

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

## WPLYW KONFIGURACJI UZWOJEŃ NA WŁAŚCIWOŚCI BEZSZCZOTKOWEGO SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### INFLUENCE OF WINDINGS CONFIGURATION ON PROPERTIES OF BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTOR

**Streszczenie:** W zastosowaniach na potrzeby lotnictwa podstawowymi kryteriami branymi pod uwagę w procesie projektowania silników elektrycznych są: mała masa maszyny, związana z tym duża gęstość mocy na jednostkę objętości oraz wysoka sprawność. Ponadto występują ograniczenia co do wartości napięcia zasilającego. Rozwiązaniem problemu osiągnięcia pożądanego punktu pracy silnika jest zastosowanie konstrukcji wielobiegunowych, w których uzwojenia składają się z kilku gałęzi równoległych. W pracy zamieszczono wyniki badań symulacyjnych analizy wpływu liczby gałęzi równoległych uzwojeń wielobiegunowego bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi na jego właściwości. Badania prowadzono dla silnika przeznaczonego do napędu hybrydowego samolotu bezzałogowego. Zamieszczono wyniki badań charakterystyk statycznych oraz przebiegów czasowych napięć i prądów w określonym punkcie pracy projektowanego silnika.

**Abstract:** In aviation, a small mass of the electric machine but with high power density per volume unit and also high efficiency are required during design process. Additionally, restrictions concerning the value of supply voltage are also important. A multi-pole structure, in which windings consist on several parallel branches, can be a solution for this problem. In the paper, results of simulation tests concerning analysis of influence of parallel branches number of multi-pole brushless motor with permanent magnets on its properties were presented. Research were conducted for motor designed for hybrid unmanned aerial vehicle. Results of static characteristics research and waveforms of voltages and currents at defined working point of the machine were presented.

**Słowa kluczowe:** *bezczotkowy silnik z magnesami trwałymi, konstrukcja wielobiegunowa, niskonapięciowy, gałęzie równoległe*

**Keywords:** *brushless motor with permanent magnet, multipole construction, low voltage, parallel branch*

#### 1. Wstęp

Konstrukcje wielobiegunowe maszyn elektrycznych z reguły posiadają liczbę żłobków stojana większą niż liczba biegunów wirnika [1-4]. W konsekwencji stwarza to różne możliwości doboru i konfiguracji uzwojeń maszyny [4-6]. Jest to szczególnie istotne w przypadku maszyn przeznaczonych do zasilania ze źródeł niskonapięciowych. W przypadku bezszczotkowych maszyn z magnesami trwałymi, z uwagi na istnienie silnego pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych, w odniesieniu np. do silników indukcyjnych, stosuje się mniejsze liczby zwojów przypadających na jedno pasmo maszyny. W przypadku doboru uzwojenia należy rozważyć jaki rodzaj uzwojenia i w jakiej konfiguracji będzie najkorzystniejszy z punktu widzenia uzyskania zakładanego punktu pracy maszyny.

W pracy na drodze obliczeń symulacyjnych badano wpływ doboru liczby gałęzi równoległych uzwojenia na parametry projektowanej maszyny z magnesami trwałymi. Dla kilku wariantów konfiguracji uzwojeń wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz zależności sprawności ogólnej od prędkości przy założeniu, że każdy wariant zapewnia uzyskanie wymaganego punktu pracy położonego na naturalnej charakterystyce mechanicznej silnika. Dokonano porównania uzyskanych wyników badań nie tylko pod względem parametrów elektrycznych, ale również zużycia materiału przewodzącego oraz masy części aktywnej silnika.

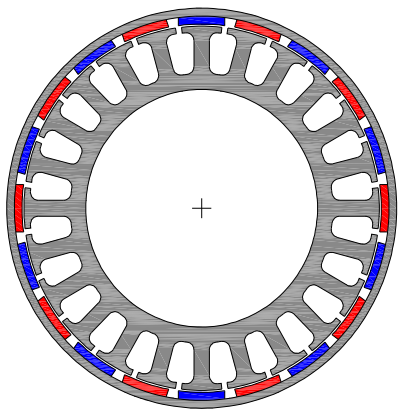
#### 2. Założenia projektowe

Projektowanej konstrukcji silnika zostały postawione wymagania wynikające z przewidywanego jego zastosowania, tj. zastosowania do napędu hybrydowego samolotu bezzałogowego.

Przyjęto, że od projektowanej maszyny wymaga się, aby:

- dysponowała mocą na wale nie mniejszą niż 3500 W przy napięciu zasilającym wynoszącym 52 V,
- osiągała wymaganą moc wyjściową przy prędkości obrotowej 8000 obr/min na charakterystyce naturalnej,
- wytwarzała moment rozruchowy nie mniejszy niż 8 N·m bez przekraczania wartości maksymalnej 200 A prądu źródła zasilającego,
- była zdolna do chwilowego przeciążenia mocą wynoszącą nie mniej niż 180 % mocy znamionowej,
- posiadała możliwie wysoką sprawność ogólną w zakresie pracy silnikowej i generatorowej,
- charakteryzowała się możliwie małą masą.

Na podstawie wcześniejszych analiz do projektowanego napędu hybrydowego została wybrana konstrukcja maszyny elektrycznej posiadająca 10 par biegunów wirnika oraz 24 żłobki stojana. W projektowanej konstrukcji przewidziano zastosowanie wirnika zewnętrznego. W ramach prac projektowych określono wymiary geometryczne maszyny przy założeniu, że zostaną zastosowane magnesy klasy N48H. Na rysunku 1 pokazano geometrię zaprojektowanej maszyny z magnesami trwałymi.



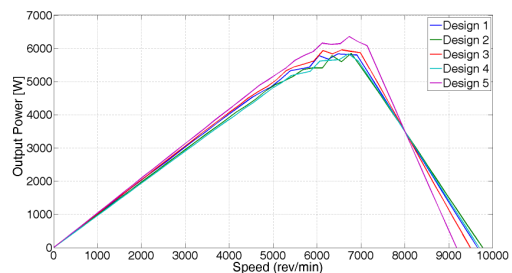
Rys. 1. Geometria stojana i wirnika wielobiegunowej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi

Na każde pasmo silnika przypada po 8 żłobków. Z uwagi na relatywnie niewielką moc założono, że zostanie zastosowane uzwojenie skupione, które pozwala na istotne ograniczenie długości połączeń czołowych oraz skrócenie całkowitej długości maszyny. Jednocześnie założono możliwość zastosowania w każdym pasmie odpowiednio jednej, dwóch lub czterech gałęzi równoległych.

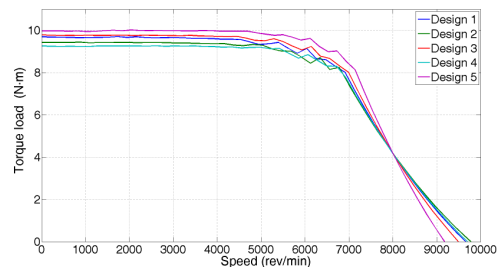
### 3. Badania wpływu liczby gałęzi równoległych na właściwości silnika

#### 3.1. Charakterystyki ruchowe

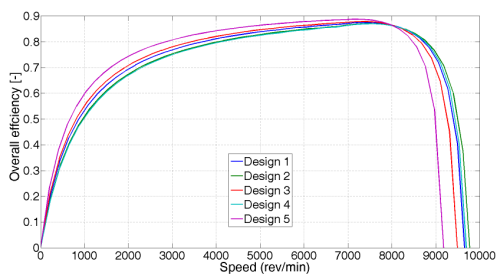
Dla stałych wymiarów maszyny dokonano analizy wpływu liczby gałęzi równoległych pasma na parametry silnika przy założeniu, że bazowym rozwiązaniem będzie przypadek z czterema gałęziami równoległymi oznaczony jako „Design 1”. Dla tego przypadku dobrano liczbę zwojów oraz długość czynną maszyny, tak aby spełniała ona wymagania układu napędowego. W przypadku uzwojenia pasma składającego się z dwóch gałęzi równoległych analizowano dwa warianty oznaczone jako „Design 2” i Design 3”. Dla klasycznego rozwiązania z jedną gałęzią (czterema grupami połączonymi szeregowo) również rozpatrywano dwa przypadki oznaczone jako „Design 4” i Design 5”. W przypadku od „Design 2” do „Design 5” zmieniano liczbę zwojów przypadających na jeden biegun  $N_b$ , liczbę drutów  $N_{row}$  w wiązce równoległej oraz długość czynną maszyny  $l_{Fe}$ , tak aby uzyskać wymaganą moc przy prędkości 8000 obr/min. Na rysunkach 2-4 pokazano odpowiednio zależność mocy wyjściowej (rys.2) momentu na wale silnika (rys.3) oraz sprawności ogólnej układu napędowego (rys.4) w funkcji prędkości obrotowej. W obliczeniach założono, że prądy przewodowe silnika będą ograniczane do wartości 200 A.



Rys. 2. Zależność mocy wyjściowej w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 3. Zależność momentu na wale w funkcji prędkości obrotowej



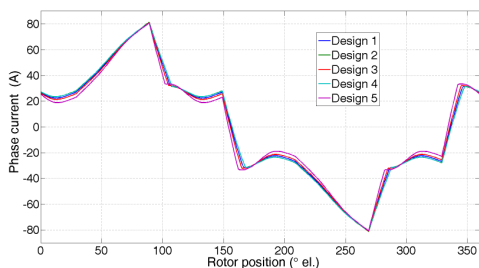
Rys. 4. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prędkości obrotowej

W punkcie 3.3 dokonano zestawienia uzyskanych wyników badań.

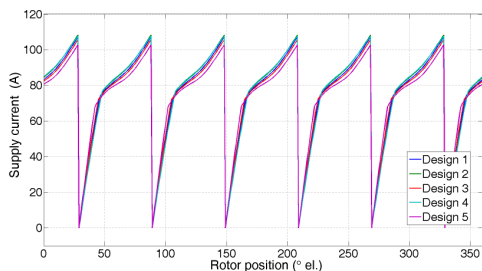
### 3.2. Przebiegi czasowe prądów i napięć

Dla projektowanego silnika i zakładanego punktu pracy pokazano wybrane przebiegi czasowe prądów oraz napięć tj. przy napięciu zasilającym wynoszącym 52 V oraz prędkości obrotowej  $n=8000$  obr/min. Na rysunkach 5-7 pokazano zależność jednego z prądów fazowych silnika (rys.5), prądu źródła zasilającego (rys.7) oraz napięcia przewodowego (rys.7) w funkcji kąta położenia wirnika (w stopniach elektrycznych) dla pięciu analizowanych wariantów.

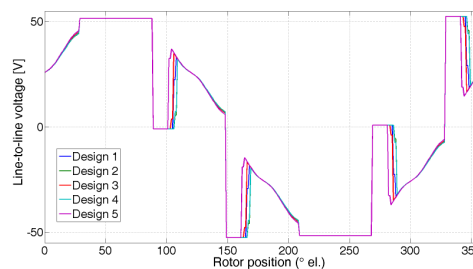
Ogólnie pomiędzy poszczególnymi zależnościami występują niewielkie różnice. Pokazane wybrane przebiegi są dowodem, że wszystkie omawiane warianty konstrukcji silnika zapewniają uzyskanie wymaganej mocy przy prędkości 8000 obr/min.



Rys. 5. Zależność prądu fazowego silnika w funkcji kąta obrotu wirnika



Rys. 6. Zależność prądu zasilającego silnik w funkcji kąta obrotu wirnika



Rys. 7. Zależność napięcia przewodowego silnika w funkcji kąta obrotu wirnika

### 3.3. Analiza wyników badań

Na bazie uzyskanych wyników badań w Tabeli 1 zestawiono wybrane parametry projektowanej konstrukcji. Długość czynną obwodu magnetycznego projektowanych wariantów od 2 do 5 odniesiono do wariantu 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań

Parametr\Wariant	Design 1	Design 2	Design 3	Design 4	Design 5
Liczba gałęzi równoległych	4	2	2	1	1
Liczba zwojów przypadających na jeden biegun Nb	15	8	7	4	3
Współczynnik zapelnienia żłobka $k_z$ [%]	45.1	45.4	44.4	45.3	45.1
Masa uzwojenia [kg]	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	0.19	<b>0.18</b>	0.21
Masa części czynnej [kg]	0.75	<b>0.71</b>	0.81	<b>0.71</b>	0.97
Rezystancja fazowa [mΩ]	27	30	25	30	<b>20</b>
Indukcyjność połączenia czołowego [μH]	2.1	2.4	1.8	2.4	<b>1.4</b>
Stała momentowa przy rozruchu [N·m/A]	0.049	0.048	0.049	0.047	<b>0.050</b>
Prędkość biegu jałowego [obr/min]	9707	<b>9838</b>	9525	9749	9380
Straty w żelazie [W]	159	<b>147</b>	174	149	210
Straty w miedzi [W]	143	161	128	161	<b>98</b>
Moc wejściowa [W]	4045	4053	<b>4044</b>	4054	4047
Sprawność ogólna [%]	<b>86.5</b>	86.3	<b>86.5</b>	86.3	86.4
Moment rozruchowy [N·m]	9.7	9.4	9.8	9.2	<b>9.9</b>
Względna długość czynna obwodu magnetycznego [%]	100	<b>92.5</b>	109.2	93.3	132.4

Ze wszystkich rozpatrywanych wariantów najbardziej interesujące są przypadki Design 1, Design 2 i Design 4. Oznacza to, że możliwe jest zastosowanie w analizowanej konstrukcji zarówno klasycznego uzwojenia z jedną gałęzią

(wariant Design 4), z dwoma gałęziami równoległymi (wariant Design 2) oraz czterema gałęziami równoległymi (wariant Design 1). Jednocześnie warianty Design 2 i Design 4 posiadają mniejsze wartości momentu rozruchowego oraz sprawności ogólnej. Różnice w sprawnościach ogólnych są niewielkie, ale znacznie większe znaczenie w projektowanej konstrukcji ma moment rozruchowy. Z tego też względu w układzie praktycznym napędu hybrydowego samolotu bezzałogowego został zastosowany wariant 1.

#### 4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wyniki analizy wpływu liczby zastosowanych gałęzi równoległych uzwojenia na parametry wielobiegunowego bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi. Wyniki analizy wykazały, że w danym przypadku możliwe jest zastosowanie zarówno jednej, dwóch czy też czterech gałęzi równoległych w każdym paśmie. Do układu praktycznego napędu hybrydowego ostatecznie wybrano wariant silnika elektrycznego z czterema gałęziami równoległymi. Za tym wyborem przemawia największy z tych trzech wariantów moment rozruchowy, największa sprawność oraz najmniejsza liczba drutów przypadających na jeden zewój. Z uwagi na zastosowanie niskonapięciowe wraz ze wzrostem liczby gałęzi równoległych maleje liczba drutów w wiązce równoległej. W analizie założono, że w każdym przypadku współczynnik wypełnienia żłobka będzie porównywalny. W praktyce może być to trudne do osiągnięcia. Wraz ze wzrostem liczby drutów przypadających na jeden zwój znacznie gorzej jest osiągnąć zakładany współczynnik wypełnienia żłobka szczególnie kiedy stosuje się żłobki półzamknięte o małej wartości otwarcia.

#### 5. Literatura

[1]. Zembrzusi J.: "Poradnik przewijania silników indukcyjnych", WNT Warszawa, 2009.

[2]. Chan C. C., Jiang J. Z., Chen G. H., Wang X. Y., Chau K. T.: "A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, Issue:5, 1994, pp.1258-1266.

[3]. Fukami T., Matsuura Y., Shima K., Momiyama M., Kawamura M.: "A Multipole Synchronous Machine With Nonoverlapping Concentrated Armature and Field Windings on the Stator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, Issue:6, 2012, pp. 2583-2591.

[4]. Kwon S., Kim S., Zhang P., Hong J.: "Performance comparison of IPMSM with distributed and concentrated windings", Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Vol.4, 2006, pp.1984-1988.

[5]. Dąbrowski M.: "Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego", WNT Warszawa, 1988.

[6]. EL-Refaie A. M.: "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, Issue:1, 2010, pp.107-121.

#### 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

#### Informacje dodatkowe

Badania finansowane z projektu badawczego "Technologie hybrydowego zespołu napędowego lekkich lub bezzałogowych statków powietrznych" - DZP/INNOLOT-1/2020/2013 oraz działalności statutowej Zakładu Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych Politechniki Rzeszowskiej.