŻYCIEM SPECJALIZOWANEGO INTERFEJSU ENKODERA KWADRATUROWEGO

Marek KUCIŃSKI<sup>1</sup>, Leszek JARZĘBOWICZ<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
tel: 790 457 300 e-mail: marek@kucinski.eu
2. Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
tel: 58 347 21 49 e-mail: l.jarzebowicz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Przedstawiono metodę pomiaru prędkości kątowej z użyciem enkodera kwadraturowego i procesora sygnałowego TMS320F28335 wyposażonego w interfejs enkoderowy eQEP. Omówiono budowę i zasadę działania optoelektronicznego enkodera kwadraturowego. Opisano dwie podstawowe metody enkoderowego pomiaru prędkości kątowej, wskazano ich ograniczenia. Zaproponowano połączenie podstawowych metod, uzyskując metodę łączoną odznaczającą się dużą dokładnością w szerokim zakresie prędkości kątowych. Omówiono moduł enkoderowy eQEP. Przedstawiono sposób doboru parametrów metody uwzględniający ograniczenia procesora oraz rozdzielczość zastosowanego enkodera. Przedstawiono sposób oprogramowania metody w procesorze.

**Słowa kluczowe:** pomiar prędkości kątowej, procesor sygnałowy, enkoder kwadraturowy

### 1. WPROWADZENIE

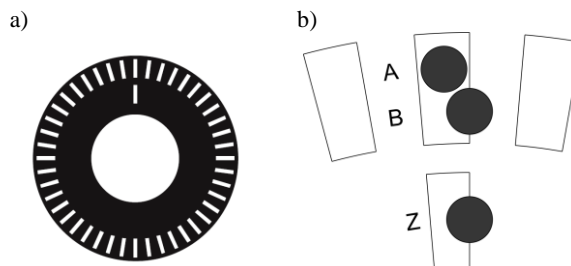
Enkoder kwadraturowy jest powszechnie stosowanym przetwornikiem położenia i prędkości – zarówno liniowej jak i kątowej – na cyfrowy sygnał elektryczny [1, 2]. Dzięki szerokiej gamie typów tych przetworników, znajdują one zastosowanie zarówno w tanich, jak i specjalizowanych układach.

Popularność enkoderów spowodowała, że producenci urządzeń mikroprocesorowych dedykowanych do sterowania napędami często wyposażają je w specjalizowane licznikowe interfejsy enkoderowe. Przykładem takiego urządzenia jest procesor sygnałowy TMS320F28335 [3] dedykowany do sterowania napędami elektrycznymi, który zawiera moduł enkoderowy eQEP (ang. *Enhanced Quadrature Encoder Pulse*) [4]. Dzięki specjalizowanemu modułowi sterownika napędu obsługa programowa położeniowego i prędkościowego sprzężenia zwrotnego jest znacznie uproszczona. Po umiejętnym skonfigurowaniu rejestrów procesora moduł eQEP, działając niezależnie od zasadniczego programu sterowania, na bieżąco uaktualnia wartość położenia w rejestrze licznikowym. Moduł eQEP udostępnia także wiele funkcji przydatnych do pomiaru prędkości oraz zapewnia sygnalizację błędów.

W referacie omówiono problematykę enkoderowego pomiaru prędkości przy użyciu procesora TMS320F28335 w zastosowaniu do układów napędowych o precyzyjnie regulowanej prędkości. Tego typu napędy, pracujące np. w maszynach roboczych, wymagają precyzyjnego sprzężenia od wielkości mechanicznych w szerokim zakresie pracy. Potrzeba ta wiąże się z użyciem różnych metod pomiaru prędkości, przełączanych zależnie od zakresu pomiarowego. W referacie przedstawiono ideę oraz sposób implementacji stosunkowo prostej, lecz skutecznej metody pomiaru.

### 2. ZASADA DZIAŁANIA ENKODERA OPTOELEKTRONICZNEGO

Podstawowymi elementami optoelektronicznych enkoderów przyrostowych [1, 4] są: tarcza kodowa oraz elementy optoelektroniczne. Tarcza, osadzona na wale enkodera, wykonana jest najczęściej ze szkła. Na tarczy naniesione są nieprzezroczyste paski rozmieszczone na obwodzie okręgu. Szerokość pasków jest równa odległości między nimi (p. rys. 1a).



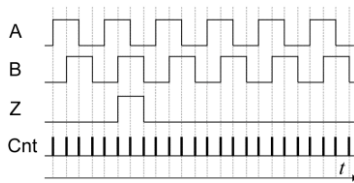
Rys. 1. Budowa enkodera kwadraturowego: a) układ pasków na tarczy [4]; b) rozmieszczenie fotoodbiorników A, B, Z

Po przeciwległych stronach tarczy, na wysokości ścieżki, umieszczone są elementy optoelektroniczne – z jednej strony fotonadajniki (diody LED), z drugiej dwa fotoodbiorniki, przesunięte względem siebie o połowę szerokości nieprzezroczystego paska, jak pokazano to na

rysunku 1b. Tarcza, obracając się, przesłania lub odsłania fotonadajniki względem poszczególnych fotoodbiorników.

Dzięki przesunięciu fotoodbiorników względem siebie możliwe jest określenie kierunku obrotów. Przy ruchu tarczy zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara promień świetlny odsłaniający lub zasłaniający jest najpierw względem fotoodbiornika A, a następnie względem fotoodbiornika B. Skutkuje to odpowiednią kolejnością występowania sygnałów wyjściowych A, B enkodera, sekwencję których przedstawiono na rys. 2.

W przypadku przeciwnego kierunku obrotów tarczy, kolejność występowania zboczy jest odwrotna.



Rys. 2. Przebiegi sygnałów wyjściowych enkodera A, B, Z oraz sygnał układu wykrywającego zbocza Cnt – przy kierunku obrotów zgodnym z ruchem wskazówek zegara

Zliczanie impulsów sygnałów A i B nie pozwala na określenie absolutnego położenia kąowego, a jedynie na śledzenie jego przyrostów. W celu wyeliminowania tej niedogodności enkodery przyrostowe wyposażone są w dodatkową ścieżkę oraz parę elementów optoelektronicznych (rys. 1). Na ścieżce naniesiony jest pojedynczy pasek, zatem sygnał wyjściowy Z ma postać jednego impulsu na obrót tarczy. Sygnał Z (spotyka się także oznaczenia: Index, Zero, Marker) używany jest do określenia tzw. pozycji bazowej. Zliczając impulsy sygnałów A i B od pozycji bazowej, można określić bezwzględne położenie kąowe.

Częstotliwość impulsów generowanych przez enkoder jest wprost proporcjonalna do prędkości kąowej, a przy stałej prędkości kąowej wypełnienie przebiegów A i B wynosi 0,5.

W celu zwiększenia dokładności pomiaru położenia stosuje się zliczanie wszystkich zboczy sygnałów wyjściowych A i B enkodera (rys. 2). Pozwala to zwiększyć rozdzielczość pomiaru położenia kąowego czterokrotnie, względem metody zliczania impulsów sygnału A (lub B). Najmniejsza rozróżnialna zmiana położenia kąowego nazywana jest inkreментом.

Najprostszym przykładem zastosowania enkodera kwadraturowego jest kulkowa myszka komputerowa. Wykrywany jest w niej obrót kulki w dwóch osiach. Stosowane są zawsze dwa fotoodbiorniki, co umożliwia interpretację kierunku obrotu.

### 3. METODY WYZNACZANIA PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ

Obliczanie prędkości kąowej możliwe jest na podstawie przyrostu zmian położenia kąowego w czasie:

$$\omega_k = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T_k - T_{k-1}} \quad (1)$$

gdzie:  $\omega_k$  – prędkość kąowa obliczona w chwili  $k$ ;  
 $\theta_k, \theta_{k-1}$  – położenie kąowe odpowiednio: w chwili  $k$  oraz  $k-1$ ;  
 $T_k, T_{k-1}$  – chwile:  $k$  oraz  $k-1$

Wybór konkretnej metody pomiaru jest podyktowany założonym zakresem prędkości kąowych pracy urządzenia.

Dla relatywnie dużych prędkości stosuje się metodę wyznaczania przyrostu położenia kąowego  $\Delta\theta_p$  w stałym okresie  $\Delta T = \text{const}$ . Okres ten jest zazwyczaj równy okresowi realizacji algorytmu sterowania lub jego wielokrotności. Natomiast przy niewielkich prędkościach kąowych preferowana jest metoda pomiaru czasu  $\Delta T_p$  realizacji założonego stałego przesunięcia kąowego  $\Delta\theta = \text{const}$ , wynoszącego zwykle jeden lub kilka inkrementów.

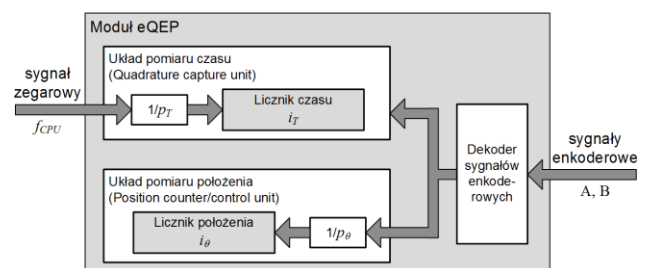
Dokładność metody ze stałym oknem czasowym rośnie wraz z prędkością. Wynika to z faktu, iż rozdzielczość pomiaru położenia wynosi jeden inkrement. Przy niskich prędkościach zliczenie (lub nie) tego impulsu ma znaczny wpływ na dokładność odczytanej prędkości kąowej.

Dokładność metody wykorzystującej pomiar czasu rośnie ze zmniejszaniem prędkości kąowej. Pomiar czasu w procesorze sygnałowym realizowany jest poprzez odczyt stanu licznika zliczającego impulsy zegarowe. Mniejsza prędkość odpowiada większej wartości licznika, co przekłada się na mniejszy błąd względny pomiaru czasu. Jednakże prędkość nie może zmniejszyć się poniżej pewnego progu wynikającego z poczynionych przez programistę założeń. Ograniczeniem jest tu pojemność licznika zliczającego impulsy czasowe. Przy bardzo niskiej prędkości kąowej licznik może się przepełnić, co uniemożliwia wykonanie obliczeń. W takim wypadku przyjmuje się prędkość kąową równą zero. Innym czynnikiem determinującym dolny limit pomiaru prędkości jest okres realizacji algorytmu pomiaru prędkości kąowej. Przy zbyt małej prędkości zmiana położenia w tym okresie może być mniejsza niż założona  $\Delta\theta = \text{const}$ .

Dwie opisane metody charakteryzują się dobrą dokładnością w różnych zakresach prędkości. Ich połączenie pozwala zatem na uzyskanie precyzyjnego pomiaru w szerokim zakresie prędkości kąowych.

### 4. DOBÓR PARAMETRÓW ALGORYTMU POMIARU PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ

Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony schemat funkcjonalny modułu eQEP [4].



Rys. 3. Uproszczony schemat funkcjonalny modułu eQEP procesora sygnałowego TMS320F28335

W module eQEP można wyróżnić dwa zasadnicze bloki funkcjonalne. Pierwszy z nich służy do pomiaru czasu. Drugi blok funkcjonalny jest przeznaczony do wyznaczania bieżącego położenia kąowego. W module eQEP występują dzielniki częstotliwości sygnałów cyfrowych tzw. preskalery. Współczynniki (krotności)

preskalerów konfiguruje się przy użyciu odpowiednich rejestrów sterujących.

W tabelicy 1 wyszczególniono podstawowe założenia wynikające z parametrów wykorzystanego sprzętu oraz wymogów zastosowania algorytmu pomiaru prędkości.

Tabela 1. Zestawienie danych wejściowych do doboru parametrów algorytmu pomiaru prędkości

$T = 10 \text{ ms}$	Okres pracy algorytmu pomiaru prędkości
$f_{CPU} = 144 \text{ MHz}$	Częstotliwość taktowania procesora sygnałowego
$n = 10000 \text{ inkr./obr.}$	Rozdzielczość enkodera (po 4-krotnym zwielokrotnieniu)
$\omega_{min} = 0,6 \text{ rad/s}$	Minimalna mierzona prędkość kątowa (dla założonego zastosowania)
$\omega_{max} = 1000 \text{ rad/s}$	Maksymalna mierzona prędkość kątowa (dla założonego zastosowania)
$r_t = 2^{16}$	Pojemność licznika służącego do pomiaru czasu
$r_\theta = 2^{32}$	Pojemność licznika służącego do pomiaru położenia kątowego

Przyjęto stały okres pracy  $T$  algorytmu pomiaru prędkości. W niektórych zastosowaniach stosuje się zmienny okres, dostosowany do bieżącej wartości prędkości kątowej. Odpowiedni dobór okresu pozwala uzyskać wysoką częstotliwość pomiaru przy dużych prędkościach, a jednocześnie umożliwia pomiar małych prędkości kątowych.

W metodzie pomiaru czasu między inkrementami, tarcza enkodera podczas okresu  $T$  wykonuje założone przesunięcie kątowe  $l$ , przy najmniejszej przyjętej prędkości kątowej  $\omega_{min}$ . Wartość stałego przesunięcia kątowego  $l$  wyrażona w inkrementach musi zatem spełniać warunek:

$$l \leq \omega_{min} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \cdot \frac{n}{2\pi} \cdot T \cong 9,5 [\text{inkr.}] \quad (2)$$

Należy przyjąć wartość  $l = 8$ , dla której najmniejsza mierzalna prędkość kątowa wynosi  $\omega_{min} \cong 0,5 \text{ rad/s}$ .

Wybór mniejszej wartości  $l$  pozwoliłby na pomiar małych prędkości kątowych. Należy jednak podkreślić, że stałe przesunięcie kątowe  $l$  nie może być dowolnie małe z uwagi na ograniczoną precyzję wykonania tarczy enkodera (nierównomierne naniesienie pasków). Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły, że wartość  $l \geq 8$  jest dla wykorzystywanego enkodera wystarczająca dla uzyskania dużej precyzji pomiaru prędkości.

Licznik czasu jest taktowany zegarem systemowym  $f_{CPU}$  podzielonym przez układ programowanego preskalera. Stałą preskalera  $p_T$  należy dobrać tak, aby licznik nie przepelniał się w czasie  $T$ :

$$p_T \geq \frac{T \cdot f_{CPU}}{r_t} \cong 22 \quad (3)$$

Z dostępnych w procesorze wartości  $p_T$  [4] należy wybrać najbliższą nie mniejszą od obliczonej:  $p_T = 32$ .

Przy najmniejszej zakładanej prędkości  $\omega_{min}$  liczba impulsów enkodera zliczona w czasie  $T$  nie powinna być mniejsza niż  $l$ :

$$l \geq \omega_{min} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \cdot \frac{n}{2\pi} \cdot T \quad (4)$$

Dla obranych powyżej założeń warunek (4) jest spełniony.

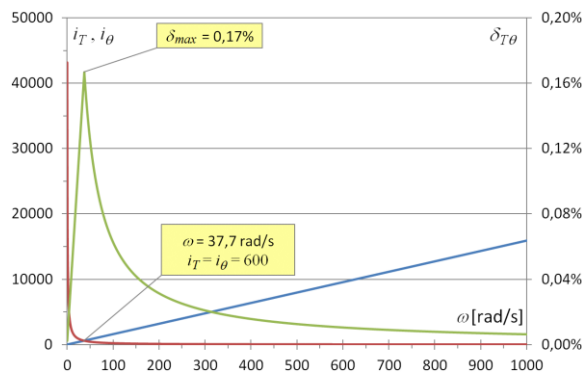
Przy dużych prędkościach kątowych licznik wskazujący położenie nie może zmienić stanu o więcej niż  $r_\theta$  w czasie  $T$ . Warunek ten determinuje wartość stałej preskalera  $p_\theta$ :

$$p_\theta \geq \frac{\omega_{max} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \cdot \frac{n}{2\pi} \cdot T}{r_\theta} \cong 3,7 \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

Z dostępnych w procesorze wartości  $p_\theta$  [4] należy wybrać najbliższą nie mniejszą od obliczonej:  $p_\theta = 1$ .

W celu uzyskania dobrej dokładności pomiaru prędkości w całym założonym zakresie należy przyjąć odpowiednią wartość progową  $\omega_p$  prędkości kątowej, przy której nastąpi zmiana metody pomiaru.

Założono, błędy względne pomiaru prędkości kątowej obiema metodami będą równe, gdy wartości odczytane odpowiednio: z licznika czasu  $i_T$  i licznika położenia kątowego  $i_\theta$  będą takie same. Zależność stanu liczników od prędkości kątowej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zależność wartości licznika czasu  $i_T$  i położenia kątowego  $i_\theta$  oraz błęd  $\delta_T$  i  $\delta_\theta$  łącznej metody pomiaru prędkości w funkcji prędkości kątowej

Wartości rozważanych liczników zrównują się przy prędkości kątowej  $\omega_p = 37,7 \text{ rad/s}$ . Przyjęcie tej wartości jako progowej zapewnia błąd względny pomiaru prędkości kątowej, nie większy niż  $\delta_{max} = 0,17\%$ .

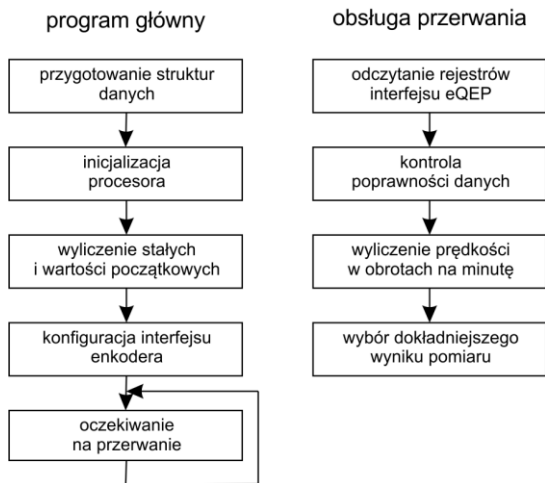
Wartość prędkości progowej można obliczyć analitycznie przy użyciu wzoru:

$$\omega_p \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \cdot \frac{n \cdot T}{2\pi} = \frac{f_{CPU}}{p_T} \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\omega_p \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \cdot n} \quad (6)$$

## 5. IMPLEMENTACJA PROGRAMOWA

Kod źródłowy programu procesora DSP oparto na programie producenta „Eqep\_pos\_speed” dołączonym do środowiska uruchomieniowego „CodeComposer Studio” [3].

Algorytm działania programu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Algorytm programu głównego i podprogramu obsługi przerwania

Algorytm składa się z dwóch zasadniczych części: programu głównego oraz podprogramu obsługi przerwania zgłaszanego przez interfejs enkodera.

W bloku głównym zadeklarowane zostały struktury danych, które zostały wykorzystane podczas implementacji metody. Odpowiada on również za poprawną inicjalizację procesora (m.in. wypełnienie tablicy wektorów przerwania). Kluczowym elementem jest konfiguracja interfejsu enkodera eQEP. Ostatnim elementem bloku głównego jest pętla oczekująca na przerwanie. Od tego momentu cały algorytm realizowany jest w procedurach przerwania.

Podprogram obsługi przerwania nie jest rozbudowany. Odczytuje on dane wykorzystywane do wyliczania prędkości kątowych z rejestrów procesora. Następnie dokonywana jest kontrola poprawności danych w metodzie pomiaru czasu. Jest to ułatwione dzięki wbudowanemu modułowi sygnalizacji przepełnienia bufora oraz flagom statusowym. Jeżeli nie zostanie wykryta żadna nieprawidłowość zwracana jest prędkość kątowa zmierzona jedną z metod – wybór dokonywany jest na podstawie algorytmu przedstawionego w punkcie 4. Koniec procedury obsługi przerwania zawiera

wyzerowanie flag jego wystąpienia oraz potwierdzenie poprawnej obsługi.

Procesor TMS320F28335 zawiera podwójny interfejs enkodera eQEP, a także 6 komplementarnych wyjść PWM oraz 16 kanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy. Wykorzystanie tych komponentów pozwala na równoczesne sterowanie dwoma napędami w sposób całkowicie niezależny. Zwiększa to obszar zastosowań wykorzystanego procesora i prezentowanej metody.

## 6. PODSUMOWANIE

Zastosowanie prezentowanej metody pozwala na pomiar prędkości kątowej z dużą dokładnością  $\delta_{T\theta} < 0,2\%$  w całym założonym zakresie pomiarowym – od 0,6 do 1000 rad/s przy zastosowaniu niedrogiego enkodera o rozdzielczości 2500 impulsów na obrót.

Zapewnienie wymaganej dokładności metody łączonej wymaga uważnego doboru stałych algorytmu pomiarowego oraz umiejętnej konfiguracji procesora. Dla bardzo małych prędkości wymagane może być zastosowanie bardziej zaawansowanych metod [5].

Przedstawione w referacie zależności matematyczne można wykorzystać do obliczenia stałych algorytmu z uwzględnieniem ograniczeń procesora oraz enkodera, ale także np. do doboru rozdzielczości enkodera odpowiedniej dla spełnienia wymogów konkretnego zastosowania.

Omówiona łączona metoda pomiaru nie wymaga dużej mocy obliczeniowej procesora, co predestynuje ją do zastosowania w szerokim zakresie aplikacji.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Toliyat A. H., Campbell S.: DSP-based Electro-mechanical Motion Control, USA CRC Press 2004, ISBN 0-8493-1918-8
2. Drury B.: The Control Techniques Drives and Controls Handbook, London The Institution of Electrical Engineers 2001, ISBN 0-85296-793-4
3. Texas Instruments: Getting Started With TMS320C28x Digital Signal Controllers, Application Report, TI 2007
4. Texas Instruments: TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module, Reference Guide, TI 2008
5. Brock S., Zawirski K.: Improved digital speed measurement method, Electrical Drives and Power Electronics International Conference, Slovakia, 1999

## ANGULAR VELOCITY MEASUREMENT USING DEDICATED QUADRATURE ENCODER INTERFACE

**Key-words:** digital signal processor, quadrature encoder, speed measurement

The paper describes angular velocity measurement method using quadrature encoder and TMS320F28335 processor equipped with eQEP interface. Optoelectronic quadrature encoder principle of operation is reminded. Two basic methods of angular velocity measurement are discussed and their limitations are emphasized. Mixed angular velocity measurement method is proposed to achieve good measurement accuracy in wide speed range. The eQEP interface is presented. The equations and guide for parameter calculation which takes into consideration processor limitations and encoder resolution are included. Implementation of the method in the processor is discussed.