

Zastosowanie czujników fotooptycznych w torze pomiaru prędkości i położenia wirnika silnika BLDC

Streszczenie. Wykorzystanie silników BLDC, zamiast szczotkowych silników prądu stałego, poprawia parametry eksploatacyjne układu napędowego przy znaczącej redukcji kosztów jego obsługi serwisowej. Oprócz niewątpliwych korzyści związanych ze zredukowanymi do minimum czynnościami obsługowymi, napędy te charakteryzują się wyższą sprawnością. Zasada działania komutatora elektronicznego silnika BLDC opiera się na wykorzystaniu informacji o położeniu wirnika względem pola stojana, która zazwyczaj jest generowana przez układ obserwacji złożony z trzech dwustanowych czujników. Konieczność dokładnej kontroli prędkości i położenia sprawia, że w wymagających aplikacjach stosowany jest często dodatkowy element charakteryzujący się większą rozdzielczością określania położenia – enkoder. W toku prac prowadzonych nad poprawieniem właściwości dynamicznych układu napędowego drzwi kabinowych z wolnoobrotowym silnikiem BLDC, opracowana została metoda sterowania silnika wykorzystująca jedynie enkoder inkrementalny jako źródło informacji o położeniu wału silnika na podstawie której przeprowadzana jest komutacja tranzystorów, jak i precyzyjne określanie jego prędkości obrotowej.

Abstract. The use of BLDC motors instead of DC motors can significantly improve the technical parameters of such solutions, while reducing operating costs by replacing mechanical commutator - maintenance-free electronic commutator. This solution in addition to reducing maintenance of the drive, significantly increases the efficiency of the drive system. The essence of the BLDC motor control is the need for information on the position of the rotor BLDC motor by an electronic controller acts as a commutator. Providing accurate information on speed for demanding applications makes it necessary to use an additional component in measuring the speed of the motor - usually an incremental encoder. During the work on the improvement of the control parameters of the low-speed BLDC, motor control method that uses only an incremental encoder has been developed, the signal is used both to calculate the speed of the motor shaft and to use procedures developed, points BLDC motor commutation valves. (The use of an incremental encoder for speed measurement circuit and determining the rotor position of a BLDC motor).

Słowa kluczowe: silnik BLDC, enkoder inkrementalny.

Keywords: BLDC motor, incremental encoder.

doi:10.12915/pe.2014.04.39

Wstęp

Wymagania rynkowe dotyczące ograniczenia obsługowości urządzeń napędu elektrycznego, przy jednoczesnym poprawieniu parametrów ich pracy, skłania konstruktorów do sięgnięcia po nowoczesne struktury układów napędowych przy projektowaniu nowych, bądź modernizowaniu już istniejących rozwiązań. Tendencją taką można zauważyć w systematycznym zastępowaniu silników prądu stałego małej mocy przez silniki BLDC. Wykorzystanie silników BLDC w miejsce silników prądu stałego pozwala na znaczne polepszenie parametrów eksploatacyjnych takich rozwiązań, a zastąpienie wymagającego konserwacji komutatora mechanicznego – komutatorem elektronicznym oprócz ograniczenia obsługowości urządzenia, podnosi znacząco sprawność całego układu napędowego.

Stan obecny

Wysokie wymagania stawiane urządzeniom sprawiają, że w wielu aplikacjach konieczna jest realizacja sprzężenia zwrotnego, aby zapewnić odpowiednie właściwości regulacyjne prędkości wału silnika, a niekiedy nawet jego położenia. Stosowane na szeroką skalę silniki prądu stałego małej mocy, są sprzężone z maszyną roboczą za pośrednictwem przekładni mechanicznej redukującej obroty do pożądanej przez konstruktorów wartości. W większości urządzeń prądu stałego chęć minimalizacji kosztów skłania konstruktorów do wykorzystania prostego enkodera inkrementalnego, który już na etapie produkcji umieszczany jest na wale napędowym silnika prądu stałego w oddzielnej, szczelnej obudowie, aby powstające w procesie komutacji zanieczyszczenia nie zakłóciły pracy elementu fotooptycznego. Wykorzystanie enkodera inkrementalnego znakomicie wpływa na parametry regulacyjne układu napędowego, umożliwiając jego pracę w wymagających dużej dynamiki i dokładności aplikacjach. W silnikach BLDC integralną częścią konstrukcji jest urządzenie do określania położenia wału tak, aby układ sterujący mógł dobrać odpowiedni wektor sterowania. Zazwyczaj element ten składa się z trzech dwustanowych czujników, które

określają położenie wirnika z dokładnością 60° elektrycznych. Chęć minimalizacji kosztów produkcji silnika BLDC sprawia, że dokładność montażu tych elementów i sposób ich regulacji jest wystarczający do poprawnej pracy układu w pętli otwartej [5], ale jednocześnie niemal uniemożliwia wykorzystanie typowych silników BLDC w wymagających dużej precyzji układach napędowych [1,2]. Dyskretne czujniki położenia przekazują informację o kącie obrotu silnika. Informację tę można wykorzystać do określenia jego kątovej prędkości obrotowej. Informacja ta jest jednak podawana w sposób schodkowy i dociera do układu regulacji z opóźnieniem równym elektrycznemu kątowi obrotu. W przypadku korzystania z jednego czujnika położenia, opóźnienie τ_0 w torze pomiaru prędkości jest równe czasowi obrotu wirnika silnika o kąt elektryczny π . Można więc napisać:

$$(1) \quad \tau_0 = \frac{\pi}{p \cdot \omega}$$

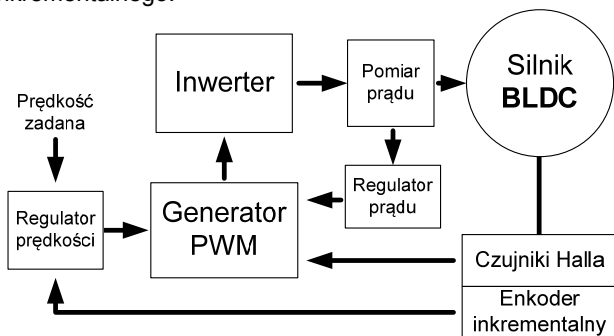
W przypadku korzystania z trzech czujników położenia, opóźnienie w torze pomiaru prędkości jest równe czasowi obrotu wirnika silnika o kąt elektryczny $\pi/3$. Można więc napisać:

$$(2) \quad \tau_{03} = \frac{\pi}{3p \cdot \omega}$$

O ile do określenia położenia wału silnika czujniki standardowe są najczęściej wystarczające, to precyzyjne określenie wartości prędkości na podstawie sygnałów z nich odczytanych, jest bardzo trudne, a częstotliwość ich odczytów zbyt niska aby zrealizować wydajną pętlę prędkościowego sprzężenia zwrotnego.

W wymagających aplikacjach powoduje to konieczność wykorzystania oprócz czujników położenia wału obecnych w silniku BLDC, dodatkowego elementu w postaci enkodera inkrementalnego, który z dużą precyzją może określić zarówno prędkość obrotową, jak i położenie wału silnika (rys 1).

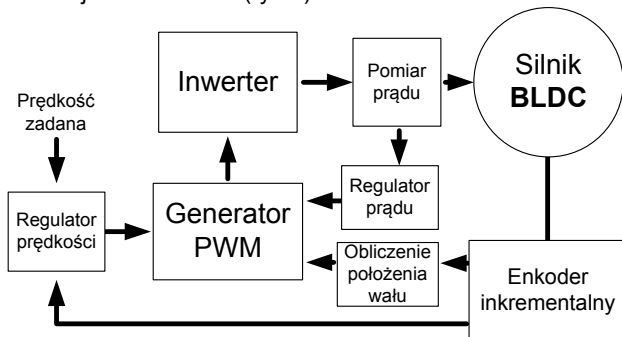
Strategia takiego sterowania zakłada określenie 1 z 6 wektorów napięciowych na podstawie istniejących czujników położenia wału, natomiast wartość amplitudy napięcia sterującego jest uzależniona od częstotliwości sygnału precyzyjnie wykonanego enkodera inkrementalnego.



Rys.1. Struktura układu napędowego z silnikiem BLDC oraz enkoderem inkrementalnym w torze pomiaru prędkości i czujnikami Halla w torze obserwacji położenia wirnika

Proponowane rozwiązanie

Istotą sterowania silnika BLDC jest konieczność posiadania informacji o położeniu jego wirnika przez sterownik elektroniczny pełniący rolę komutatora. Konieczność zapewnienia dokładnych informacji o prędkości obrotowej w wymagających aplikacjach sprawia, że konieczne jest zastosowanie dodatkowego elementu w torze pomiaru prędkości – zazwyczaj enkodera inkrementalnego. W toku prac nad polepszeniem parametrów regulacyjnych wolnoobrotowego silnika BLDC opracowano metodę sterowania wykorzystującą jedynie enkoder inkrementalny, którego sygnał jest wykorzystany zarówno do obliczenia prędkości obrotowej wału silnika, jak i przy wykorzystaniu opracowanych procedur - punktów komutacji silnika BLDC (rys 2).



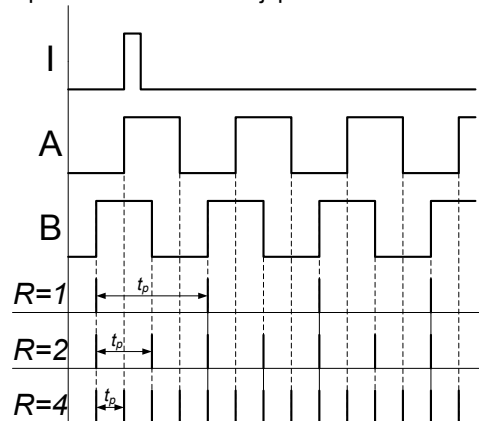
Rys.2. Zaproponowana struktura układu napędowego z silnikiem BLDC oraz enkoderem inkrementalnym w torze obserwacji prędkości i położenia wirnika

Rozwiązanie takie znacząco podnosi parametry dynamiczne układu napędowego oraz tylko nieznacznie koszt z uwagi na możliwość rezygnacji ze standardowych czujników i możliwość zastosowania taniego enkodera bez oddzielnej obudowy. Brak zanieczyszczeń powstających wewnątrz silnika BLDC, jak również brak konieczności jego przewietrzania umożliwiają montaż enkodera nie posiadającego własnej obudowy wewnątrz silnika, co znacząco obniża koszty takiego rozwiązania.

Ustalenie położenia wału

W odróżnieniu od tradycyjnego, opartego o czujniki Halla, układu obserwacji położenia wału silnika BLDC, zaproponowana metoda w chwili uruchomienia, nie determinuje usytuowania wału względem pola stojana i do poprawnej pracy wymaga przeprowadzenia procedury

określenia jego położenia. Ponieważ sygnał generowany przez enkoder inkrementalny ma postać dwóch przesuniętych względem siebie ciągów impulsów, które dostarczają informacji o zmianie położenia kątownego wału, konieczne jest wykorzystanie dodatkowej informacji jednoznacznie definiującej jego położenie. Do tego celu wykorzystywany jest dodatkowy sygnał generowany w torze enkodera dokładnie 1 raz na pełny obrót – znacznik indeksu „I”. Po wygenerowaniu przez układ optyczny enkodera informacji o napotkaniu znacznika „I” układ mikroprocesorowy jednoznacznie definiuje położenie wału, a następnie na podstawie ciągu impulsów z enkodera oblicza położenie z dokładnością wynikającą z liczby impulsów enkodera na obrót (CPR - Counts Per Revolution) oraz stałej „R”, która decyduje o częstotliwości generowania przerwań przez układ obserwacji położenia wału.



Rys.3. Czas pomiaru prędkości t_p dla różnych konfiguracji sterownika przerwań systemu mikroprocesorowego sterującego układem napędowym silnika BLDC z enkoderem inkrementalnym

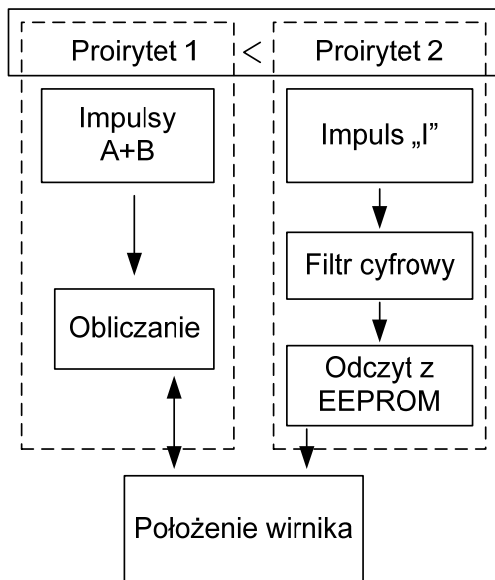
Z punktu widzenia algorytmu sterowania silnika BLDC najistotniejszą informacją jest ta mówiąca o konieczności dokonania przełączenia inwertera w odpowiednim momencie tak, aby tętnienia momentu elektromagnetycznego były minimalne. Aby układ mikroprocesorowy mógł zdecydować o konieczności zmiany wektora napięcia zasilającego na podstawie ciągu impulsów z enkodera musi posiadać informacje o podstawowych parametrach układu silnik-enkoder. Aby obliczyć liczbę impulsów - L, jaka powinna zostać wygenerowana pomiędzy kolejnymi przełączeniami należy znać: liczbę par biegunów silnika, stałą enkodera wyrażającą ilość impulsów na 1 obrót oraz sposób konfiguracji sterownika przerwań od którego bezpośrednio zależy sposób interpretacji ciągu impulsów kanału A i B enkodera inkrementalnego.

$$(3) \quad L = \frac{R \cdot I_{CPR}}{p \cdot 6}$$

R - Zmienna uzależniona od częstotliwości generowania przerwań przez sterownik mikrokontrolera może ona wynosić 1, 2 lub 4; I_{CPR} - liczba impulsów enkodera na obrót; p - liczba par biegunów silnika

Ponieważ położenie wału silnika jest określane na podstawie przeprowadzonych obliczeń wykonywanych w podprogramie obsługi przerwań mikrokontrolera, bardzo istotny wpływ na pracę układu ma określenie odpowiednio wysokiego poziomu priorytetu przerwań, których źródłem są sygnały enkodera. Jednocześnie należy bardzo starannie zaprojektować część energoelektroniczną napędu tak, aby zakłócenia powstające w procesach łączeniowych tranzystorów nie wpływały na układ obserwacji położenia

wał napędowego. Z uwagi na silny wpływ ewentualnych błędów obliczenia położenia wału (błędy te mają charakter addytywny i dokładność określenia położenia wirnika zmniejsza się z każdym obrotem) na poprawność pracy napędu, zastosowano cykliczną korekcję położenia wału 1 raz na pełen obrót – podczas pojawienia się sygnału znacznika „I”. Jednocześnie zastosowano filtr cyfrowy, który weryfikuje prawdopodobieństwo pojawienia się znacznika w danej chwili czasu (tak, aby losowe zakłócenie nie powodowało wygenerowania błędnych danych o położeniu wirnika) – rys 4.



Rys.4. Uproszczony algorytm określania położenia wirnika silnika BLDC z enkoderem inkrementalnym

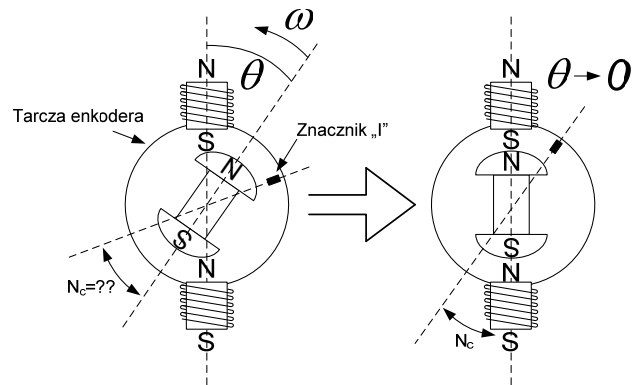
W urządzeniach wolnoobrotowych celem jest użycie trybu, w którym dowolna zmiana któregoś kanału enkodera inkrementalnego jest źródłem przerwania – częstotliwość odczytu prędkości jest wtedy wystarczająca do poprawnej pracy regulatora prędkości, a czas obsługi przerw generowanych w torze pomiaru prędkości nie powoduje zakłócenia działania programu głównego urządzenia mikroprocesorowego. W silnikach szybkoobrotowych zalecane jest ograniczenie liczby przerw do tych generowanych przez jedno ze zbrocz pojedynczego kanału ($R=1$) – rozwiązanie takie powoduje mniejsze obciążenie mikroprocesora przez procedurę obsługi przerwania, która wywołwana jest cyklicznie co czas t_p zgodnie ze wzorem.

$$(4) \quad t_p = \frac{2\pi}{\omega \cdot R \cdot I_{CPR}}$$

Dla silnika szybkoobrotowego BLDC, dla którego $\omega_n = 419 \text{ rad/s}$, $I_{CPR} = 500 \text{ imp/obrot}$ oraz $R=4$, minimalny czas pomiędzy kolejnymi przerwami wynosiłby ok $7,5 \mu\text{s}$, co jest wartością zbyt małą, aby tani mikrokontroler jednokładowy działał poprawnie, a tak duża częstotliwość określania prędkości obrotowej wału jest zazwyczaj niepotrzebna. W przypadku silnika wolnoobrotowego ($\omega_n = 52,3 \text{ rad/s}$, $I_{CPR} = 500 \text{ imp/obrot}$ oraz $R=4$), dla którego założona minimalna prędkość obrotowa jest na poziomie ok 1% prędkości znamionowej, maksymalny czas $t_p = 6 \text{ ms}$ i jest to czas, który jeszcze umożliwia zestawienie skutecznej pętli prędkościowego sprzężenia zwrotnego z regulatorem PID.

Aby wygenerować odpowiednie sygnały sterujące konieczna jest informacja o przesunięciu znacznika

enkodera „I” względem pola wirnika. Przesunięcie to jest spowodowane ograniczoną precyzją montażu tarczy enkodera i teoretycznie mogłoby być minimalizowane poprzez zastosowanie odpowiedniej technologii pozycjonowania tarczy na wale silnika, ale przy wykorzystaniu enkoderów o dużej wartości CPR byłoby to bardzo trudne. Ponieważ sterowanie silnika BLDC odbywa się niemal zawsze z wykorzystaniem układów mikroprocesorowych wyposażonych w nieulotną pamięć parametrów (EEPROM) [4], możliwe jest opracowanie procedury ustalającej wartość przesunięcia wyrażoną w impulsach enkodera - N_c . W tym celu konieczne jest wytworzenie wirującego, z minimalną prędkością, znamionowego strumienia stojana przy nieobciążonym wale napędowym silnika. Strumień wytwarzany przez magnesy trwale wirnika nieobciążonego silnika, przy niskiej prędkości obrotowej umożliwiającej minimalizację strat mechanicznych, ustawia się niemal idealnie w osi z polem wytwarzanym przez uzwojenie stojana (kąt $\theta \rightarrow 0$), które wirując powoduje obrót wirnika kolejno w każdą z 6p ustalonych pozycji. Po napotkaniu znacznika „I” enkodera pozycja wirnika stabilizuje się (następuje zatrzymanie wirowania strumienia stojana), a układ mikroprocesorowy dokonuje określenia odległości znacznika „I” od położenia ustalonego dla jednego z 6 wektorów sterowania wyrażonego w liczbie impulsów enkodera (rys 5).



Rys.5. Sposób określania przesunięcia enkodera względem pola wirnika

Wartość przesunięcia N_c zapisywana jest w nieulotnej pamięci układu mikroprocesorowego i jako wartość niezmienna podczas eksploatacji napędu nie powinna być bez potrzeby modyfikowana.

W odróżnieniu od klasycznej metody sterowania silników BLDC wykorzystującej trzy dwustanowe czujniki Halla opisana metoda wymaga dodatkowych czynności tuż po każdym uruchomieniu napędu. Ponieważ układ nie posiada informacji o położeniu wału napędowego, a jedynie oblicza je na podstawie danych konstrukcyjnych i informacji o względnym jego przesunięciu (kanał A i B enkodera), konieczne jest podczas uruchomienia napędu, po zaniku napięcia zasilania, wymuszenie ruchu wirnika, który powinien obracać się aż do napotkania znacznika „I” enkodera umożliwiające ustalenie jego precyzyjnego położenia. Nieznajomość położenia wirnika po załączeniu napięcia zasilania i konieczność wymuszenia jego ruchu wiąże się niestety z możliwością niekontrolowanego obrotu wirnika w kierunku przeciwnym do zamierzonego, co powinno zostać wzięte pod uwagę podczas analizowania możliwości zastosowania tej metody.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda jest ciekawą alternatywą dla klasycznych metod sterowania silników BLDC

wykorzystujących czujniki Halla. Została ona przetestowana i zastosowana praktycznie w nowo opracowanym bezreduktorowym układzie napędowym drzwi kabinowych dźwigu osobowego z silnikiem BLDC [2].

Znaczne skrócenie czasu pomiaru prędkości umożliwia polepszenie parametrów dynamicznych układów napędowych, zwłaszcza rozwiązań wykorzystujących wolnoobrotowe silniki. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia modulację różnych przebiegów napięcia zasilania silnika BLDC, które w standardowych rozwiązaniach były niemożliwe z uwagi na ograniczoną informację o zmianie położenia wirnika i jego odległości od następnego punktu komutacji tranzystorów. Koszt rozwiązania jest tylko nieznacznie wyższy, a możliwości wykorzystania dowolnego kształtowania napięcia zasilającego silnik umożliwiają optymalizację jego pracy.

Prace prowadzone były w ramach projektu HT-159362 „Opracowanie sterownika mikroprocesorowego bezreduktorowego napędu drzwi kabinowych z silnikiem BLDC” – projekt dofinansowany przez NCBiR w ścieżce Hi-Tech programu INNOTECH.

LITERATURA

- [1] Buchnik, Y., Rabinovici, R., Speed and position estimation of brushless DC motor in very low speeds, *Electrical*

and Electronics Engineers in Israel, (2004), 317-320, DOI: 10.1109/IEEEI.2004.1361155 2004

- [2] K. Kolano: Napęd drzwi kabinowych dźwigu osobowego z wysokowydajnym silnikiem BLDC. *Przegląd Elektrotechniczny* Numer:11b/2012, s. 348.
- [3] Jun Liu, Xiajie Xie, Haiyun Han, Haihong Qin, Deming Zhu, Ran Ao, Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC) 2 (2012), 1324-1327, DOI: 10.1109/IPEMC.2012.6259050, 2012
- [4] Krkljes D., Morvai C., Babkovic K., Nagy L., BLDC motor driver — Development of control and power electronics Microelectronics Proceedings (MIEL), 27th International Conference, (2010), 345-348, DOI: 10.1109/MIEL.2010.5490467
- [5] Yong CHEN, Dong-Sheng CAI, Xia LIU, Relationship detection between the signals of composite photoelectric encoder and the windings of BLDC Motor, *Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 NR 7a/2012*

Autor:

dr inż. Krzysztof Kolano, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, e-mail: k.kolano@pollub.pl