

Nr 98/2017, 83–90
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

SZYBKA ESTYMACJA POŁOŻENIA POCZĄTKOWEGO WAŁU SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI IPMSM

FAST INITIAL POSITION OF THE SHAFT PERMANENT MAGNET MOTOR IPMSM

Andrzej Kasprowicz^{1*}, Mateusz Tocha²

¹ Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: a.kasprowicz@we.am.gdynia.pl

² Awilco LNG, P.O.Box 1583 Vika, NO-0118 Oslo, Norway, e-mail: tocha.mateusz@gmail.com

* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę szybkiej estymacji początkowego położenia wału wirnika silnika z magnesami trwałymi IPMSM. Wykorzystano do tego celu efekt anizotropii magnetycznej obwodu wirnika, wynikającej z zainstalowania magnesów trwałych. Wymagany do prawidłowej pracy ciągły pomiar położenia i prędkości obrotowej wału silnika wykonywany jest za pomocą enkodera przyrostowego (ang. *incremental encoder*). Wyznaczone położenie początkowe wirnika jest uwzględniane w trakcie pierwszego obrotu wału silnika jako ustalone przesunięcie początkowe. Pozwala to na uzyskanie pełnego momentu elektromagnetycznego silnika już po jednym obrocie wału, w którego trakcie występuje pierwszy impuls indeksu z enkodera. Umożliwia to pewny start układu napędowego bez początkowego przypadkowego ruchu wstecznego silnika.

Słowa kluczowe: rozruch, enkoder inkrementalny, estymacja, sterowanie wektorowe, silnik IPMSM.

Abstract: The article presents the method and results of experimental research on an algorithm of the instant estimation of an initial position of the rotor of the permanent magnet motor. It is part of the design of highly dynamic controlled AC drive. Estimation and drive control algorithm has been implemented in the driver of the new generation signal microcontroller TMS320F28335 of Texas Instrument. It was written in C. The algorithm has proved itself in a model system of the drive. The estimation of the initial position of the shaft of the permanent magnet motor helped to reduce the cost and complexity of the drive system. Thanks to it, a cheaper and more convenient to use incremental encoder could be used. Without the estimation, however, it did not ensure the initial position of the rotor, required to proper start and work of the motor.

Keywords: start-up, incremental encoder, estimation, vector control, motor IPMSM.

1. WSTĘP

W chwili obecnej w obszarze napędów prądu przemiennego dużą popularnością cieszą się silniki z magnesami trwałymi. Popularność są zawdzięczają bardzo dobrym właściwościom napędowym. Charakteryzują się one stosunkowo wysoką sprawnością, dużą przeciążalnością momentem, wysoką wartością współczynnika gęstości mocy, szerokim zakresem prędkości obrotowych, małym momentem bezwładności oraz wysokim momentem obrotowym w stosunku do momentu bezwładności [Bodora i in. 2014; Biskup 2012].

Wyróżnia się tutaj silniki z trapezoidalną SEM (BLCD) oraz z sinusoidalną SEM (PMSM). Silniki PMSM mogą mieć magnesy trwałe umieszczone zarówno na powierzchni wirnika, jak i w specjalnych szczelinach wyciętych w wirniku. To drugie rozwiązanie wprowadza anizotropię obwodu magnetycznego silnika. Silniki z magnesami trwałymi wymagają do pracy informacji o aktualnym położeniu wirnika względem uzwojeń fazowych stojana. W silnikach BLDC powszechnie wykorzystuje się czujniki Halla. Za ich pomocą określany jest sektor położenia wału. W przypadku silników PMSM stosuje się resolwery lub enkodery. Wyróżnia się dwa typy enkoderów: absolutny oraz inkrementalny. Tańszym i wygodniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie enkodera inkrementalnego. Podstawową wadą tego rozwiązania jest jednak brak informacji o początkowym położeniu wału silnika. W związku z powyższym, podczas startu napędu i synchronizacji pól może to prowadzić do niezamierzonego początkowego ruchu wstecznego wału silnika. W przypadku np. napędu samochodu z silnikiem elektrycznym z magnesami trwałymi stwarza to duże zagrożenie w ruchu. W celu zabezpieczenia się przed taką ewentualnością stosuje się różne metody wyznaczania początkowego położenia wirnika, które jest uwzględniane w procesie rozruchu. Jak wcześniej wspomniano, występująca w niektórych wykonaniach silnika PMSM anizotropia magnetyczna daje właśnie taką możliwość [Schmidt i in. 1997].

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami sterowania silnikami PMSM są metody wektorowe: FOC (*Field Oriented Control* – Sterowanie polowo zorientowane) oraz DTC (*Direct Torque Control* – Bezpośrednie sterowanie momentem). Wykorzystują one informację o bieżącym kącie położenia wirnika do sterowania falownikiem, która stanowi również podstawę transformacji sygnałów sterowania wektorowego. Poza tym metody te wymagają pełnej synchronizacji impulsów z aktualnym położeniem wirnika silnika. Dotyczy to całego zakresu sterowania prędkością obrotową silnika łącznie z fazą rozruchu [Tursini, Petrella i Parasiliti 2003].

2. ESTYMACJA POŁOŻENIA POCZĄTKOWEGO WIRNIKA

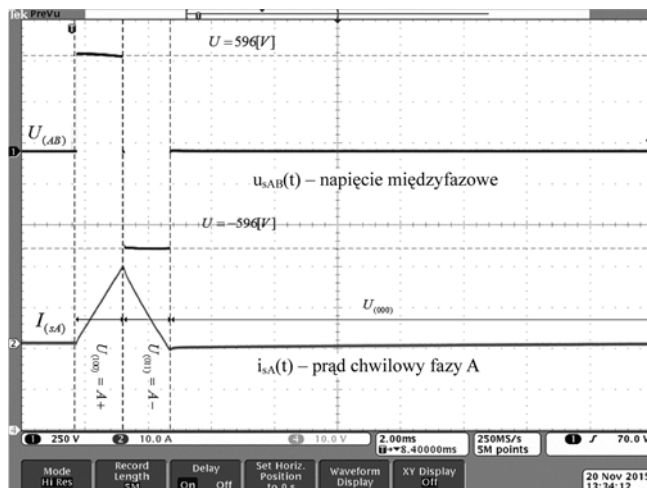
Istotnym elementem algorytmu FOC jest informacja o aktualnym położeniu wirnika silnika. Do tego celu w układach napędowych stosuje się czujniki położenia, takie jak enkodery absolutne, przyrostowe (ang. *incremental encoder*), resolwery oraz algorytmy estymujące położenie w układach bezczujnikowych (ang. *sensorless*). Niestety, tylko resolwery oraz enkodery absolutne dostarczają informacji o położeniu wirnika w chwili startu napędu. Rozwiązania z tego typu czujnikami znacznie jednak podnoszą koszt całego układu napędowego.

Układy napędowe z enkoderem przyrostowym wymagają dodatkowego wyznaczenia początkowej pozycji wirnika w celu optymalnego sterowania silnikiem już w chwili rozruchu. Spośród znanych metod estymacji początkowego położenia wirnika można wyróżnić takie, które wymagają ruchu maszyny oraz takie, które pozwalają na wyznaczenie położenia w spoczynku [Bodora i in. 2014; Biskup 2012; Jarzębowicz 2012; Schmidt i in. 1997; Tursini, Petrella i Parasiliti 2003].

Jedną z metod estymacji początkowego położenia wirnika jest stosowanie specjalnej sekwencji sygnałów testowych [Bodora i in. 2014; Biskup 2012]. Zaletą tej metody jest szybkość oraz brak ruchu wirnika podczas sekwencji sygnałów. Stosowanie jej jest wymagane jedynie podczas uruchamiania układu napędowego. W trakcie pracy układu informacja o położeniu wirnika jest na bieżąco pobierana z enkodera do momentu wyłączenia lub restartu mikroprocesora sterującego.

Powyższa estymacja wykorzystuje w swym działaniu efekt nieliniowości obwodu magnetycznego silnika. Stałe napięcie doprowadzone do uzwojenia fazy stojana wywołuje przepływ prądu o wartości silnie zależnej od położenia magnesu trwałego, czyli anizotropii obwodu magnetycznego wirnika, oraz długości trwania impulsu testującego [Jarzębowicz 2012]. Impulsy testujące obejmują wszystkie wektory aktywne, jakie mogą być zrealizowane w falowniku dwupoziomowym. Podczas testu do zasilanej fazy, po aktywnym wektorze napięcia, zostaje podany wektor o kierunku przeciwnym. W ten sposób narastający impuls prądu zostaje wygaszony. Przy odpowiednio dobranej długości impulsu testowego obwód magnetyczny wchodzi głęboko w nasycenie. W trakcie generowania impulsów testowych, w poszczególnych fazach dokonuje się pomiarów prądu – dokładnie w szczycie odpowiedzi prądowej testowanej fazy. Końcowa faza impulsu testowego polega na doprowadzeniu układu do stanu quasi-ustalonego. W tej fazie testu zadawany jest tylko wektor zerowy. Test umożliwia rozpoznanie aktualnej biegunowości magnesu trwałego przechodzącego pod zasilaną fazą.

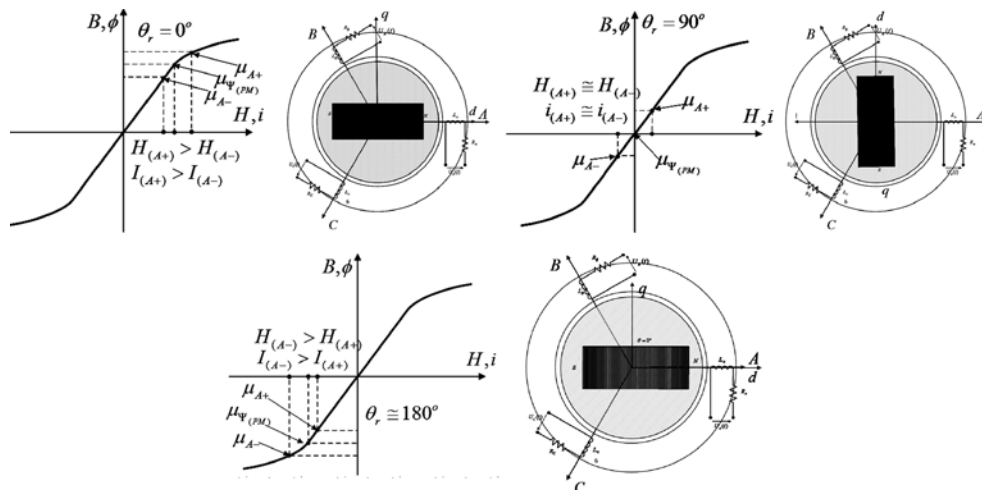
Stosowany impuls testowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowy impuls testujący wraz z odpowiedzią prądu w fazie A

Fig. 1. Example of testing impulse with current respond in phase A

Na rysunku 2 przedstawiono interpretację graficzną testu, przy różnych kątach położenia wirnika z magnesami.



Rys. 2. Punkty pracy na krzywej magnesowania dla kątów położenia wirnika 0° , 90° , 180°

Fig. 2. Points work on the magnetization curve for the angle position of rotor 0° , 90° , 180°

W pierwszym przypadku, po podaniu dodatniego wektora napięcia $A_+(U_{100})$ widoczne jest przesunięcie punktu pracy w obszar nasycenia. Wywołuje to szybkie narastanie prądu fazy oraz jego większą wartość szczytową. Podanie zaś wektora

przeciwnego $A_-(U_{011})$ skutkuje otrzymaniem niższej wartości szczytowej prądu znajdującej się w części liniowej. Istotą testu jest wyznaczenie różnic wartości szczytowych dla poszczególnych faz.

Generalnie, im różnica prądów testowych dla danej fazy jest większa, tym bliżej niej znajduje się magnes. Algorytm estymacji wymaga przeprowadzenia szeregu testów.

Stosowane wektory testowe zostały zebrane w tabeli 1.

Tabela 1. Sekwencja wektorów testowych

Table 1. The sequence of test vectors

Sekwencja wektorów testujących podczas estymacji					
1	A+	7	B+	13	C+
2	A-	8	B-	14	C-
3	U_{000}	9	U_{000}	15	U_{000}
4	A-	10	B-	16	C-
5	A+	11	B+	17	C+
6	U_{000}	12	U_{000}	18	U_{000}

Testy dla poszczególnych faz są przeprowadzane wielokrotnie, a otrzymane wartości są uśredniane. W każdym przypadku stosowane są pełne sekwencje testowe dla każdej fazy. Na podstawie otrzymanych wyników estymowana jest wartość kąta położenia wirnika według zależności (4,5,6). Wyznaczona wartość kąta jest uwzględniana w sterowaniu jako początkowe położenie wału silnika [Jarzębowicz 2012].

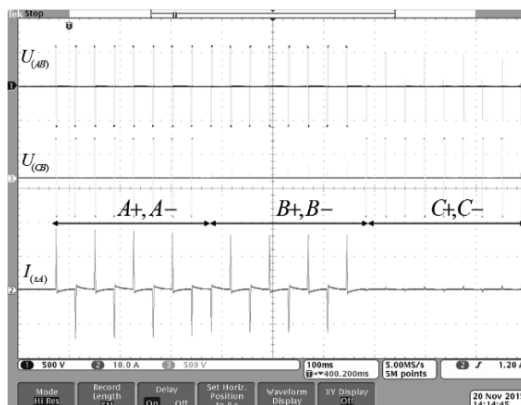
$$\Delta I_A = |I_{A+}| - |I_{A-}| \quad \Delta I_B = |I_{B+}| - |I_{B-}| \quad \Delta I_C = |-I_{A+} - I_{B+}| - |-I_{A-} - I_{B-}| \quad (4)$$

$$\Delta I_\alpha = \Delta I_A - (\Delta I_B + \Delta I_C) \sin 30^\circ \quad \Delta I_\beta = (\Delta I_B + \Delta I_C) \sin 60^\circ \quad (5)$$

$$\vec{\Delta I}_{\alpha\beta} = \Delta I_\alpha + j\Delta I_\beta \quad \hat{\theta}_s = \arctg\left(\frac{\Delta I_\beta}{\Delta I_\alpha}\right) \quad (6)$$

Wartość wyznaczonego w ten sposób kąta położenia wału używana jest do chwili pojawienia się pierwszego sygnału indeksu z enkodera. W tym momencie następuje wczytanie wartości stałego przesunięcia pomiędzy faktycznym kątem 0° – fazy A a punktem, w którym znajduje się indeks.

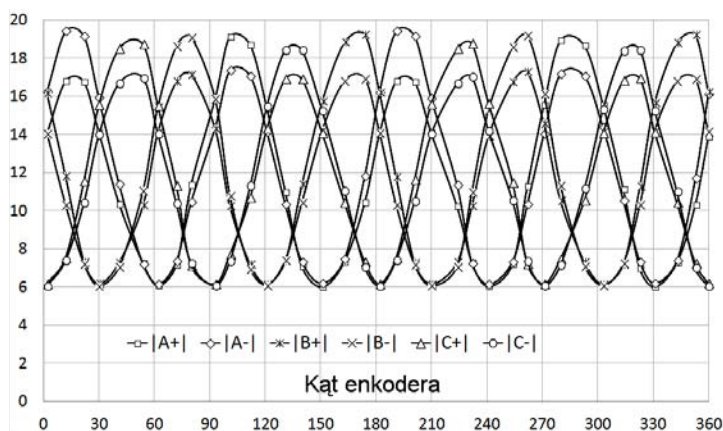
Na rysunku 3 przedstawiono cykl testowy, składający się z ośmiu pełnych sekwencji testowych dla każdej fazy silnika. Górny i środkowy przebieg obrazują napięcia międzyfazowe U_{AB} oraz U_{BC} silnika, a dolny – impulsy prądowe fazowe I_{sA} .



Rys. 3. Przebieg estymacji przy wykorzystaniu 8 impulsów dla każdej fazy

Fig 3. Estimation with 8 testing impulse in each phase

W trakcie badań wykonano pomiary prądów dla różnych kątów położenia wału w zakresie od 0° do 360° . Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 4.

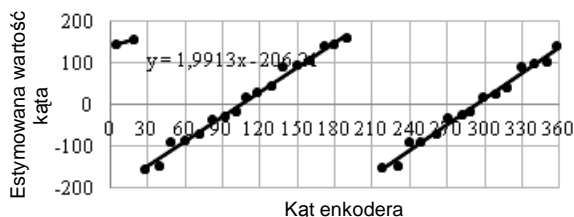


Rys. 4. Wartości prądów dla poszczególnych prób w funkcji kąta enkodera

Fig. 4. Encoder angles vs. values of current

Przebiegi dla testów (A_+ i A_-), (B_+ i B_-) oraz (C_+ i C_-) w zakresie liniowym charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego pokrywają się, natomiast wyraźne różnice przebiegów występują w zakresie nasycenia obwodu. Różnice są tym większe, im głębiej obwód magnetyczny wchodzi w nasycenie. Efekt nasycenia występuje przy dużych wartościach szczytowych prądu testującego. Z rysunku 4 wynika, że wartość maksymalną prąd szczytowy dla próby A_+ osiąga dla wartości kąta 110° . Tam też występuje największa różnica bezwzględnych wartości szczytowych prądu, co oznacza, że w tym miejscu występuje oś fazy A .

Na bazie przebiegów z rysunku 4 wykreślono zależność estymowanego kąta położenia wału silnika w funkcji jego położenia mechanicznego odczytanego z enkodera. Zależność ta została przedstawiona na rysunku 5. Uzyskana funkcja składa się z dwóch przebiegów, które są funkcjami liniowymi. Podwójny przebieg zależności wynika z liczby par biegunów silnika z magnesami trwałymi. Z otrzymanego wykresu można teraz odczytać kąt, jaki należy odjąć lub dodać jako stałe przesunięcie, aby wykres zależności przechodził przez początek układu.



Rys. 5. Estymowana wartość kąta położenia wału w funkcji kąta enkodera

Fig. 5. Estimated angle vs. encoder angle

W trakcie całego procesu estymacji wirnik silnika nie zmienia położenia, natomiast czas trwania procesu uzależniony jest od liczby stosowanych impulsów testowych. Dopiero po określeniu początkowego położenia wirnika następuje właściwy rozruch układu napędowego i osiągnięcie zadanej prędkości obrotowej. Proces estymacji wprowadza niewielkie opóźnienie zadziałania układu. Występuje ono jednokrotnie przy pierwszym uruchomieniu układu.

Na rysunku 6 przedstawiono proces uruchomienia układu napędowego.



Rys. 6. Rozruch maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi

Fig. 6. Start of PMSM with estimation algorithm

Po wstępnej fazie estymacji następuje właściwy rozruch. Silnik rusza z dużym przyśpieszeniem, osiągając zadaną prędkość obrotową praktycznie bez przeregulowań, co zostało zobrazowane na rysunku 6. Przebiegi prądu w stanie ustalonym mają charakter sinusoidalny. Algorytm estymacji był również uruchamiany ze zmniejszoną liczbą impulsów testowych do dwóch na fazę. Układ działał poprawnie.

3. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metodę i wyniki badań eksperymentalnych algorytmu szybkiej estymacji położenia początkowego wirnika silnika z magnesami trwałymi. Jest to część projektu regulowanego napędu prądu przemiennego o wysokiej dynamice. Algorytm estymacji i sterowania napędem został zaimplementowany w sterowniku z mikrokontrolerem sygnałowym nowej generacji TMS320F28335 firmy Texas Instrument. Został on napisany w języku C. Algorytm sprawdził się w układzie modelowym napędu. Estymacja położenia początkowego wału silnika z magnesami trwałymi pozwoliła na zmniejszenie kosztów i skomplikowania układu napędowego. Dzięki niej zastosowano tańszy i wygodniejszy w użyciu enkoder przyrostowy. Bez estymacji nie zapewniał on jednak określenia początkowego położenia wirnika silnika wymaganego do poprawnego startu i pracy.

LITERATURA

- Biskup, T., *Estymacja początkowego położenia wirnika silnika synchronicznego o magnesach trwałych PMSM*, 2012, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 88, nr 4a.
- Bodora, A., Biskup, T., Domoracki, A., Kołodziej, H., Paluszczak, D., 2014, *Wybrane zagadnienia realizacji metody estymacji położenia wirnika silnika PMSM*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 90, nr 9.
- Jarzębowicz, L., 2012, *Bezczujnikowe sterowanie trakcyjnym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi zagłębionymi w wirniku*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- Schmidt, P.B., Gasperi, M.L., Ray, G., Wijenayake, A.H., 1997, *Initial Rotor Angle Detection of a Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana, October 5–9.
- Tursini, M., Petrella, R., Parasiliti, F., 2003, *Initial Rotor Position Estimation Method for PM Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 6.