

Dawid Makiela
Politechnika Śląska, Gliwice

KONCEPCJA POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH BEZCZUJNIKOWEJ METODY STEROWANIA BAZUJĄCEJ NA NAPIĘCIACH MIĘDZYFAZOWYCH DLA SILNIKÓW PM BLDC

CONCEPTION OF IMPROVING DYNAMIC PROPERTIES SENSORLESS CONTROL METHOD BASED ON LINE-TO-LINE VOLTAGES FOR PM BLDC MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję poprawy właściwości dynamicznych metody sterowania bezczujnikowego bazującej na napięciach międzyfazowych. Ponadto przedstawiono propozycję realizacji. Oprócz tego w skrócie scharakteryzowano metodę sterowania bezczujnikowego bazującą na napięciach międzyfazowych.

Abstract: The paper presents the concept of improving the dynamic properties of the sensorless control method based on line-to-line voltages. The proposal of realization was also presented. Additionally, sensorless control method based on line-to-line voltages was briefly characterized.

Słowa kluczowe: silniki BLDC, silniki bezszczotkowe, silniki z magnesami trwałymi, sterowanie bezczujnikowe
Keywords: BLDC motors, brushless motors, permanent magnet motors, sensorless control

1. Wstęp

Z czujnikowym sterowaniem wysokoobrotowego silnika PM BLDC związanych jest wiele problemów, które mogą wpłynąć na prawidłową pracę silnika lub na zwiększenie strat poprzez nieprawidłowe wysterowanie zaworów komutatora elektronicznego.

Klasyczne silniki z magnesami trwałymi są konstruowane z dodatkowym pierścieniem na wale, który ma jednoznacznie określone bieguny magnetyczne na całym swoim obwodzie (np. silnik firmy Dunkermotoren BG75x50 lub silnik Elkar RTM CT 85-1). Ów pierścień pozwala właściwie wysterować hallotrony. Niestety skutkiem umieszczenia dodatkowego pierścienia jest wydłużenie wału, co może być szczególnie groźne dla silników wysokoobrotowych ze względu na możliwość wkroczenia w zakres drgań giętych [5]. Hallotrony można również wysterować korzystając z pola magnetycznego magnesów trwałych umieszczonych na wirniku. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że silniki wysokoobrotowe są konstruowane jako dwubiegunowe. W związku z tym, bieguny są określone jedynie na wycinku obwodu wirnika o kącie około 240° , tj. $2 \cdot 120^\circ$. Na pozostałym wycinku obwodu wirnika indukcja magnetyczna jest zbyt mała, aby poprawnie wysterować hallotrony, czego następstwem jest pętla histerezy w wynosząca około 60° .

Z czujnikowym sterowaniem związanych jest jeszcze kilka innych niedogodności. Jedną z nich jest niesymetria rozłożenia czujników położenia wirnika, co ma wpływ na wysterowanie zaworów komutatora elektronicznego i straty silnika zwłaszcza dla dużych prędkości obrotowych.

Kolejnym problemem związanym z czujnikami położenia wirnika jest większa liczba elementów oraz przewodów, które mogą ulec uszkodzeniu. W związku z tym w celu poprawy niezawodności układu napędowego eliminuje się czujniki położenia wirnika.

Znane są również przypadki występowania zjawisk linii długiej na przewodach sygnałowych czujników położenia wirnika, co jest jeszcze bardziej prawdopodobne dla silników wysokoobrotowych, ze względu na dużo większą częstotliwość pracy.

Ze względu na wyszczególnione powyżej niedogodności związane z czujnikowym sterowaniem wysokoobrotowego silnika PM BLDC wykonano bezczujnikowy układ sterowania silnikiem.

2. Wybór metody sterowania bezczujnikowego

Znanych jest wiele bezczujnikowych metod sterowania silnikami PM BLDC, na przykład:

- metody bazujące na podstawowych równaniach maszyny [1], [2], [4], [11], [14], [17],
- metody bazujące na logice rozmytej lub sieciach neuronowych [9], [10], [17],
- metody bazujące na napięciach maszyny [7], [8], [24],

Dla ścisłości warto jeszcze wspomnieć o specjalnej grupie metod dla niskich i zerowych prędkości wirowania [18], [19], [20], [21], [22], [23], [25], [26], jednakże ze względu na ich przeznaczenie nie mają one zastosowania w silnikach wysokoobrotowych.

Metody z dwóch pierwszych grup wymagają dużej mocy obliczeniowej dlatego są nieodpowiednie do sterowania silnikami wysokoobrotowymi. Najczęściej używanymi metodami sterowania bezczujnikowego są te bazujące na napięciach maszyny. W tej grupie metod można wyróżnić następujące:

- metodę bazującą na siłach, elektromotorycznych,
- metodę bazującą na trzeciej harmonicznej,
- metodę bazującą na całce siły elektromotorycznej,
- metodę bazującą na napięciach międzyfazowych [16], [13], [12], [3], [8].

Z wyszczególnionych powyżej czterech metod sterowania bezczujnikowego, najodpowiedniejsza do sterowania silnikiem wysokoobrotowym wybrano metodę bazującą na napięciach międzyfazowych. Jej główną zaletą jest możliwość pracy z kątem komutacji dochodzącym do 60° , podczas gdy na przykład metoda bazująca na siłach elektromotorycznych silnika pozwala na pracę z kątem komutacji dochodzącym do zaledwie 30° . Ponadto niniejsza metoda nie wymaga wyprowadzonego punktu neutralnego maszyny. Kolejną zaletą jest jej prosta implementacja, co ma bardzo duże znaczenie przy sterowaniu silnikami wysokoobrotowymi. Z tego też względu, układ sterowania bezczujnikowego został wykonany w oparciu o metodę bazującą na napięciach międzyfazowych silnika [16].

3. Metoda sterowania bezczujnikowego

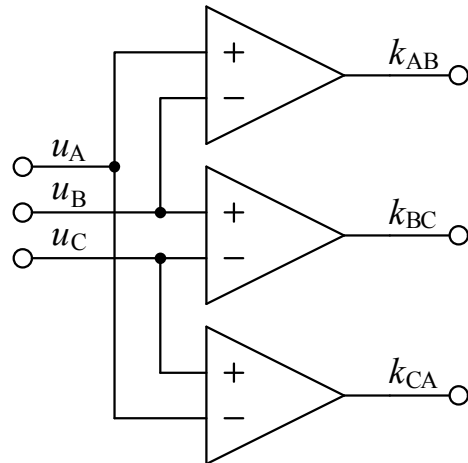
Fundamentem metody sterowania bezczujnikowego bazującej na napięciach międzyfazowych są zależności:

$$\text{Jeżeli } u_{AB} > 0, \text{ to } k_{AB} = 1, \text{ inaczej } k_{AB} = 0, \quad (1)$$

$$\text{Jeżeli } u_{BC} > 0, \text{ to } k_{BC} = 1, \text{ inaczej } k_{BC} = 0, \quad (2)$$

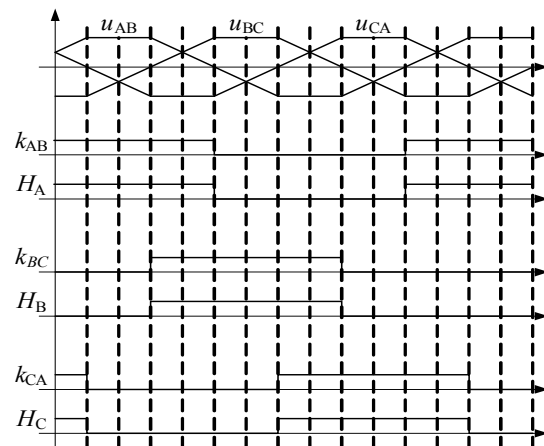
$$\text{Jeżeli } u_{CA} > 0, \text{ to } k_{CA} = 1, \text{ inaczej } k_{CA} = 0. \quad (3)$$

Powyższe zależności można zaimplementować bezpośrednio w układzie sterowania za pomocą instrukcji warunkowych if, else. Jednakże ze względu na wymaganą dużą szybkość działania taki sposób implementacji byłby zbyt wolny, dlatego powyższe równania zaimplementowano w postaci analogowego układu komparatorów. Ideę układu przedstawiono na rysunku 1 [16].



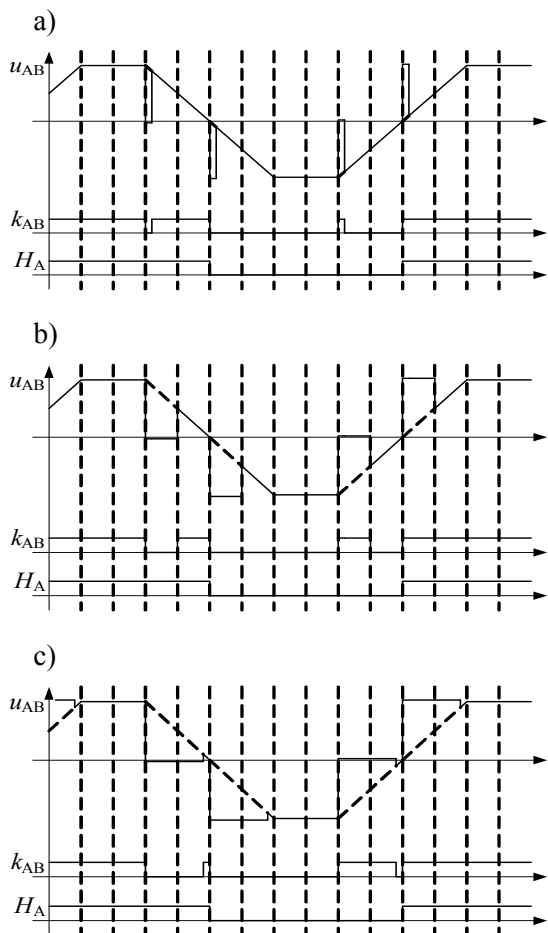
Rys. 1. Układ analogowy realizujący zależności (1) – (3) [16]

Jeżeli założyć, że komutacja w układzie jest natychmiastowa, wówczas przebiegi generowane przez układ komparatorów są tożsame z przebiegami z czujników hallotronowych (rys. 2) [16].



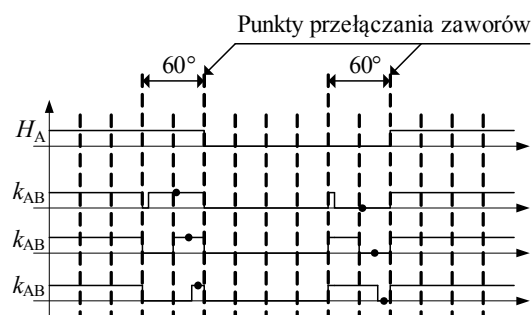
Rys. 2. Przebiegi k_{AB} , k_{BC} , k_{CA} generowane przez układ komparatorów oraz ich porównanie z przebiegami z czujników hallotronowych [16]

Niestety w rzeczywistym silniku komutacja nie jest natychmiastowa, a czas trwania komutacji zależy od obciążenia silnika. W związku z powyższym, przebiegi generowane przez układ komparatorów różnią się od przebiegów z czujników hallotronowych (rysunek 3) [16].

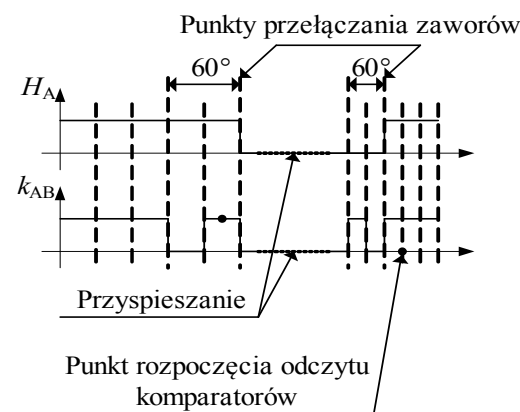


Rys. 3. Przebiegi k_{AB} , k_{BC} , k_{CA} generowane przez układ komparatorów: a) dla małego kąta komutacji, b) dla kąta komutacji 30° , c) dla kąta komutacji zbliżającego się do 60° [16]

W związku z występowaniem zjawiska komutacji należy wyznaczać punkt, od którego powinien rozpocząć się odczyt sygnałów z komparatorów. W publikacji [16] zaproponowano jego wyznaczenie na podstawie w oparciu o czas trwania cyklu pomiędzy kolejnymi przełączeniami tranzystorów komutatora elektronicznego (rysunek 4) [16]. Opisana metoda, pomimo że pozwala na pracę w stanach dynamicznych, jednak przy zbyt dużej dynamice może okazać się zawodna. Dzieje się tak, ponieważ przy pracy ze zbyt dużym przyspieszeniem może dojść do pominięcia zbocza wyznaczającego punkt przełączenia zaworów (rys. 5) [16]. W związku z powyższym proponuje się modyfikację metody sterowania bezczujnikowego, która pozwoli na pracę w stanach o dużej dynamice.



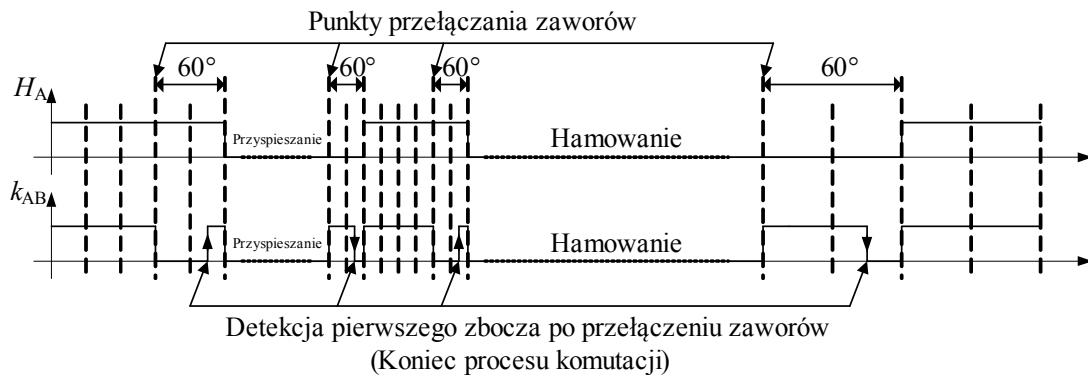
Rys. 4. Optymalne położenie punktu, od którego powinien rozpocząć się odczyt sygnałów z układu komparatorów dla trzech przypadków: małego kąta komutacji, kąta komutacji wynoszącego 30° , kąta komutacji zbliżającego się do 60° [16]



Rys. 5. Pominięcie zbocza wyznaczającego punkt przełączenia zaworów komutatora elektronicznego w dynamicznym stanie pracy [16]

4. Koncepcja poprawy właściwości dynamicznych metody sterowania bezczujnikowego bazującej na napięciach międzyfazowych

Aby uniknąć problemów w dynamicznych stanach pracy, zamiast wyznaczania punktu rozpoczęcia odczytu komparatorów na podstawie czasu trwania cyklu pomiędzy kolejnymi przełączeniami zaworów, można wyznaczać chwilę zakończenia procesu komutacji [15]. Koniec procesu komutacji może być wyznaczony na podstawie przebiegów z układu komparatorów. Otóż okazuje się, że pierwsze zbocze (opadające lub narastające) występujące po przełączeniu zaworów komutatora elektronicznego oznacza zakończenie procesu komutacji. Ideę wyznaczenia końca procesu komutacji zilustrowano na rysunku 6 [15].



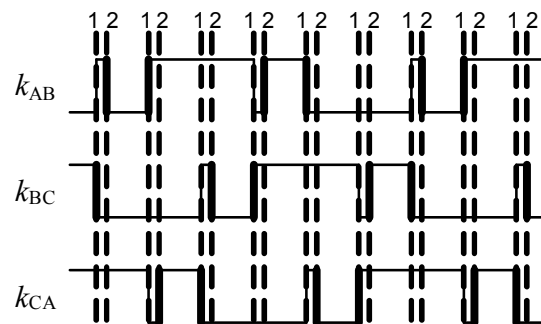
Rys. 6. Wyznaczenie końca procesu komutacji na podstawie przebiegów generowanych przez układ komparatorów

5. Idea praktycznej realizacji przedstawionej koncepcji poprawy właściwości dynamicznych metody sterowania bezczujnikowego

Ponieważ wyznaczenie końca procesu komutacji jest realizowane przez analizę zboczy sygnałów, dlatego układ sterowania powinien szybko reagować po wystąpieniu zbocza sygnału. W związku z tym programowa analiza zboczy jest niedopuszczalna. Dlatego do wykrywania zmian sygnału należy użyć przerwań zewnętrznych mikrokontrolera.

Detekcję zmiany stanu sygnałów z układu komparatorów należy realizować za pomocą funkcji XOR zaimplementowanej w układzie przerwań. Pierwsze przerwanie oznacza punkt przełączenia zaworów. Musi być ono obsłużone możliwie w jak najkrótszym czasie, najlepiej za pomocą jednego rozkazu assemblera, aby nie pominąć kolejnego zbocza. Oczywiście wcześniej, w odpowiednim buforze mikrokontrolera musi być wprowadzona kolejna sekwencja przełączeń tranzystorów. Drugie przerwanie oznacza zakończenie procesu komutacji (rysunek 7).

Mikrokontroler, który posiada rejestr buforowy do sterowania tranzystorów komutatora elektronicznego oraz pozwala na realizację funkcji XOR dla trzech sygnałów przerwań zewnętrznych to na przykład STM32F103VBT6. Mikrokontroler dzięki dużej częstotliwości taktowania wynoszącej 72 MHz powinien być wystarczający do wykrycia wszystkich zboczy sygnału, nawet dla przypadku bardzo krótkiej komutacji.



Rys. 7. Sygnały przerwań (linia pogrubiona) wraz z numerem przerwania.

6. Podsumowanie

W artykule w skrócie scharakteryzowano metodę sterowania bezczujnikowego wybraną do sterowania silnikiem wysokoobrotowym projektowanym w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki [27], [28]. Niniejsza metoda została zaproponowana do sterowania silnikiem wysokoobrotowym w publikacji [16]. Niestety opisana tam metoda nie pozwalała na pracę maszyny z dużą dynamiką. W celu poprawienia właściwości dynamicznych metody, w niniejszym artykule przedstawiono koncepcję modyfikacji metody sterowania. W kolejnych publikacjach zostaną przedstawione wyniki badań zaproponowanej koncepcji pod kątem możliwości implementacji do sterowania wysokoobrotowym silnikiem PM BLDC.

7. Literatura

- [1]. Acarnley P.: "Sensorless position detection in permanent magnet drives", *IEEE Colloquium on Permanent Magnet Machines and Drives*, str. 10/1-10/4, 1993.
- [2]. Consoli A., Musumeci, S., Raciti A., Testa A.: "Sensorless vector and speed control of brushless motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 41, str. 91-96, 1994.

- [3]. Bhogineni S., Rajagopal K.R.: "Position Error in Sensorless Control of Brushless DC Motor based on Average Line to Line Voltages", *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2012.
- [4]. Ertrugrul N., Acarnley P.P., French C.D.: "Real-time estimation of rotor position in PM motors during transient operation", *IEEE Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, str. 311-316, 1993.
- [5]. Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Skoć A., Hetmańczyk J.: „Rezonans mechaniczny w wysokoobrotowym silniku PM BLDC”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 86, str. 123, 2010.
- [6]. Jakubowski P., Koczara W., Al-Khayat N.: "Method of the poles position identification for brushless axial flux permanent magnet motor drive system", *Proceedings of European Power Electronic Conference, EPE 2005*, 2005.
- [7]. Johnson J.P., Ehsani M., Guzelgunler Y.: "Review of sensorless methods for brushless DC", *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty Fourth IAS Annual Meeting*, str. 143-150, 1990.
- [8]. Krykowski K.: "Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym", *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice*, 2011.
- [9]. Kumar R., Singh B. Singh P.B.: "Fuzzy Pre-compensated PI Controller for PMSBLDC motor drive", *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems PEDES*, 2006.
- [10]. Kumar R., Padmanaban S.V.: "An artificial neural network based rotor position estimation for sensorless permanent magnet brushless DC motor drive", *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IECON'06*, str. 649-654, 2006.
- [11]. Kumar R., Singh N., Singh J., Padmanaban S.V.: "A nonlinear reduced order observer for rotor position estimation of sensorless permanent magnet brushless DC motor drives", *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics IECON'06*, str. 235-240, 2006.
- [12]. Li Z., Cheng S., Qin Y., Cai K.: "A novel Line-to-line EMF Calculation for Sensorless Brushless DC Motor Drives", *International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS 2008*.
- [13]. Liu G., Cui C., Wang K., Han B., Zheng S.: "Sensorless Control for High-speed Brushless DC Motor Based on the Line-to-line Back-EFM", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2014.
- [14]. Liu T.H., Cheng C.P.: "Adaptive control for a sensorless permanent-magnet synchronous motor drive", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 30, str. 900-909, 1994.
- [15]. Makiela D.: Materiały z przygotowywanej rozprawy doktorskiej.
- [16]. Makiela D., Tomaszczyk T.: „Bezczujnikowe sterowanie silnika wysokoobrotowego PM BLDC przy pomocy metody bazującej na napięciach międzyfazowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90, nr 4, 2014.
- [17]. Park B.G., Kim T.S., Ryu J.S., Huyn D.S.: "Fuzzy back EMF observer for improving performance of sensorless brushless DC motor drive", *Twenty-First Annual IEEE Power Electronics Conference and Exposition APEC'06*, str. 674-678, 2006.
- [18]. Robeischl E., Schroedl M., Salutt K.: "Improved INFORM-measurement sequence and evaluation for sensorless permanent magnet synchronous motor drive", *Proceedings of the 10th International Power Electronics & Motion Control Conference, EPE-PEMC 2002*.
- [19]. Robeischl E., Schroedl M.: "Optimized INFORM measurement sequence for sensorless PM synchronous motor drives with respect to minimum current distortion", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 2, 2004.
- [20]. Schröedl M., Lambeck M.: "Statistic properties of the INFORM-method in highly dynamic sensorless PM motor control applications down to standstill", *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'03*, Vol. 2, str. 1479-1486, 2003.
- [21]. Schröedl M., Hofer M., Staffler W.: "Combining INFORM method, voltage model and mechanical observer for sensorless control of PM Synchronous Motor in the whole speed range including standstill", *International Exhibition & Conference for Power Electronics Intelligent Motion Power Quality, PCIM 2006*, str. 183-190, 2006.
- [22]. Schröedl M.: "Sensorless control of AC machines at low speed and standstill based on the INFORM method", *31st IAS Annual Meeting, Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference*, Vol. 1, str. 270-277, 1996.
- [23]. Schröedl M.: "Statistic properties of the INFORM-method in highly dynamic sensorless PM motor control applications down to standstill", *EPE Journal*, Vol. 13, No. 3, 2003.
- [24]. Siostrzonek T.: "Bezczujnikowy układ napędowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego z magnesami trwałymi (BLPMDCM) sterowany sygnałem proporcjonalnym do modułu prądu źródła" *Akademia Górniczo-Hutnicza*, 2008.
- [25]. Wiśniewski J.: „Bezczujnikowe sterowanie wielouzwojeniowego silnika z magnesami trwałymi o polu osiowym w zakresie niskich prędkości wirowania”, 2009.
- [26]. Wiśniewski J., Koczara W., Doboń P.: „Analiza momentu rozruchowego silnika z magnesami trwałymi przy zastosowaniu metody HPI”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, nr 2, str. 160-163, 2010.
- [27]. Hetmańczyk J., Krykowski K., Gałuszkiewicz Z., Miksiewicz R., Makiela D.: „Wysokoobrotowy silnik wzbudzany magnesami trwałymi” *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 86, str. 129-134, 2010.

[28]. Krykowski K., Miksiewicz R., Gałuszkiewicz Z., Hetmańczyk J., Makiela D.: „Projekt i badania wysokoobrotowego silnika BLDC z rdzeniem amorficznym” *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 87, str. 209-213, 2010.

Autor

mgr inż. Dawid Makiela
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
Katedra Energoelektroniki, Napędu
Elektrycznego i Robotyki,
ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
e-mail: Dawid.Makiela@polsl.pl

Informacje dodatkowe

Pracę wykonano w ramach grantu nr UDA-POIG.01.03.01-00-058/08-00, zatytułowanego “Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych”, zadanie nr 5 pt. “Badania aplikacyjne”, podzadanie nr 5.3 pt. “Opracowanie konstrukcji silników wysokoobrotowych wzbudzanych magnetoelektrycznie”.