

Konrad URBAŃSKI*

METODA ODTWARZANIA POŁOŻENIA WAŁU SSMT DLA PRĘDKOŚCI ZEROWEJ W OBECNOŚCI ZAKŁÓCEŃ

W pracy przedstawiono sposób wykorzystania funkcji korelacji sygnałów w obszarze napędów elektrycznych. Odwołując się do aparatu matematycznego wykorzystywanego głównie w zakresie analizy sygnałów, opracowano metodę rekonstrukcji położenia wału dla wektorowego sterowania silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi (SSMT) dla przypadku pracy w zakresie zerowej prędkości. Bazuje ona na analizie hodografu prądów w nieruchomym układzie współrzędnych α - β związanym ze stojanem. Zaletą proponowanej metody jest duża skuteczność identyfikacji hodografu w przypadku wysokiego poziomu zakłóceń.

1. WPROWADZENIE

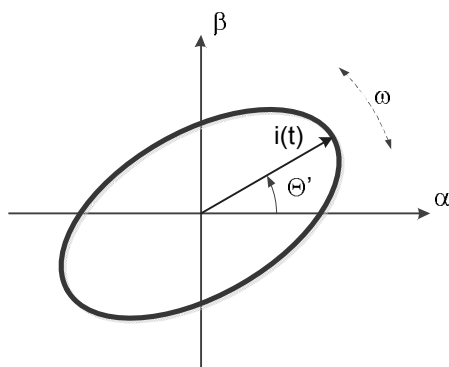
Wykorzystanie zaawansowanych metod przetwarzania danych pomiarowych w systemach sterowania i diagnostyki silników elektrycznych ma na celu polepszenie jakości sterowania oraz zwiększenie niezawodności i jest coraz częściej spotykane także w obszarze napędów elektrycznych [1]. Głównymi zaletami napędów z SSMT są wysoka dynamika oraz sprawność energetyczna. Wadą tych napędów jest konieczność zastosowania czujnika położenia wału wykorzystywanego w przypadku sterowania wektorowego do przekształcenia sygnałów sterujących pomiędzy różnymi układami współrzędnych, obliczania prędkości obrotowej oraz w innych zaawansowanych algorytmach. Wyeliminowanie czujnika mechanicznego służącego do pomiaru prędkości i położenia wału umożliwia zwiększenie niezawodności oraz obniża koszt napędu. Chcąc wykorzystać zakres prędkości niskich i zerowej, nie można zastosować technik bazujących na odtwarzaniu siły elektromotorycznej rotacji [2], ze względu na brak lub niewielką wartość indukowanej SEM, oraz niekorzystnego dla tego zakresu prędkości stosunku wartości sygnałów pomiarowych do poziomu zakłóceń. Dla tego zakresu prędkości pomocne mogą być metody fizyczne wykorzystujące np. nieliniowości silnika, m.in. bazując na analizie zmienności indukcyjności w funkcji położenia wału [3]. Jeden ze sposobów odtwarzania położenia dla tego zakresu prędkości realizuje się poprzez zasilenie stojana dodatkowym napięciem testowym o wysokiej częstotliwości. Powoduje to

* Politechnika Poznańska.

przepływ prądu wysokiej częstotliwości, zależnego m.in. od aktualnej pozycji wału. Metoda ta najlepiej sprawdza się przy małych prędkościach, gdyż już dla średnich i dużych prędkości, nałożenie się sygnału testowego na prądy fazowe powoduje ich znaczne odkształcenie, a co za tym idzie pogorszenie jakości pracy toru regulacji momentu. W prezentowanej pracy wykorzystano metodę z ciągłym sygnałem wysokiej częstotliwości. W celu odtworzenia położenia wału analizuje się hodograf prądów (rys. 1). Wykorzystuje się zjawisko polegające na tym, że w przypadku nieruchomego lub wolno obracającego się wirnika, jeżeli stojan zostanie zasilony symetrycznym napięciem trójfazowym, to w stanie ustalonym hodograf prądów silnika obserwowanych w osiach α - β będzie elipsą (lub w przybliżeniu elipsą - dla zasilania z przekształtnika z MSI). Śledząc na bieżąco prądy fazowe stojana, można wykreślić ten hodograf. Położenie dłuższego promienia elipsy określa położenie wału:

$$\Theta = \Theta' + \gamma \quad (1)$$

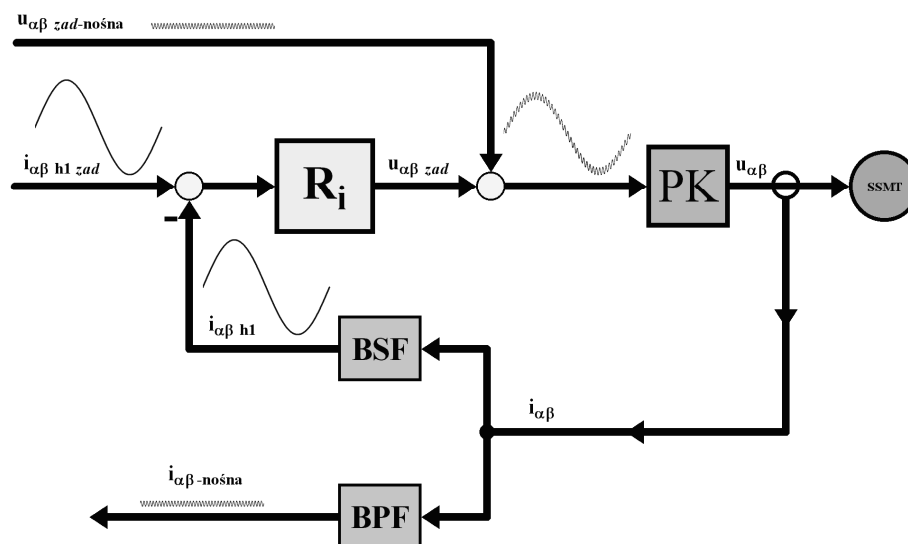
gdzie Θ – odtworzone położenie wału, Θ' – umowny kat obrotu elipsy hodografu prądu, γ - poprawka położenia zależna od impedancji stojana.



Rys. 1. Wyznaczanie położenia wału silnika na podstawie hodografu prądu stojana dla nieruchomego lub poruszającego się z niewielką prędkością wału silnika

W przypadku zastosowania tej metody do SSMT, napięcie zasilające stojan powinno mieć niewielką amplitudę oraz wysoką częstotliwość, aby zminimalizować wielkość tak generowanego dodatkowego momentu, dzięki czemu nieruchomy wirnik nie zacznie się obracać. Ogólna struktura układu generowania sygnałów dla bloku odtwarzającego położenie przedstawiono na rysunku 2. Jest to układ regulacji prądów w osiach α - β . Wielkością wyjściową regulatorów prądu (R_i) w osiach odpowiednio α i β są napięcia zadane, do których dodawane są sygnały napięcia zadanego wysokiej częstotliwości. Sygnały te pełnią funkcję wartości sterujących przekształtnikiem (PK). Wartości prądów fazowych zasilających silnik po transformacji do nieruchomego układu współrzędnych (dla

przejrzystości rysunku nie pokazano bloków transformacji współrzędnych) poddawane są filtracji. Filtr pasmowo zaporowy (BSF – Band Stop Filter) oddziela pierwszą harmoniczną prądu dla potrzeb toru regulacji prądów w osiach α - β , a filtr pasmowo przepustowy (BPF – Band Pass Filter) wydziela sygnał nośnej wysokiej częstotliwości. Dla prezentowanej metody algorytmicznej dodatkowym parametrem określającym jakość odtwarzania jest rozdzielczość charakteryzująca przyrost kąta położenia wzorca, powiązana z mocą obliczeniową procesora dokonującego szacowania (poprzez ilość cykli zmiany położenia w wyznaczonym czasie dysponowanym na obliczenia w danym kroku obliczeń). Analizując przebiegi prądów w osiach α - β , można po wykonaniu odpowiednich operacji odtworzyć wartość kąta położenia wirnika. Sposób ten cechuje się możliwością wykorzystania metod oszacowania pozycji bazując na geometrii przebiegów prądów, metod inteligencji obliczeniowej lub też metod algorytmicznych.

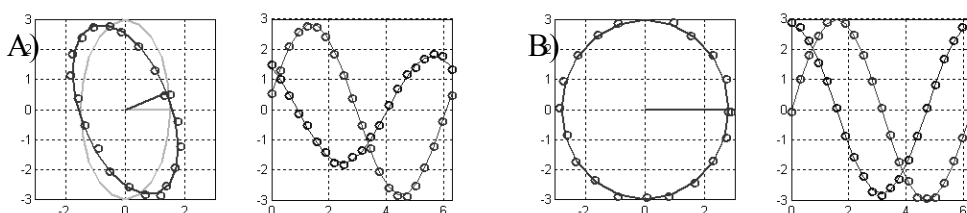


Rys. 2. Widok ogólny struktury odtwarzania położenia z użyciem dodatkowych sygnałów wysokiej częstotliwości

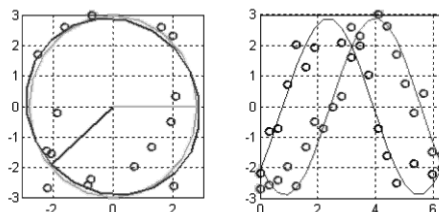
Główną zaletą metod fizykalnych jest możliwość odtwarzania położenia dla nieruchomego wirnika, a więc w sytuacji, kiedy wartości SEM są niewielkie, a także możliwość pracy z niewielką prędkością obrotową. Wadą - rozbudowanie struktury sterowania o bloki sterujące dodatkowymi sygnałami prądów lub napięć nośnych oraz złożoność układów pomiarowych, wymagających stosowania złożonych metod analizy otrzymanych przebiegów w osiach α - β oraz możliwość generowania dodatkowych momentów na wale silnika.

2. IDENTYFIKACJA POŁOŻENIA

Aby określić położenie wału, wykorzystuje się odfiltrowane sygnały $i_{\alpha\beta}$ -nośna (rys.2), odtwarzając hodograf prądów. Dla analizowanej metody, można określić różne wartości poziomu trudności identyfikacji hodografu, wydzielając następujące kombinacje: duża różnica L_d i L_q , niski poziom zakłóceń (rys. 3A), duża różnica L_d i L_q , wysoki poziom zakłóceń, mała różnica L_d i L_q , niski poziom zakłóceń (rys. 3B), mała różnica L_d i L_q , wysoki poziom zakłóceń (rys. 4).



Rys. 3. Hodograf i jego prądy składowe dla niskiego poziomu zakłóceń w przypadku różnych położen wału: a) duża różnica L_d i L_q b) mała różnica L_d i L_q



Rys. 4. Hodografy prądów w przypadku wysokiego poziomu zakłóceń

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono hodografy (wzorzec oraz „pomiarowy”) oraz prądy składowe osi $\alpha-\beta$ (także wzorzec oraz „pomiarowy”), dla 20 punktów pomiarowych (ze względów technicznych, na rysunku widać 20 punktów plus jeden z kolejnego cyklu pomiarowego). Obrazowo, rekonstrukcja położenia polega na wykreśleniu hodografu pomiarowego (np. czerwona elipsa z okrągłymi znacznikami na rys. 3A) oraz nałożeniu na ten sam układ współrzędnych elipsy wzorcowej (zielona elipsa), obracanie jej w zakresie $0 \div 2\pi$, wyznaczając dla każdego jej położenia wartość korelacji. Kąt, dla którego korelacja osiąga wartość maksymalną, odpowiada położeniu elipsy „pomiarowej”. Opisany sposób wyznaczania położenia wału jest metodą algorytmiczną, umożliwiającą określenie położenia także w przypadku sygnałów mocno zakłóconych. Dokonując analizy sygnałów np. wzorcowego z pomiarowym, można określić zależności pomiędzy tymi sygnałami. Miarę podobieństwa dwóch sygnałów $x(t)$ oraz $y(t+\Delta t)$ można określić poprzez wyznaczenie ich korelacji [4, 5]:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y^*(t - \tau) dt \quad (2)$$

gdzie: τ – opóźnienie między sygnałami, R_{xy} – wartość korelacji dla danego τ ,
lub w postaci dyskretnej:

$$R_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) y^*(n - k) \quad (3)$$

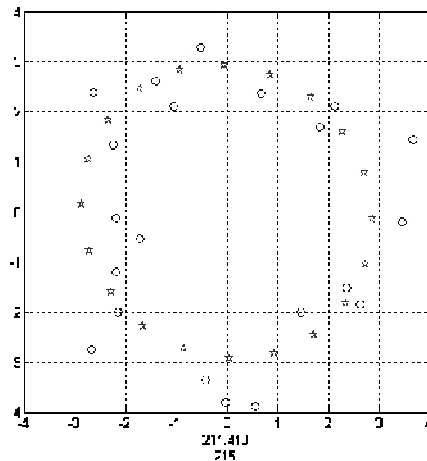
gdzie: k – liczba kroków opóźnienia między sygnałami, R_{xy} – wartość korelacji dla danego k .

Zmieniając kolejno wartość przesunięcia wzorca względem sygnału mierzonego uzyskuje się kolejne wartości określające podobieństwo tych sygnałów. Wybierając przebieg charakteryzujący się najwyższą wartością korelacji, uzyskuje się informację o wartości kąta przesunięcia tych sygnałów względem siebie, co odpowiada położeniu wału silnika. Ten sposób wyznaczania położenia wału wykorzystujący korelacje charakteryzuje się wysoką odpornością na zakłócenia.

3. BADANIA SYMULACYJNE

3.1. Testy odporności na zakłócenia

W celu sprawdzenia założeń metody wykonano serię testów polegających na odtworzeniu położenia elipsy przyjmującego przypadkowe wartości z zakresu $0 \div 2\pi$, dla składowych prądów zakłóconych losowymi wartościami z zakresu $\pm 30\%$ amplitudy tych prądów. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rezultat tych testów dla przypadku małej różnicy indukcyjności w osiach.

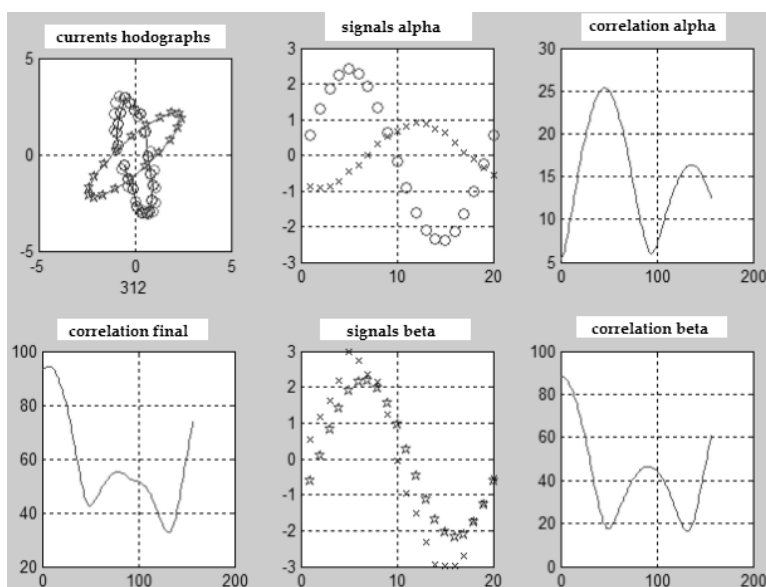


Rys. 5. Wizualizacja wyników odtwarzania położenia metodą korelacji sygnałów

Znaczniki „gwiazdki” pokazują położenie punktów wzorcowych składowych wysokiej częstotliwości prądów α - β o największej wartości podobieństwa na płaszczyźnie α - β , okrągłe znaczniki przedstawiają położenie punktów „pomiarowych”. Pod wykresem, pierwszy wiersz określa wartość kąta „rzeczywistego”, drugi wiersz określa wartość kąta odtworzonego. Można zauważyć, że kąt został odtworzony z zadowalającą dokładnością pomimo wysokiego poziomu zakłóceń, także dla przypadku niewielkiej (2,8/3,0) różnicy indukcyjności w osiach. Metoda poprawnie odtwarza położenie nie tylko głównej osi elipsy, ale i jej kierunek.

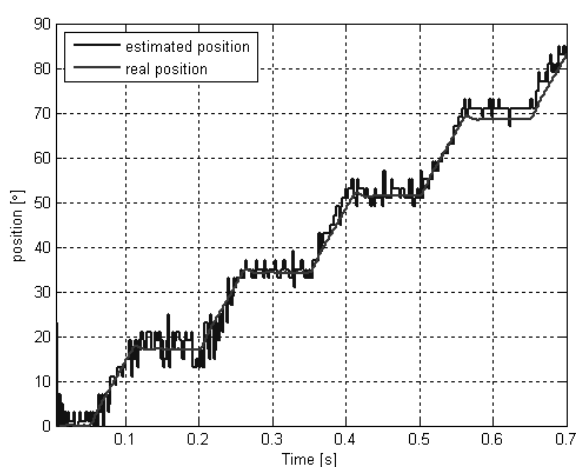
3.2. Odtwarzanie położenia PMSM

W celu weryfikacji możliwości wykorzystania prezentowanej metody do odtwarzania wału SSMT dla zerowej oraz niskiej prędkości, został opracowany model symulacyjny napędu wektorowego z SSMT, z typowym układem regulacji kaskadowej, z nadrzędnym regulatorem prędkości i podrzędnymi regulatorami prądów w osiach d i q . Do badań przyjęto uproszczony model matematyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi [6]. Napęd został zamodelowany w środowisku MATLAB-Simulink. W tor sterowania napięciami wprowadzono sygnały dodatkowych napięć sinusoidalnych o amplitudzie 40 V oraz częstotliwości 500 Hz (napięcie ograniczenia falownika wynosi 400 V, częstotliwość nośna – 10 kHz). Silnik zasilany jest poprzez model przekształtnika z MSI. Napęd pracuje wykorzystując sygnały położenia odtwarzanego w torze sterowania w blokach konwersji układów współrzędnych.



Rys. 6. Wizualizacja sygnałów testowych w czasie analizy pracy systemu

Rysunek 6 przedstawia okno modułu testującego, służącego do analizy sygnałów wykorzystywanych w odtwarzaniu położenia w trybie *on-line*. Umożliwia on bieżący podgląd wartości kąta odtworzonego i rzeczywistego w trakcie pracy algorytmu dopasowującego, wartości sygnałów wzorca oraz pomiarowych, służących do wyznaczenia podobieństwa, oraz chwilowe wartości podobieństw. Dzięki wykorzystaniu tego narzędzia możliwa jest analiza poprawności pracy poszczególnych modułów toru rekonstrukcji położenia.



Rys. 7. Przebieg pozycji rzeczywistej i odtwarzanej dla testów w zakresie $0 \div \pi/2$

Poprawność działania modułów rekonstrukcji położenia potwierdza uzyskany przebieg odtwarzanego położenia (rys. 7).

4. PODSUMOWANIE

W pracy zaproponowano metodę algorytmiczną, wykorzystującą określanie podobieństwa sygnałów za pomocą korelacji, będącą bazą do algorytmu wyznaczenia pozycji wału silnika synchronicznego z magnesami trwałymi dla wektorowego napędu bezczujnikowego. Na podstawie prezentowanych przykładowych przebiegów wykazano dużą odporność metody odtwarzania położenia obracającej się elipsy na zakłócenia wielkości „pomiarowych”, także w przypadku porównywalnych długości osi wielkiej i małej. Zaprezentowano wykorzystanie tej metody do odtwarzania położenia wału SSMT. Dla modelu napędu z falownikiem MSI wykazano poprawną pracę układu odtwarzania położenia w trybie zamkniętym, kiedy odtworzony sygnał położenia jest wykorzystywany w torze regulacji napędu w blokach konwersji układów współrzędnych.

LITERATURA

- [1] S. Szymaniec, „Wykorzystanie funkcji korelacji w pomiarach on-line wyładowań niezupełnych silników elektrycznych”, *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, nr. 85, ss. 99–104, 2010.
- [2] K. Urbanski, „Sensorless control of PMSM high dynamic drive at low speed range”, in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2011, ss. 728-732.
- [3] M. J. Corley i R. D. Lorenz, „Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, t. 34, nr. 4, ss. 784-789, sie. 1998.
- [4] T. Zieliński, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2005.
- [5] S. J. Orfanidis, *Optimum Signal Processing*, 2. wyd. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 2007.
- [6] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford; New York: Oxford University Press, 1998.

ZERO SPEED POSITION ESTIMATION OF PMSM IN A NOISE PRESENCE

The paper presents the use of the correlation function of signals in the area of electric drives. Recalling the mathematical tools used mainly in the field of signal analysis, a method of reconstructing the position of the shaft for vector control of the synchronous motor permanent magnet (PMSM) for the operation at zero speed is presented. It is based on an analysis of currents hodograph in a fixed coordinate system associated with the stator. The advantage of the proposed method is high efficiency of the hodograph identification in a case of high level interference.