

Automatyczna identyfikacja przesunięcia względnego dla czujnika położenia wirnika w maszynie z magnesami trwałymi

Streszczenie. W pracy przedstawiono algorytm automatycznej identyfikacji przesunięcia względnego, dedykowany do kalibracji czujnika położenia współpracującego z silnikiem wzbudzonym magnesami trwałymi. Problem ten występuje w czasie montażu czujnika położenia wirnika w nowym silniku lub w trakcie prac remontowych. Opracowany algorytm umożliwia przeprowadzenie automatycznej identyfikacji przed uruchomieniem napędu, przy czym do jego przeprowadzenia nie są potrzebne żadne dodatkowe czynności ani przyrządy pomiarowe.

Abstract. The paper presents an algorithm for automatic identification of the relative displacement, dedicated to the calibration of a position sensor cooperating with a motor excited by permanent magnets. This problem occurs when installing the rotor position sensor in a new motor or during repairs work. The developed algorithm allows for automatic identification before starting the drive, and no additional steps or measuring instruments are needed to carry it out. (Automatic identification of the relative displacement for the rotor position sensor on a permanent magnet machine).

Słowa kluczowe: napędy z silnikami o magnesach trwałych, kalibracja czujnika położenia wirnika, algorytm sterowania, komutator elektroniczny.

Keywords: permanent magnet motors drives, calibration of the rotor position sensor, control algorithm, electronic commutator.

Wstęp

Silniki z magnesami trwałymi są powszechnie wykorzystywane ze względu na ich dobre parametry ruchowe oraz korzystny stosunek rozwijanego momentu do masy. Nie bez znaczenia jest też wysoka przeciążalność momentem, także w stanie pracy z nieruchomym wirnikiem. Silnik wzbudzany magnesami trwałymi wymaga zastosowania przekształtnika energoelektronicznego nazywanego często komutatorem elektronicznym. W klasycznych rozwiązaniach jest to przekształtnik trójfazowy składający się z sześciu tranzystorów mocy [1]. Aby możliwe było uzyskanie optymalnych parametrów pracy silnika, przy sterowaniu tranzystorami konieczna jest znajomość położenia wirnika. Informację o położeniu uzyskuje się, zależnie od trybu pracy lub rodzaju silnika (BLDC, PMSM), wykorzystując czujniki Halla, enkodery lub resolwery [2]. Znane są też bezczujnikowe metody sterowania, pozwalające na rezygnację z wyżej wymienionych czujników [3] [4] [5] [6]. Mają one jednak pewne ograniczenia, szczególnie w sytuacji gdy wymagany jest rozruch silnika z dużym momentem obciążenia. W Katedrze Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki już od kilku lat prowadzono prace związane z możliwością kalibracji czujników położenia [7] [8]. Efektem tych działań było opracowanie i wdrożenie algorytmu kalibracji czujnika położenia wirnika [9]. Sposób ten nie zapewniał możliwości kalibracji automatycznej, tzn. realizowanej w całości przez układ sterowania przekształtnika. W dotychczasowym rozwiązaniu, układ sterowania inicjował odpowiednią sekwencję sterującą tranzystorów przekształtnika, w czasie kiedy silnik napędzany był od strony wału. Ocenę znaku i wartości korygującej, tzw. offsetu kąta, dokonywano na podstawie obserwacji prądów fazowych przeprowadzanej za pomocą oscyloskopu.

Procedura automatycznej kalibracji

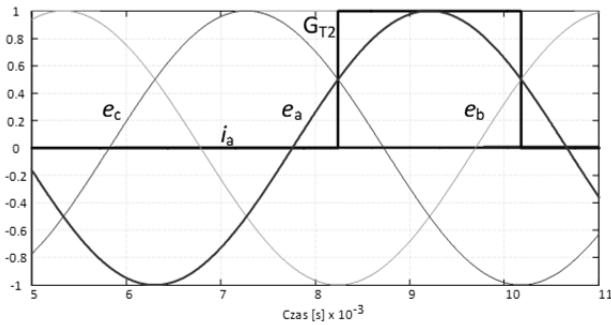
Aby wprowadzić silnik z magnesami trwałymi w ruch obrotowy, należy w uzwojeniu fazowym wymusić przepływy prądu, którego wektor zorientowany jest względem wektora strumienia pochodzącego od magnesu pod kątem równym 90°. Na skutek oddziaływania obydwu strumieni w silniku wytwarzany jest moment elektromagnetyczny o maksymalnej wartości. Stan taki występuje przy prawidłowo zorientowanym enkoderze i kątem elektrycznym dla

tej pozycji ustala się jako „wartość zero”. W przypadku, kiedy zerowa wartość wskazywana przez enkoder jest przesunięta o pewien kąt względem osi uzwojenia fazy a (offset), rozwijany przez silnik moment będzie mniejszy proporcjonalnie do sinusa tego kąta. Na podstawie wstępnych analiz przyjęto, że procedura kalibracji enkodera przeprowadzana będzie zawsze na silniku nieobciążonym. W związku z tym przed jej rozpoczęciem układ sterowania będzie inicjował standardowy rozruch z maksymalną wartością prądu ograniczoną do poziomu $\frac{3}{4}$ wartości prądu znamionowego silnika. Jeżeli w czasie wymuszenia prądów w odpowiedniej fazie stojana nie nastąpi obrót wirnika w zadanym kierunku, wówczas układ sterowania rozpocznie zmianę wartości offsetu do chwili, kiedy wirnik silnika zacznie się obracać. W chwili, kiedy nastąpi obrót wirnika w zadanym kierunku, ustawiona wartość offsetu zostanie zapamiętana ze znakiem wynikającym z kierunku wirowania, a układ sterowania będzie dążył do napędzenia wirnika do określonej prędkości obrotowej. Od chwili jej osiągnięcia nastąpi przełączenie sterowania tranzystorami zgodnie z procedurą kalibracji, tzn. tranzystory grupy górnej przekształtnika zostaną wyłączone, zaś tranzystory grupy dolnej będą przełączane według sekwencji przedstawionej w tabeli 1.

Tabela 1. Sekwencja sterowania tranzystorów grupy dolnej

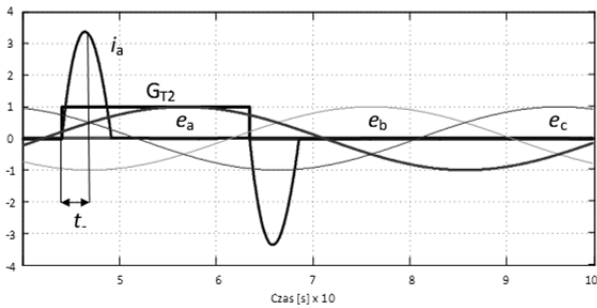
Sygnal sterujący tranzystorem grupy dolnej	Przedział kąta odczytywanego z enkodera
G_{T2}	$0^\circ < q < 120^\circ$
G_{T4}	$120^\circ < q < 240^\circ$
G_{T6}	$240^\circ < q < 360^\circ$

Dla tak przyjętej sekwencji przełączeń tranzystorów przekształtnika, przy poprawnie skalibrowanym enkoderze, w obwodach silnika i przekształtnika nie następuje przepływ prądu. Dzieje się tak pomimo tego, że na skutek wirowania wirnika w uzwojeniach fazowych silnika indukowane są siły elektromotoryczne proporcjonalne do prędkości wirowania. Zjawisko to występuje niezależnie od konstrukcji obwodów magnetycznych silnika, tzn. czy w badanym silniku występuje sinusoidalny lub niesinusoidalny rozkład pola.

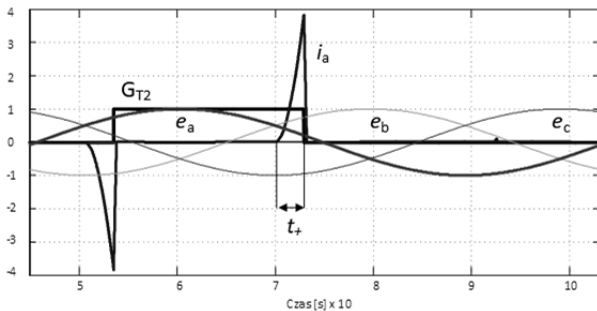


Rys.1. Przebiegi fazowych sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach silnika e_a , e_b , e_c , sygnału bramkowego tranzystora G_{T2} oraz prądu fazy a i_a , dla poprawnie skalibrowanego czujnika położenia wirnika

W przypadku, kiedy wartość kąta odczytywana z enkodera jest przesunięta względem osi fazy a stojana, w obwodach przekształtnika i silnika pojawia się przepływ prądu w postaci impulsów. Ich amplituda zależy od wartości przesunięcia i prędkości obrotowej, zaś czas trwania zależy od wartości kąta przesunięcia. Impulsy prądowe, zależnie od znaku (kierunku) przesunięcia, mają też różne kształty.



Rys.2. Przebiegi fazowych sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach silnika e_a , e_b , e_c , sygnału bramkowego tranzystora G_{T2} oraz prądu fazy a i_a dla przesunięcia $t-$ offset = $+18^\circ$



Rys.3. Przebiegi fazowych sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach silnika e_a , e_b , e_c , sygnału bramkowego tranzystora G_{T2} oraz prądu fazy a i_a dla przesunięcia $t+$ offset = -18°

Z przedstawionych na rysunkach 1, 2 oraz 3 przebiegów wynika, że kiedy tranzystor przełączany jest przy niezerowej wartości offsetu, jego załączenie następuje z wyprzedzeniem lub opóźnieniem względem punktu optymalnego. Przy czym, punkt optymalny to punkt zrównania się wartości fazowych napięć e_a i e_c indukowanych w uzwojeniach. Wynika stąd, że wartość kąta przesunięcia (offset) wyznaczyć można na podstawie pomiaru czasu narastania prądu fazowego silnika i odniesieniu tego czasu do okresu, który wyznaczony może być na podstawie pomiaru prędkości obrotowej. Należy założyć, że prędkość ta nie zmienia się przez czas trwania okresu, w którym następuje pomiar. Wartość kąta korygującego (offsetu) można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad \Delta\theta = t \cdot p \cdot \frac{\omega_m}{2 \cdot \pi \cdot 360}$$

gdzie:

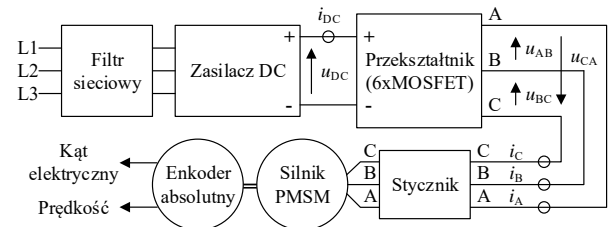
- t – zmierzony czas narastania impulsu prądowego [s],
- ω_m – mechaniczna prędkość obrotowa [rad/s],
- p – liczba par biegunów silnika.

Dokładność pomiaru, tym samym identyfikacji offsetu zależy będzie od kilku czynników. Najważniejszymi z nich są:

- dokładność określenia chwili, kiedy prąd fazowy zaczyna narastać tzn. osiąga wartość różną od 0. Zatem na dokładność wpływ będzie miała jakość przetwornika pomiarowego systemu mikroprocesorowego, poziom zaszumienia sygnału pomiarowego oraz spadek napięcia występujący się na zaciskach załączonego tranzystora.
- dokładność określenia chwili końca okresu pomiaru. W tym przypadku na dokładność wpływ będzie miał znak przesunięcia (offsetu). Z rysunków 2 oraz 3 jednoznacznie wynika, że większą dokładność uzyska się dla offsetu o znaku ujemnym. Jest to związane z tym, że w takim przypadku chwila końca okresu pomiaru określana jest precyzyjnie poprzez moment wyłączenia tranzystora.
- dokładność obliczenia wartości okresu elektrycznego. Wiąże się to głównie z koniecznością utrzymania stałej prędkości obrotowej wirnika w czasie trwania pomiaru i wymaga ustalenia odpowiedniej wartości prędkości obrotowej, po której osiągnięciu rozpocznie się pomiar.

Stanowisko laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.



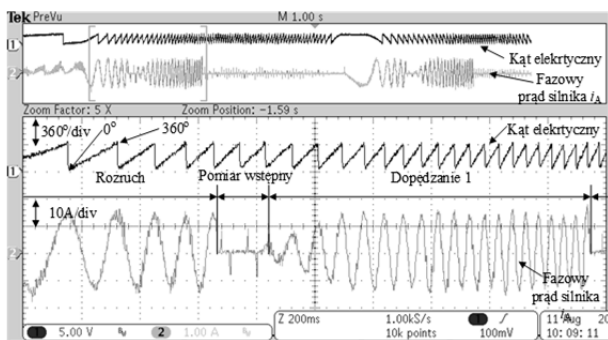
Rys.4. Schemat ideowy stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko składało się z następujących elementów:

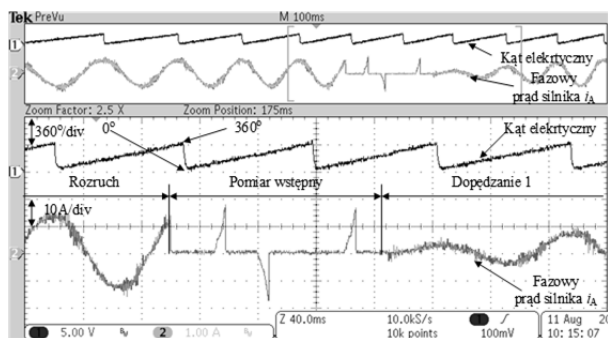
- filtr sieciowy – niezbędny do ograniczenia zakłóceń elektromagnetycznych przenoszonych na drodze przewodzenia pomiędzy siecią zasilającą i stanowiskiem laboratoryjnym. Zastosowano typowy współczesny sieciowy filtr pasywny, którego parametry gwarantowały bezawaryjną pracę całego stanowiska.
- zasilacz DC – jego zadaniem było zapewnienie zasilania napięciem stałym zespołu napędowego. Zastosowano zasilacz o napięciu regulowanym w zakresie od 0 V do 150 V i o wydajności prądowej 20 A.
- przekształtnik energoelektronicznego zasilającego silnik. Na potrzeby prowadzonych badań przeprojektowano i zaadoptowano istniejący przekształtnik poprzez modyfikację obwodów wyzwalania bramkowego.
- silnik PMSM o napięciu znamionowym 144 V, prądzie znamionowym 150 A i mocy 20 kW, który jest produkowany seryjnie do napędów niewielkich samochodów elektrycznych.
- typowy czujnik położenia (enkoder inkrementalny).

Badania laboratoryjne

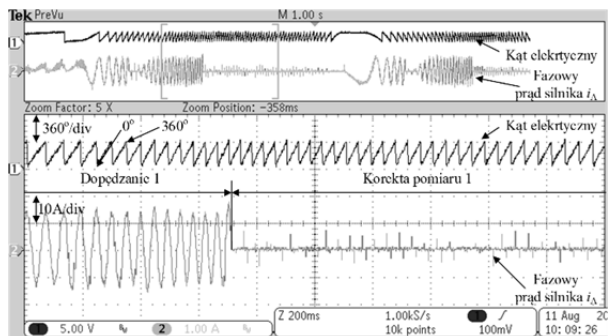
Przed rozpoczęciem badań laboratoryjnych przystosowano opracowany wcześniej program sterujący przemiennikiem częstotliwości do realizacji zadań automatycznej kalibracji. Układ sterowania napędu bazuje na mikrokontrolerze TMS 320F2812. Poza wielkościami pomocniczymi temperatur silnika i przekształtnika w systemie mierzone są dwa prądy fazowe silnika i napięcie zasilania u_{DC} . Do sterowania tranzystorów falownika wykorzystywany jest jeden z układów event manager (EVMA) mikrokontrolera, drugi podobny układ EVMB wykorzystywany jest do wyznaczania położenia wirnika i pomiaru prędkości obrotowej na podstawie impulsów z enkodera. Ponadto mikrokontroler pozwala na komunikację z użytkownikiem, kalibrację wejść analogowych, nastawę parametrów urządzenia oraz diagnostykę. Cykl pomiarowy prądu w systemie mikroprocesorowym prowadzony jest synchronicznie z przerwaniem związanym z okresem przełączeń tranzystorów według sterowania metodą modulacji szerokości impulsów (16 kHz).



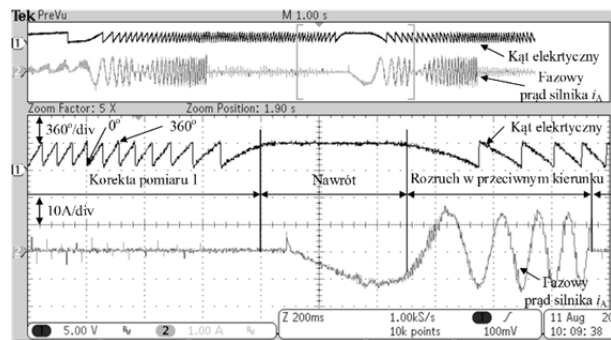
Rys. 5. Przebiegi prądu fazowego silnika i kąta mierzonego z enkodera w czasie procedury automatycznej kalibracji; faza pierwsza - rozruch silnika, pomiar wstępny oraz zwiększenie prędkości obrotowej (dopędzanie 1)



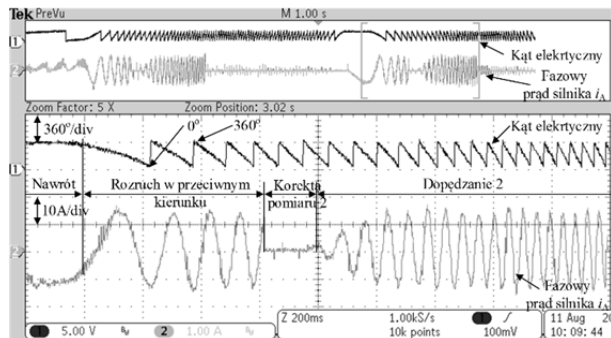
Rys. 6. Przebiegi, prądu fazowego silnika i kąta mierzonego z enkodera w czasie procedury automatycznej kalibracji; faza pierwsza - rozruch silnika pomiar wstępny (powiększenie)



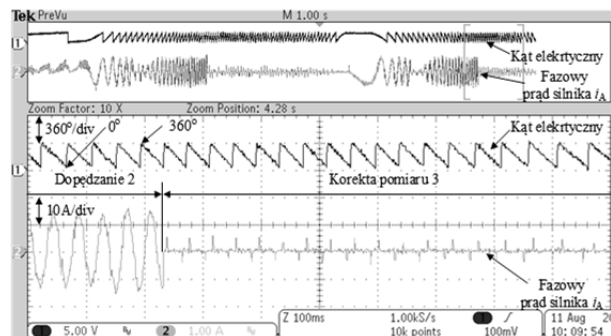
Rys. 7. Przebiegi prądu fazowego silnika i kąta mierzonego z enkodera w czasie procedury automatycznej kalibracji; faza druga – dopędzanie 1 i korekta pomiaru



Rys. 8. Przebiegi prądu fazowego silnika i kąta mierzonego z enkodera w czasie procedury automatycznej kalibracji; faza trzecia – nawrót i rozruch w kierunku przeciwnym



Rys. 9. Przebiegi, prądu fazowego silnika i kąta mierzonego z enkodera w czasie procedury automatycznej kalibracji; faza czwarta – korekta pomiaru i zwiększenie prędkości obrotowej

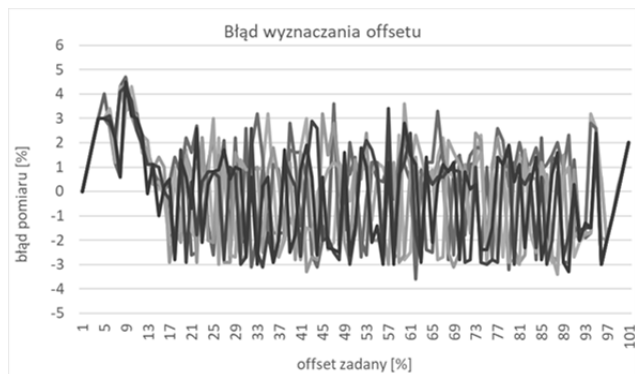


Rys. 10. Przebiegi prądu fazowego silnika i kąta mierzonego z enkodera w czasie procedury automatycznej kalibracji; faza piąta – ostateczna korekta pomiaru

Po przeprowadzeniu wstępnych testów zweryfikowano poprawność działania procedury kalibracji i zdecydowano się na jej modyfikację w stosunku do wcześniej przyjętych założeń. Zdecydowano się na rozbudowanie fazy, w której dokonywane są pomiary w taki sposób, aby po przeprowadzeniu wstępnego pomiaru offsetu, silnik został dopędzony do wyższej prędkości obrotowej, w celu weryfikacji/korekty pomiaru. Zwiększenie prędkości obrotowej skutkuje zwiększeniem napięć indukowanych w uzwojeniach silnika, a tym samym wzrostem amplitudy impulsów prądowych. Możliwa jest dzięki temu korekta niedokładności wyznaczonej wartości offsetu, wynikającej ze spadku napięcia na przewodzącym tranzystorze oraz szumów w torach pomiarowych prądu. Na rysunkach od 5 do 10 przedstawiono zarejestrowane przebiegi oscyloskopowe prądu fazowego silnika oraz kąta mierzonego z przetwornika pomiarowego. Na rysunkach widoczne są kolejne fazy procesu wyznaczania offsetu: rozruch, pomiar wstępny i zwiększenie prędkości - „dopędzenie 1” (rys. 5-6), korekta pomiaru (rys. 7), nawrót

silnika z jednoczesną zmianą znaku offsetu (rys. 8), korekta pomiaru (rys. 9), zwiększenie prędkości – „dopędzenie 2” i ostateczna korekta pomiaru (rys. 10).

Pomiary oscyloskopowe potwierdziły poprawność działania algorytmu automatycznej kalibracji czujnika położenia. Procedura umożliwia uzyskanie poprawnego wyniku w przypadku, kiedy silnik nie jest obciążony mechanicznie. Czas potrzebny na realizację całej procedury nie przekracza 8 sekund.



Rys. 11. Błąd wyznaczania kąta przesunięcia (offsetu) dla różnych wartości odstrojenia początkowego.

W celu ostatecznej weryfikacji procedury kalibracji przeprowadzono pomiary skuteczności działania procedury, dla różnych wartości odstrojenia czujnika (offsetu). W trakcie pomiarów sprawdzono też wpływ położenia początkowego wirnika na dokładność wyznaczania wartości przesunięcia. W tym celu zmodyfikowano program sterujący w układzie sterowania przekształtnikiem w taki sposób, aby przy każdym uruchomieniu procedury, w sposób automatyczny zmieniany był offset kąta w zakresie od -50% do +50% z gradacją co 1% (od -180° do $+180^\circ$, z gradacją co 3.6°). Dla każdej wartości przesunięcia układ przeprowadzał procedurę kalibracji. Ze względu na to, że po każdym cyklu pomiarowym wał silnika zatrzymywał się w innym położeniu przeprowadzono serię 10 cykli pomiarowych dla pełnego zakresu zmian kąta przesunięcia. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 11.

Z przedstawionych na rysunku 11 charakterystyk wynika, że wyznaczanie offsetu za pomocą opracowanej procedury automatycznej kalibracji obarczone jest pewnym błędem. Można zauważyć, że poziom błędu wyznaczania offsetu nie przekracza 3% pełnego okresu. Można uznać to za wynik satysfakcjonujący, zakładając że wartość maksymalnego błędnego odczytu kąta powoduje stratę momentu rozwijanego przez silnik na poziomie 1,8% wartości znamionowej, co w przypadku silników średniej mocy należy uznać za wynik bardzo dobry.

Podsumowanie

Opracowany algorytm, umożliwia przeprowadzenie automatycznej kalibracji przed uruchomieniem napędu, przy czym do jego przeprowadzenia nie są potrzebne żadne dodatkowe czynności ani przyrządy pomiarowe. Opracowany algorytm jest uniwersalny ze względu na środowisko programistyczne i nadaje się do implementacji w dowolnym systemie mikroprocesorowym. Błąd wyznaczania kąta przesunięcia (offsetu), w proponowanym rozwiązaniu, mieści się w granicach 3%, co w odniesieniu do potencjalnego spadku momentu rozwijanego przez silnik, spowodowanego tym błędem jest wynikiem satysfakcjonującym.

Autorzy: dr inż. Aleksander Bodora, dr inż. Arkadiusz Domoracki
*Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny,
 Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki,
 ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice,
 E-mail: aleksander.bodora@polsl.pl; arkadiusz.domoracki@polsl.pl*

LITERATURA

- [1] Zawirski K. „Sterowanie silnikami synchronicznym o magnesach trwałych”, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005*
- [2] Jianhui H., Jibin Z., Fei X., Yong L., Yanchao F. “An Improved PMSM Rotor Position Sensor Based on Linear Hall Sensors”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, November 2012.
- [3] Sandun S., Yu Z. „Post Production PMSM Position Sensor Offset Error Quantification via Voltage Estimation”, *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 30 October 2020.
- [4] Park J., Ko Y., Jang D., Kwak M., Lee Y. “Auto Calibration of Position Sensor While Driving ECO Vehicle”, *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia - Pacific (ITEC) June 1 - 4, 2016, Busan, Korea*, (pp. 397-401).
- [5] Kim D., Kim J., Lim H., Park J., Han J., Lee G. „A Study on Accurate Initial Rotor Position Offset Detection for a Permanent Magnet Synchronous Motor Under a No-Load Condition”, *IEEE Access* vol.9, 10.05.2021, (pp.73662-73670).
- [6] Pamuji F.A., Danier D., Sudarmanta B., Guntur H.L., Praskosa P.R., Waskito I.S. „Comparison of BLDC Motor Controller Design for Electric Vehicles Using Fuzzy Logic Controller and Artificial Neural Network”, *Przegląd Elektrotechniczny* 97 (2021), nr 6, pp.1-9.
- [7] Bodora A., Biskup T., Domoracki A. „Metoda kalibracji absolutnego czujnika położenia wirnika z silnikiem o wzbudzeniu elektromagnetycznym”, *Postępy w elektrotechnice stosowanej -PES-7*, Kościelisko 18-22.06.2009.
- [8] Bodora A., Biskup T., Domoracki A., Kołodziej H., Paluszczak D. „Wybrane zagadnienia realizacji metody estymacji położenia wirnika silnika PMSM”, *Postępy w elektrotechnice stosowanej - Przegląd Elektrotechniczny* 90 (2014), nr 9, 234-239.
- [9] Bodora A., Biskup T., Domoracki A. „Sposób kalibracji absolutnego czujnika położenia wirnika zwłaszcza dla silnika o wzbudzeniu magnetoelektrycznym”, *Patent nr. 215896*, 7.03.2014.