

Janusz Hetmańczyk
Politechnika Śląska, Gliwice

WPLYW KSZTAŁTU I KIERUNKU MAGNESOWANIA MAGNESÓW TRWAŁYCH NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI WYSOKOOBROTOWEGO SILNIKA PM BLDC

INFLUENCE OF THE PERMANENT MAGNETS SHAPE AND MAGNETIZATION DIRECTION ON SELECTED PROPERTIES OF HIGH SPEED PM BLDC MOTOR

Streszczenie: W artykule omówiono wybrane aspekty sposobu mocowania magnesów trwałych na wirniku silnika PM BLDC. Przeanalizowano wpływ rozmieszczenia i kierunku magnetyzacji na właściwości silnika PM BLDC. W analizie wykorzystano wyniki symulacji komputerowej wykonanej metodą elementów skończonych (FEM). Rozważania teoretyczne poparto wynikami laboratoryjnymi zarejestrowanymi w trakcie badań wysokoobrotowych bezszczotkowych silników prądu stałego.

Abstract: The paper describes selected aspects of permanent magnets mounting on the rotor of PM BLDC. The influence of the position as well as direction of the magnetization on the PM BLDC motor properties has been analyzed. The results of computer modelling achieved through finite elements method (FEM) have been utilized in performed analysis. Theoretical considerations have been supported with laboratory results acquired during tests of high-speed permanent magnet DC motors.

Słowa kluczowe: *wysokoobrotowy bezszczotkowy silnik prądu stałego, magnes trwały*
Keywords: *high-speed brushless DC motor, permanent magnet*

1. Wprowadzenie

Przedmiotem artykułu jest wirnik wysokoobrotowego silnika prądu stałego (PM BLDC) o jednej parze biegunów, uzwojeniach połączonych w gwiazdę i z komutatorem elektronicznym w układzie mostka 3 fazowego. W silniku tym układ wzbudzenia stanowi magnes trwały zamocowany na wirniku, a uzwojenie twornika jest nieruchome i znajduje się w stojanie. Opis wysokoobrotowego silnika PM BLDC, zasada działania oraz jego właściwości zostały przedstawione w [3], [10]. W silnikach bezszczotkowych prądu stałego najkorzystniej jest, z punktu widzenia pulsacji momentu głównego, aby przy pracy silnikowej napięcie indukowane było przedziałami stałe. Drugim istotnym wymogiem jest niski moment zaczepowy wytwarzany przez magnesy i niesymetryczny obwód magnetyczny (zmienna reluktancja szczeliny) nawet przy pracy prądnicowej bez obciążenia. Przy pracy silnikowej moment zaczepowy nakłada się na główny moment elektromagnetyczny (który również nie jest stały w czasie) powodując dodatkowe pulsacje momentu, a zatem dodatkowe drgania i hałas silnika. Istotna jest również wartość maksymalna tych pulsacji oraz ich częstotliwość [2], [10]. W trakcie prac nad opracowaniem wysokoobrotowego silnika

przeanalizowano wpływ kształtu magnesu trwałego, sposobu jego magnesowania oraz rozmieszczenia na wirniku na kształt pola w szczelinie powietrznej. Zwrócono uwagę na kształt przebiegu czasowego napięcia indukowanego oraz wartości momentu zaczepowego silnika. Wyniki tych analiz zaprezentowano w dalszej części artykułu.

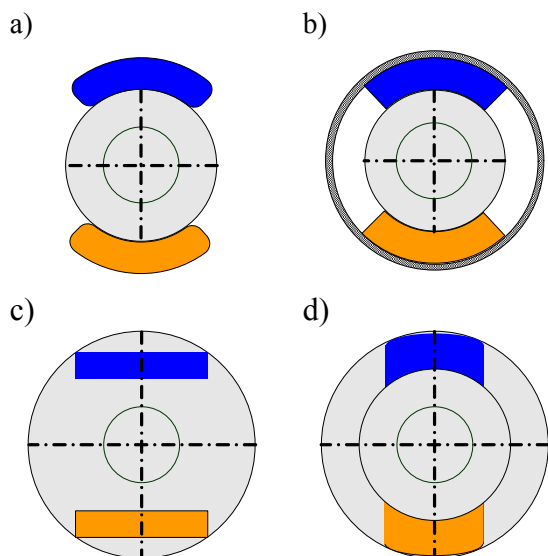
2. Wirnik silnika PM BLDC

Wirniki silników PM BLDC mogą przyjmować różną konstrukcję. Różnice mogą występować w sposobie mocowania magnesów trwałych, w kształcie samych magnesów, a także w materiale, z którego są wykonane wirniki. Mocowania magnesów możemy ogólnie podzielić na dwie grupy:

- magnesy mocowane (klejone) na powierzchni wałka wirnika (rys. 1a, b),
- magnesy zagłębione w wirniku (rys. 1c, d).

Najprostszym i najczęściej stosowanym sposobem mocowania magnesów trwałych jest mocowanie powierzchniowe (rys. 1a). Za pomocą kleju, magnesy są przyklejone do powierzchni wałka wirnika. Właściwości kleju oraz stan powierzchni wałka wirnika mają niemały wpływ na trwałość mocowania, podobnie jak i kształt

magnesu trwałego. Inaczej przylega magnes w kształcie wycinka pierścienia do wirnika, a inaczej magnes w kształcie sztabki. Istotną wadą montażu powierzchniowego jest konieczność zabezpieczenia magnesów przed wpływem sił odśrodkowych przy dużych prędkościach obrotowych.

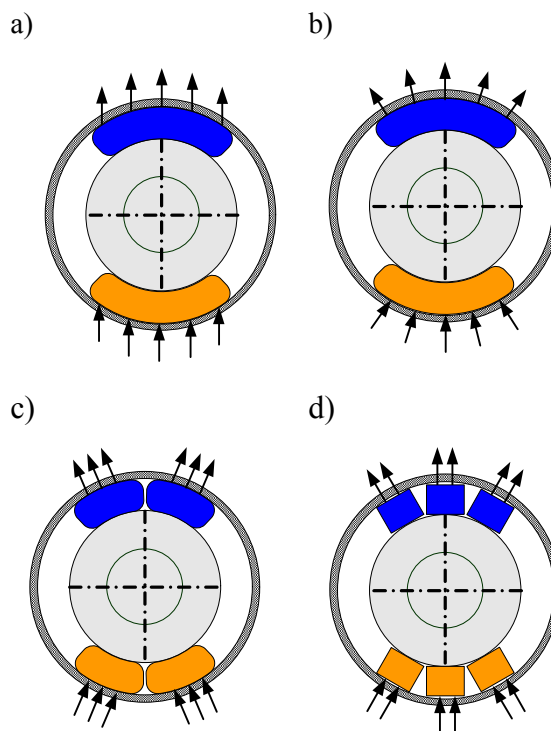


Rys. 1. Przekroje wirnika silnika: a) magnesy mocowane (klejone) na powierzchni wirnika; b) magnesy umieszczone w tulei (opasce); c) magnesy zagłębione w wirniku; d) magnesy zagłębione ułożone promieniowo

W celu poprawienia pewności mocowania magnesów stosuje się bandażowanie, które w połączeniu z chemicznymi substancjami utwardzającymi znacznie podwyższa trwałość mocowania (rys. 1b). Innym sposobem zwiększenia pewności mocowania magnesów jest umieszczenie wirnika w tulei wykonanej z materiału niemagnetycznego np. tytanu [5]. Zarówno jeden, jak i drugi sposób wzmocnienia mocowania magnesów pozwala budować wirniki silników PM BLDC na prędkości rzędu 100 000 obr/min.

W odróżnieniu od powierzchniowego sposobu mocowania magnesów, istnieje możliwość umieszczenia ich tuż pod powierzchnią wirnika lub zagłębienie ich w środku wirnika (rys. 1c, d) [4], [7]. Konstrukcja wirników z magnesami zagłębionymi jest bardziej złożona niż wirników z magnesami klejonymi powierzchniowo. Zaletą tego sposobu mocowania magnesów jest również łatwy sposób wymiany magnesów oraz zmiany geometrii szczeliny roboczej. Konstrukcja takiego wirnika ma więk-

szą odporność na rozmagnesowanie oraz jest mniej wrażliwa na działanie sił odśrodkowych.

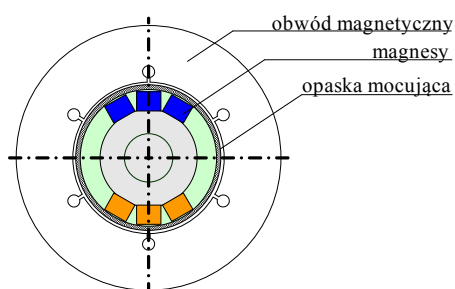


Rys. 2. Rozmieszczenie magnesów na powierzchni wirnika z opaską mocującą oraz kierunki wektorów magnetyzacji: a) magnes łukowy, magnesowany równoległe; b) magnes łukowy, magnesowany promieniowo; c) dwa magnesy łukowe, magnesowane równoległe; d) trzy magnesy sztabkowe, magnesowane równoległe

Na rysunku 2 pokazano możliwości kształtowania pola w szczeliny silnika poprzez zastosowanie odpowiedniego sposobu magnesowania. Ponieważ magnesy są mocowane do wirnika, najprostszym technologicznie jest wykorzystanie magnesów łukowych będących wycinkiem pierścienia. W zależności od kierunku magnesowania można wyróżnić magnesy magnesowane równoległe do średnicy (rys. 2a) oraz magnesy o magnesowaniu promieniowym (rys. 2b). Przeważająca większość magnesów o dużej indukcji magnetycznej spotykanych w praktyce to magnesy o magnesowaniu równoległym. Zatem, aby wykorzystać te magnesy w obwodzie wirnika, należy stworzyć magnes składający się z pojedynczych magnesów - segmentów. Na rysunku 2c przedstawiono układ z dwoma magnesami łukowymi magnesowanymi równoległe. Na kolejnym rysunku 2d zilustrowano zastosowanie trzech magnesów sztabkowych magnesowanych równoległe do

budowy jednego magnesu o magnesowaniu promieniowym [4], [7], [12].

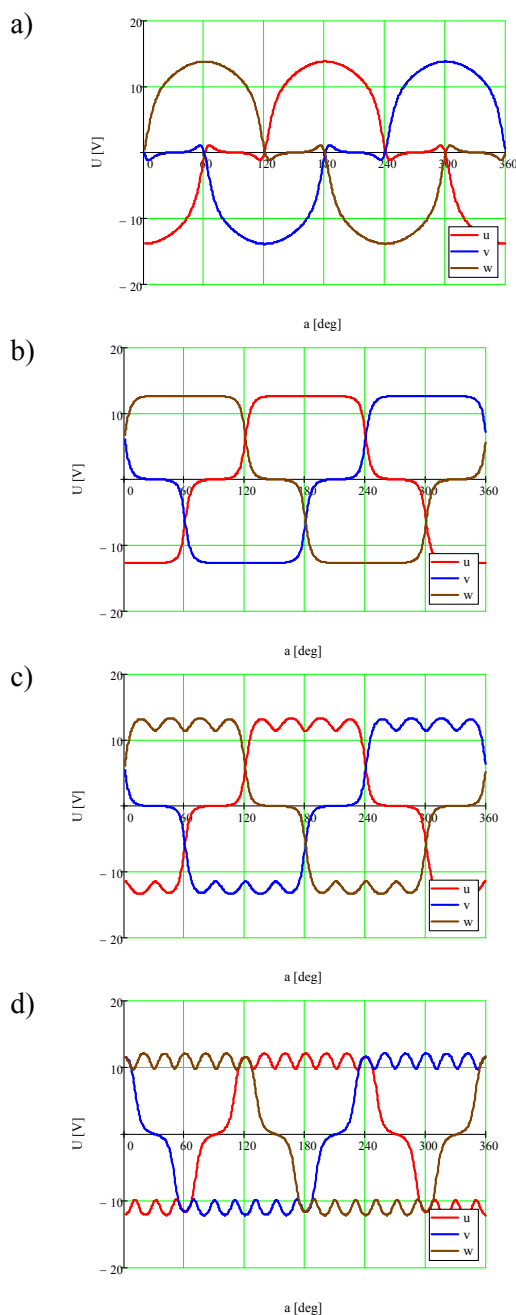
Wpływ kształtu magnesu i kierunku magnesowania na właściwości silnika PM BLDC przedstawiono na rysunku 4, gdzie zaprezentowano wyniki symulacji metodą elementów skończonych (FEM) wykonanej dla pracy generatorowej silnika nieobciążonego, o stałej prędkości obrotowej i konstrukcji obwodu stojana ze żłobkami półtwartymi (rys. 3) [6], [8], [12]. Zarejestrowane wyniki symulacji przedstawiono w funkcji kąta elektrycznego obrotu wirnika.



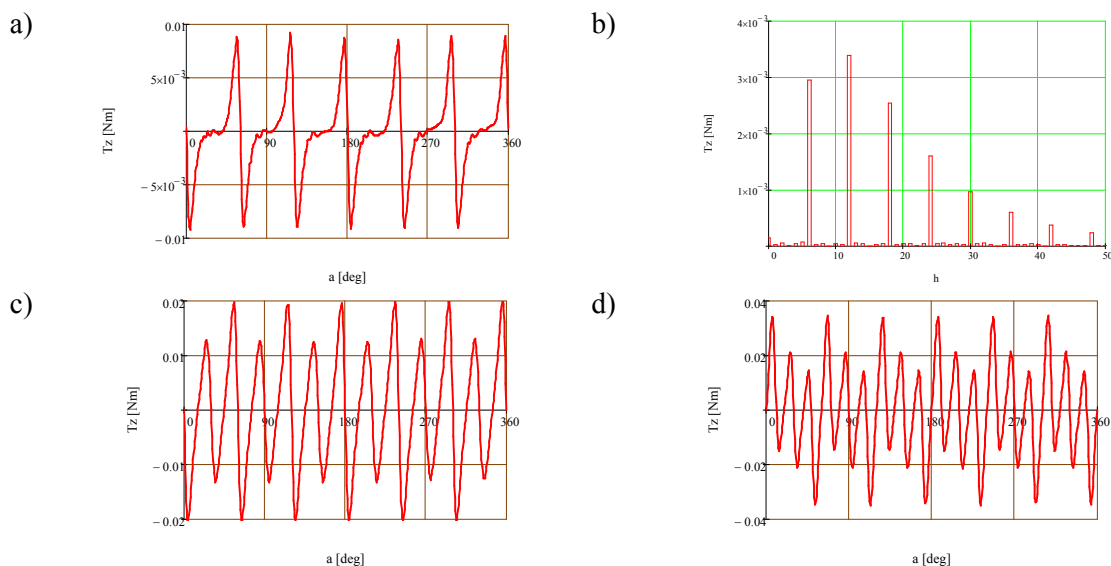
Rys. 3. Budowa wysokoobrotowego silnika PM BLDC

W silniku PM BLDC przebieg napięć indukowanych w uzwojeniach stojana powinien być trapezoidalny (rys. 4). Wówczas, przy stałym prądzie stojana powstaje stały moment elektromagnetyczny. Jak widać na rysunkach, najbardziej zbliżony do przebiegu trapezoidalnego jest przebieg uzyskany dla magnesu łukowego o magnesowaniu promieniowym (rys. 4b). Taki sposób magnesowania jest jednak najtrudniejszy do zrealizowania. Z rysunków (rys. 4c, d) wynika, że stosowanie magnesów segmentowych odpowiednio usytuowanych na wirniku, powoduje indukowanie się w uzwojeniu dodatkowej składowej pulsacyjnej napięcia związanej z liczbą pojedynczych magnesów (segmentów). Przebiegi napięcia indukowane dla wersji z magnesem łukowym magnesowanym równolegle wskazują, że ten sposób magnesowania magnesów nie zapewnia korzystnego kształtu siły elektromotorycznej silnika PM BLDC [1], [12]. Oprócz przebiegów napięć indukowanych w uzwojeniach silników, ważnym czynnikiem konstrukcyjnym jest wartość i częstotliwość momentu zaczepowego. Wielkość momentu zaczepowego zależy głównie od otwarcia żłobków, ukształtowania i sposobu magnesowania magnesów trwałych oraz od grubości szczeliny powietrznej [1], [8], [12]. Krotność częstotliwości pulsacji momentu n_h (w stosunku do często-

tliwości wynikającej z prędkości wirowania) zależy od liczby żłobków stojana i liczby biegunów.



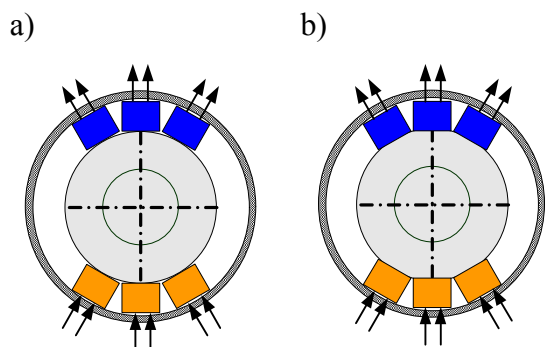
Rys. 4. Napięcie fazowe indukowane w silniku przy pracy generatorowej dla kąta magnesu 120° : a) magnes łukowy, magnesowany równolegle; b) magnes łukowy, magnesowany promieniowo; c) cztery magnesy łukowe, magnesowane równolegle; d) siedem magnesów sztabkowych, magnesowanych równolegle



Rys. 5. Przebiegi momentu zaczepowego: a) magnes łukowy, magnesowany promieniowo; c) cztery magnesy łukowe, magnesowane równoległe; d) trzy magnesy, magnesowane równoległe oraz b) widmo harmonicznych dla magnesu łukowego, magnesowanego promieniowo

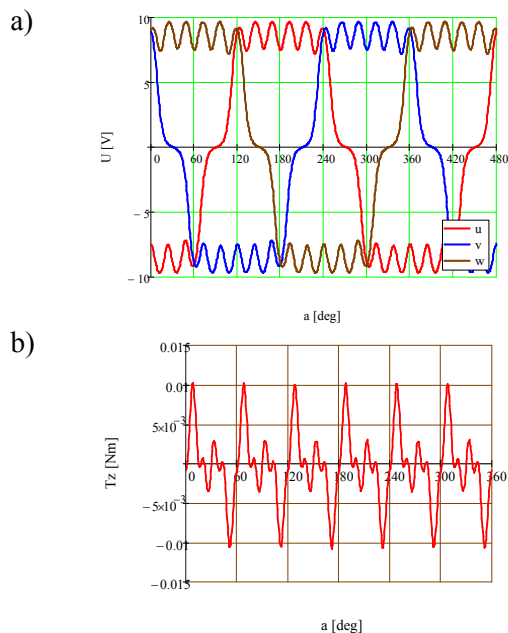
Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi momentu zaczepowego oraz widmo harmonicznych dla magnesu łukowego, magnesowanego promieniowo o kącie 120° . Uzyskane wyniki dowodzą, że wartości momentów zaczepowych są mniejsze dla magnesów łukowych niż dla magnesów złożonych z segmentów. W przypadku magnesów segmentowych następuje wzrost tętnień o około 2,5 raza, co może stanowić kilkanaście procent momentu znamionowego.

zestawiono rozmieszczenie magnesów osadzonych na wirniku z magnesami częściowo osadzonymi w wirniku. Z przedstawionych przebiegów (rys. 7) wynika, że osadzenie magnesów w wirniku powoduje wzrost pulsacji napięcia indukowanego w silniku, zmniejszeniu ulega również wartość średnia indukowanego napięcia, jak również moment zaczepowy o około 2 razy [9], [11], [12].



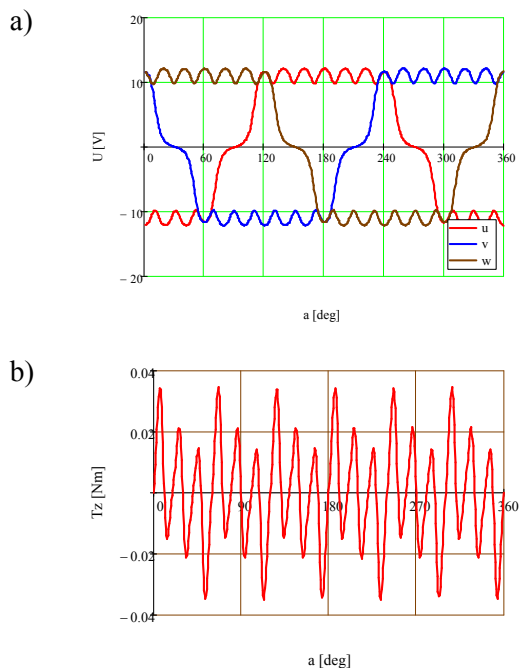
Rys. 6. Rozmieszczenie magnesów i kierunki wektorów magnetyzacji dla magnesów magnesowanych równoległe: a) mocowane na obwodzie wirnika; b) częściowo osadzone w wirniku

W silnikach wysokoobrotowych, ze względu na duże prędkości i oddziaływanie sił odśrodkowych na magnesy mocowane na powierzchni wirnika istnieje możliwość zwiększenia przylegania magnesu do wirnika przez częściowe osadzenie magnesów na wirniku. Na rysunku 6



Rys. 7. Przebiegi silnika z magnesami mocowanymi częściowo osadzonymi na wirniku (6 magnesów); a) napięcia indukowane w uzwojeniach; b) moment zaczepowy

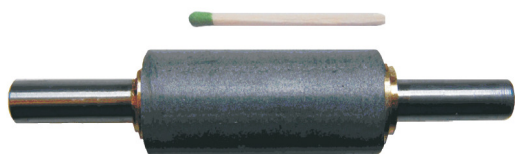
Stosując w silnikach PM BLDC konstrukcję segmentową wirnika istnieje łatwa możliwość zmiany szerokości czynnej magnesu. Porównując przebiegi z rysunków 4c i 7a i 8a, gdzie zastosowano odpowiednio 4, 6 i 7 magnesów, widać wyraźnie wydłużanie się podstawy przebiegu napięcia indukowanego w uzwojeniu.



Rys. 8. Przebiegi obliczone dla silnika z magnesami mocowanymi na powierzchni wirnika (7 magnesów): a) napięcia indukowane w uzwojeniach; b) moment zaczepowy

3. Badania laboratoryjne

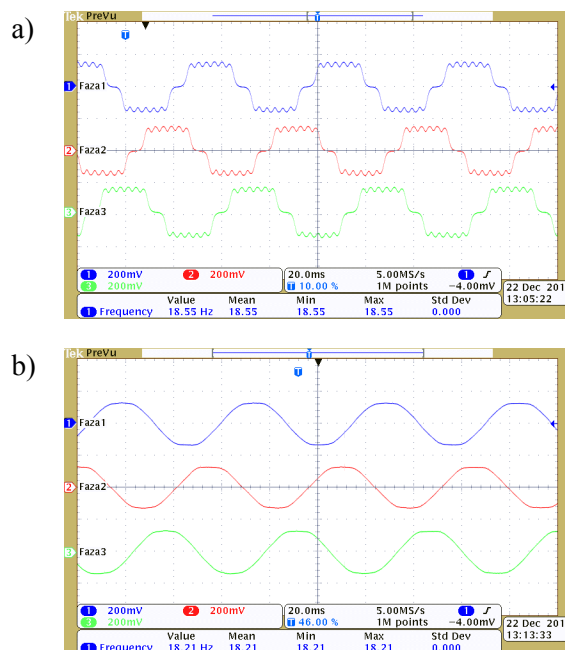
W trakcie prac nad opracowaniem wysokoobrotowego silnika prądu stałego (PM BLDC) wykonano kilka prototypów o różnej konstrukcji obwodu magnetycznego z materiału amorficznego [5], [6] oraz wirnika, do budowy którego wykorzystano magnesy sztabkowe (rys. 6b). Ze względu na duże siły odśrodkowe zastosowano dodatkową opaskę mocującą (rys. 9).



Rys. 9. Wirnik wysokoobrotowego silnika PM BLDC z magnesami sztabkowymi

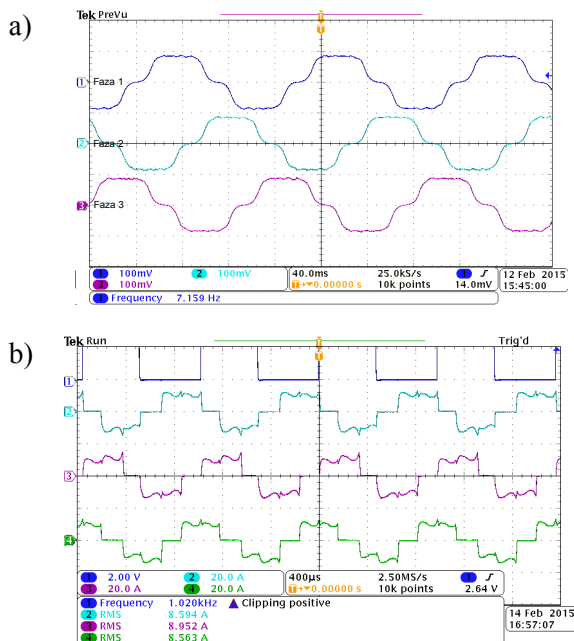
Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono zarejestrowane napięcia indukowane (SEM) w silni-

kach PM BLDC dla pracy generatorowej. Pierwszy przebieg (rys. 10a) został zarejestrowany dla silnika o konstrukcji obwodu magnetycznego ze zębami półtwartymi i 6 magnesami sztabkowymi osadzonymi na wirniku. Drugi przebieg zarejestrowano dla silnika bezzłobkowego o takim samym wirniku (rys. 10b). Porównując przebiegi można zauważyć brak pulsacji napięcia indukowanego w silniku bezzłobkowym. Niekorzystną cechą tego przebiegu jest natomiast brak płaskiego odcinka SEM, tak jak to jest widoczne na rys. 10a.



Rys. 10. Napięcia indukowane w wysokoobrotowym silniku PM BLDC przy pracy generatorowej z sześcioma magnesami sztabkowymi: a) konstrukcja z zębami półtwartymi; b) konstrukcja bezzłobkowa obwodu magnetycznego

Na rysunku 11a przedstawiono przebiegi napięcia indukowanego w ulepszonej wersji silnika ze zębami półtwartymi i magnesami sztabkowymi wpuszczonymi w wirnik. Pulsacje napięcia zostały zminimalizowane, a kształt zbliżony do przebiegu trapezoidalnego. Rysunek 11b przedstawia przebiegi sygnału z czujnika hallotronowego i prądów fazowych silnika zarejestrowane dla prędkości 61 000 obr/min.



Rys. 11. Przebiegi ulepszonego wysokoobrotowego silnika PM BLDC ze żłobkami półotwartymi: a) napięcia indukowane w silniku przy pracy generatorowej; b) sygnał z czujnika hallotronowego oraz prądy fazowe dla prędkości 61 000obr/min

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę, w jaki sposób rozmieszczenie, kształt magnesów trwałych oraz sposób magnesowania wpływają na napięcia indukowane w silniku PM BLDC. Wyniki symulacji komputerowej wykonanej metodą elementów skończonych poparto wynikami badań laboratoryjnych. W opracowanym wysokoobrotowym bezszczotkowym silniku prądu stałego wirnik został wykonany z magnesów sztabkowych, osadzonych na wirniku i mocowanych powierzchniowo. Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły, że konstrukcja wirnika z magnesami osadzonymi częściowo na wirniku umożliwia pracę silników z prędkościami rzędu 100 000obr/min.

Praca została wykonana w ramach projektu MNiSW - Fundusze Strukturalne nr POIG.01.03.01-00-058/08.

5. Literatura

[1]. M. Ciurys, I. Dudzikowski: „Analiza wpływu wymiarów i kształtu magnesów trwałych na moment elektromagnetyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napę-*

dów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, Nr 25, 2005.

[2]. A. Domoracki, J. Hetmańczyk: „Ograniczenie komutacyjnych tętnień momentu w bezszczotkowym silniku prądu stałego”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, str. 205-207, 2004.

[3]. Z. Gałuszkiewicz, K. Krykowski, R. Miksiewicz, J. Hetmańczyk: „Budowa i realizacja wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86 nr 2/2010.

[4]. T. Glinka, A. Borkowski: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, nr 9, 2012. s. 33-43.

[5]. J. Hetmańczyk, K. Krykowski, Z. Gałuszkiewicz, R. Miksiewicz, D. Makiela: „Wysokoobrotowy silnik wzbudzany magnesami trwałymi”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 86, str. 129-134, 2010.

[6]. J. Hetmańczyk, K. Krykowski, Z. Gałuszkiewicz, R. Miksiewicz, D. Makiela: „Porównanie właściwości wysokoobrotowego silnika PM BLDC ze stojanem bezżłobkowym i żłobkowym”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 90, str. 117-122, 2011.

[7] J. Bernatt: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi”, *Wydawnictwo KOMEL*, 2010.

[8]. K. Krykowski, J. Hetmańczyk, Z. Gałuszkiewicz, R. Miksiewicz: „Computer analysis of high-speed PM BLDC motor properties”, *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 30, issue 3, str. 941-956, 2011.

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

[10]. K. Krykowski: „Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym analiza, właściwości, modelowanie”. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2011.

[11]. M. Łukaniszyn, A. Młot: „Analiza momentu elektromagnetycznego i składowych pulsujących w bezszczotkowym silniku prądu stałego wzbudzonym magnesami trwałymi”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1, str. 21-25, 2005.

[12]. R. Miksiewicz: „Influence of magnets shape and magnetization direction on BLDC motor properties”, *XVII International Symposium on Electric Machinery ISEM'2009*, Prague 2009.

Autor

dr inż. Janusz Hetmańczyk
Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki,
Napędu Elektrycznego i Robotyki
ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
e-mail: Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl