

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

ANALIZA PORÓWNAWCZA WŁAŚCIWOŚCI BEZSZCZOTKOWEGO SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DLA RÓŻNYCH KONFIGURACJI UZWOJENIA STOJANA

PROPERTIES OF BRUSHLESS DC MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS AND DIFFERENT WINDING CONFIGURATIONS: A COMPARATIVE STUDY

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych wielobiegunowego bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi. Rozpatrywano dwie konfiguracje uzwojeń silnika, tj. połączenie w gwiazdę i trójkąt przy założeniu stałych danych nawojowych. Na bazie obliczeń numerycznych wyznaczono momentowe charakterystyki statyczne silnika oraz ruchowe w pełnym zakresie zmiany prędkości obrotowej. W warunkach laboratoryjnych dokonano weryfikacji obliczeń numerycznych.

Abstract: In the paper, results of simulation and laboratory tests of a multi-pole brushless DC motor with permanent magnets were presented. Studies were carried out for two cases (i.e. wye winding configuration and delta winding configuration) on the assumption that winding parameters are constant. The static torque characteristic and the torque-speed characteristic over full speed range were determined based on numerical calculations. Simulation results were validated by a comparison with the laboratory test results.

Słowa kluczowe: konfiguracja uzwojenia stojana, gwiazda, trójkąt, bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi

Keywords: stator winding configuration, star, delta, brushless permanent magnet motor

1. Wstęp

W trakcie projektowania trójfazowego (lub większej liczbie faz) silnika projektant ma do wyboru nie tylko różnego rodzaju konfigurację uzwojenia [1], ale również dwa sposoby ich połączenia tj. gwiazdę lub trójkąt. Każda z tych konfiguracji ma swoje zalety i wady. W przypadku małych wielobiegunowych bezszczotkowych silników z magnesami trwałymi typowo stosuje się połączenie uzwojeń stojana w trójkąt. Za tą konfiguracją przemawia relatywnie niska wartość napięcia zasilającego (zazwyczaj wynosząca od kilku do kilkudziesięciu woltów). W przypadku takich rozwiązań silnik zaprojektowany przy połączeniu uzwojeń w trójkąt będzie posiadał większą sprawność [2]. Zmiana konfiguracji uzwojenia w trakcie pracy silnika jest często stosowana w silnikach indukcyjnych (poprzez stosowanie przełącznika gwiazda-trójkąt). W przypadku bezszczotkowych silników z komutacją elektroniczną teoretycznie jest to również możliwe. Wymaga to jednak rozbudowania zarówno układu energoelektronicznego jak i samego algorytmu sterowania.

W artykule dokonano analizy wpływu zmiany konfiguracji uzwojenia stojana na właściwości

wielobiegunowego bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi przeznaczonego do pracy w szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej. Na bazie obliczeń numerycznych wyznaczono momentowe charakterystyki statyczne, napięcie indukowane oraz charakterystyki ruchowe dla uzwojenia skojarzonego w gwiazdę i trójkąt bez zmiany danych nawojowych. Oba sposoby skojarzenia uzwojeń zostały przebadane w warunkach laboratoryjnych. Zamieszczono wnioski dotyczące wpływu zmiany konfiguracji uzwojenia stojana na właściwości silnika.

2. Analizowana konstrukcja

Analizowana konstrukcja wielobiegunowego bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi została zaprojektowana w ramach realizowanego projektu dotyczącego napędu hybrydowego małego bezzałogowego statku powietrznego. Silnik został przewidziany do zasilania z baterii akumulatorów o napięciu 52 V. W trakcie tego konkretnego projektu rozważano różne konfiguracje uzwojenia stojana oraz liczbę gałęzi równoległych [3]. Ostatecznie w silniku zastosowano uzwojenie połączone

w trójkąt z czterema gałęziami równoległymi. Ta wersja na etapie projektu w oparciu o obliczenia numeryczne została wybrana z uwagi na najkorzystniejsze parametry silnika. Na rys. 1 pokazano wykonany prototyp analizowanego silnika.



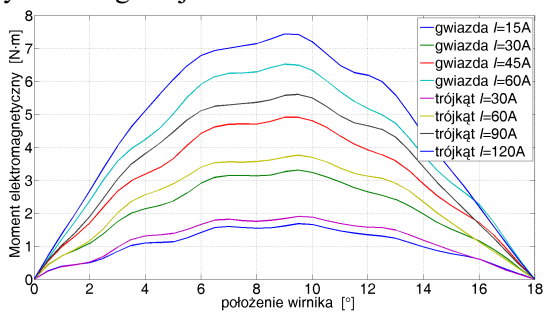
Rys. 1. Analizowana konstrukcja wielobiegunowego bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi

Z uwagi na prototypowy charakter konstrukcji na etapie jego uzwojania zostały wyprowadzone poza silnik wszystkie końcówki poszczególnych gałęzi równoległych.

3. Obliczenia numeryczne

3.1. Charakterystyki statyczne momentowe

Momentowe charakterystyki statyczne zostały wyznaczone przy założeniu stałej wartości prądu I pobieranego ze źródła zasilającego w funkcji kąta położenia wirnika dla połowy okresu elektrycznego co odpowiada 18° stopniom mechanicznym. Dla połączenia w trójkąt prąd I jest prądem przewodowym. Na rysunku 2 pokazano wyznaczone momentowe charakterystyki statyczne wyznaczone dla analizowanych konfiguracji.

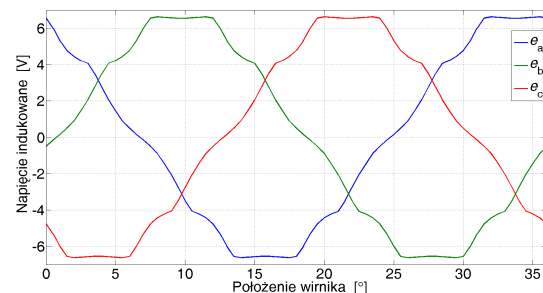


Rys. 2. Zależność momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika dla połączenia uzwojeń w gwiazdę i trójkąt przy $I=var$

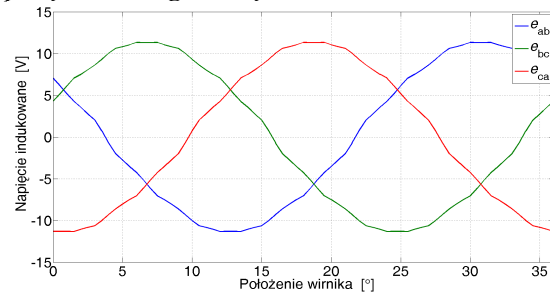
Dla uzwojenia połączonego w trójkąt uzyskanie tej samej wartości momentu elektromagnetycznego jak przy konfiguracji w gwiazdę wymaga zwiększenia wartości prądu I około 174%.

3.2. Napięcie indukowane

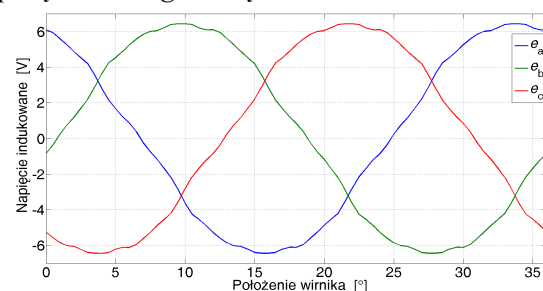
Napięcie indukowane zostało wyznaczone przy zastosowaniu modelu połowo-obwodowego i założeniu stałej prędkości obrotowej wynoszącej 1000 obr/min. Na rysunkach 3-5 pokazano zależności napięć indukowanych w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w gwiazdę (rys.3-4) oraz trójkąt (rys.5).



Rys. 3. Zależność fazowego napięcia indukowanego w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w gwiazdę



Rys. 4. Zależność przewodowego napięcia indukowanego w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w gwiazdę

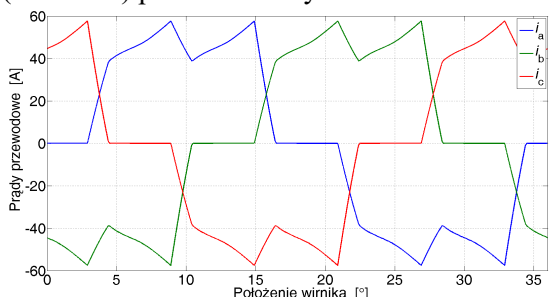


Rys. 5. Zależność napięcia indukowanego w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w trójkąt

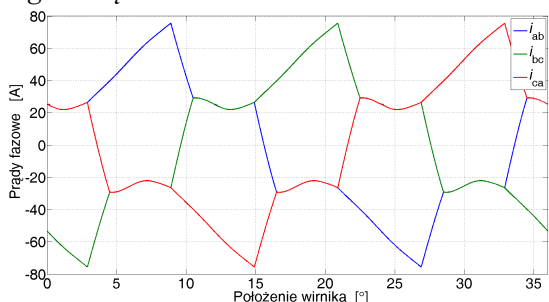
Napięcie fazowe indukowane przy połączeniu w gwiazdę (max 6.6 V) jest nieznacznie większe niż w przypadku konfiguracji w trójkąt (max 6.4 V).

3.3. Charakterystyki ruchowe

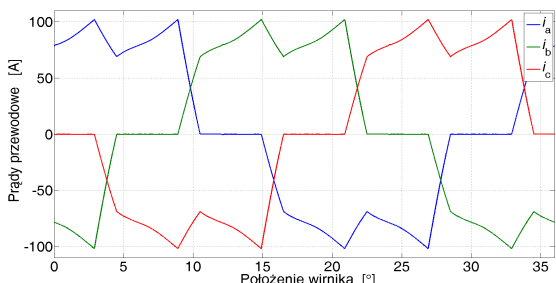
Przykładowe zależności prądów przewodowych oraz fazowych wyznaczonych przy założeniu zasilania napięciem 52 V (znamionowym) oraz obciążeniu silnika momentem znamionowym (4.16 N·m) pokazano na rysunkach 6-8.



Rys. 6. Zależność prądów przewodowych w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w gwiazdę

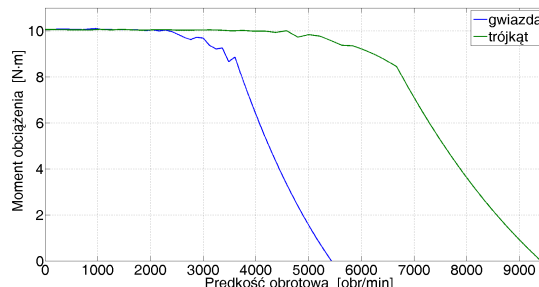


Rys. 7. Zależność prądów fazowych w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w trójkąt

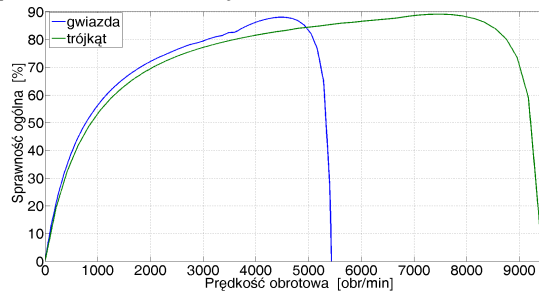


Rys. 8. Zależność prądów przewodowych w funkcji kąta położenia wirnika dla połączenia w trójkąt

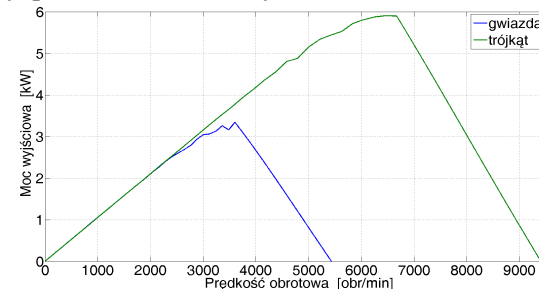
Charakterystyki ruchowe zostały wyznaczone w pełnym zakresie regulacji prędkości obrotowej dla obu konfiguracji uzwojeń. W przypadku uzwojeń połączonych w gwiazdę histerezy regulator prądu ograniczał wartość maksymalną prądu fazowego do 115 A, natomiast w przypadku połączenia w trójkąt wartość maksymalną prądów przewodowych ograniczano do 200 A. Zależność momentu obciążenia, sprawności wypadkowej, mocy wyjściowej w funkcji prędkości obrotowej pokazano na rys. 9-11.



Rys. 9. Zależność momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 10. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prędkości obrotowej

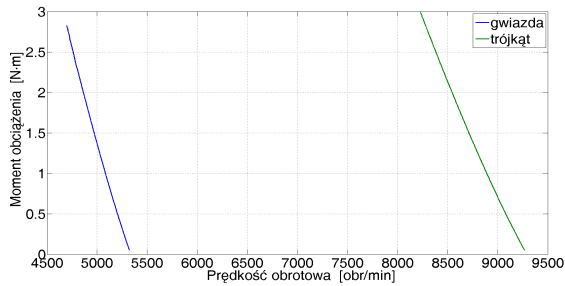


Rys. 11. Zależność mocy wyjściowej w funkcji prędkości obrotowej

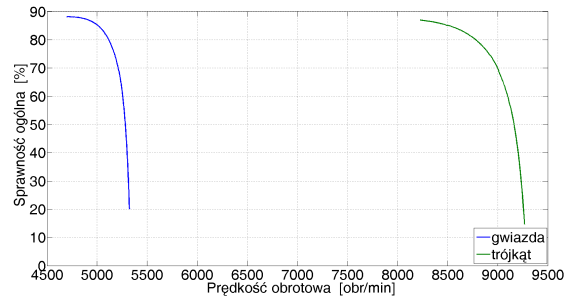
Większą sprawność ogólną uzyskano dla konfiguracji uzwojeń w trójkąt (89.8 %) niż dla gwiazdy (89 %). Należy jednak zauważyć, że częstotliwość komutacji uzwojeń połączonych w trójkąt jest praktycznie dwa razy większa. Straty mechaniczne są również istotnie wyższe. Jednocześnie przy konfiguracji uzwojeń w gwiazdę po przejściu w zakres pracy ze stałym momentem sprawność układu będzie zauważalnie większa.

4. Badania laboratoryjne

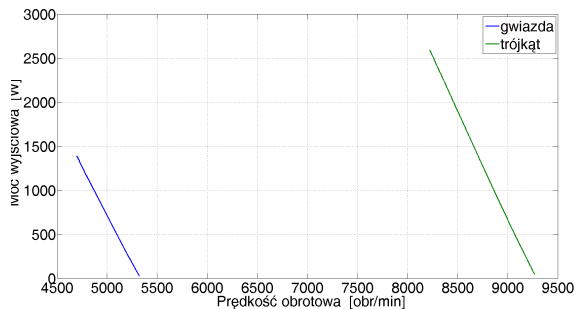
Badania laboratoryjne przeprowadzono dla obu konfiguracji połączeń uzwojeń stojana. Do obciążania silnika zastosowano hamownicę wiropadową WB 43 o mocy znamionowej 3 kW i 3 N·m (powyżej 6000 obr/min). Z uwagi na ograniczenia hamownicy obciążenie silnika połączanego w gwiazdę musiało zostać odpowiednio zmniejszone. Wyniki badań laboratoryjnych pokazano na rysunkach 12-16.



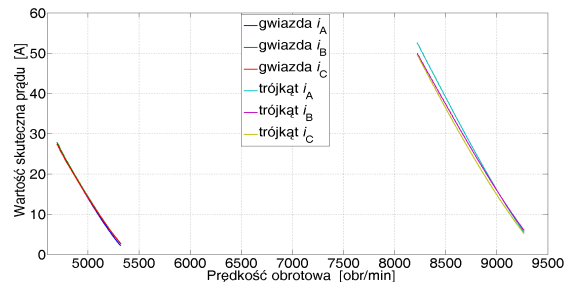
Rys. 12. Zależność momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 13. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 15. Zależność mocy wyjściowej w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 16. Zależność wartości skutecznej prądów przewodowych w funkcji prędkości obrotowej

5. Podsumowanie

Wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że dla analizowanej konstrukcji wielobiegunowej korzystniejsza jest konfiguracja uzwojeń w trójkąt. Momentowe charakterystyki statyczne silnika przy konfiguracji uzwojeń w trójkąt czy też gwiazdę nie różnią się kształtem. Jednak dla tej samej wartości prądu pobieranego ze źródła dla połączenia w gwiazdę wytwarzany jest pra-

wie dwa razy większy moment elektromagnetyczny. Zmiana konfiguracji uzwojeń wpływa w niewielkim stopniu na zmianę kształtu przewodowego napięcia indukowanego. Oba napięcia są bliższe przebiegowi sinusoidalnemu. Napięcie fazowe przy połączeniu w gwiazdę jest zbliżone do trapezoidalnego. Przy połączeniu uzwojeń w trójkąt można uzyskać wzrost sprawności silnika przy pracy z pełnymysterowaniem (charakterystyce naturalnej). Należy jednak zauważyć, że poprawa sprawności ogólnej układu napędowego w analizowanym przypadku nie jest duża. Przy doborze rozpiętości kątowej magnesów trwałych dla uzwojeń przewidzianych do konfiguracji w trójkąt należy zwracać uwagę na wartość prądu pochodzącego od trzeciej harmonicznej (i jej krotności) napięcia indukowanego. Uzwojenia stojana połączone w trójkąt są również bardziej podatne na niewspółosiowość montażowe, czy też inne czynniki wpływające na kształt i wartość napięcia indukowanego w poszczególnych fazach silnika. Problem ten zaobserwowano w badanym silniku. W warunkach laboratoryjnych przy napięciu zasilającym wynoszącym 52 V uzyskano sprawność większą przy konfiguracji uzwojeń w gwiazdę. Jednak silnik przy połączeniu w trójkąt pracował przy praktycznie dwukrotnie większej prędkości obrotowej, co wpływało na wzrost strat mechanicznych oraz strat w żelazie silnika.

6. Literatura

- [1]. J. Zembruski "Poradnik przezwajania silników indukcyjnych", WNT Warszawa, 2009.
- [2]. M. Korkosz "Wpływ konfiguracji uzwojeń na parametry silnika BLDC przeznaczonego do hybrydowego napędu bezzałogowego aparatu latającego", *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3a, str. 53 -56, 2013.
- [3]. P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop "Wpływ konfiguracji uzwojeń na właściwości bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1, 227 -230, 2017.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl

dr hab. inż. Mariusz Korkosz

mkosz@prz.edu.pl

dr hab. inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów