

# Analiza wpływu konfiguracji uzwojeń na właściwości bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Bartłomiej Pakla, Jan Prokop

## 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.

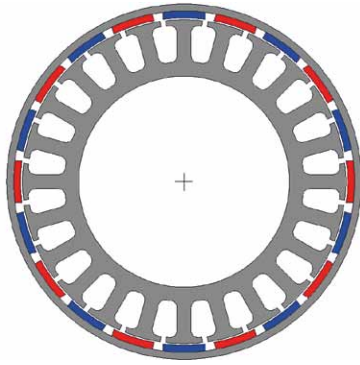
**Streszczenie:** W zastosowaniach na potrzeby lotnictwa podstawowymi kryteriami branżowymi pod uwagę w procesie projektowania silników elektrycznych są mała masa maszyny i związana z tym duża gęstość mocy na jednostkę objętości oraz wysoka sprawność. Ponadto występują ograniczenia co do wartości napięcia 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. W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono testy praktyczne wybranej konfiguracji.

Słowa kluczowe: bezszczotkowy silnik z magnesami trwałymi, konstrukcja wielobiegunowa, niskonapięciowy, gałęzie równoległe, badania laboratoryjne

**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.

Keywords: brushless motor with permanent magnet, multi-pole construction, low voltage, parallel branch, laboratory test

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



Rys. 1. Przekrój poprzeczny wielobiegunowej, bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi

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.

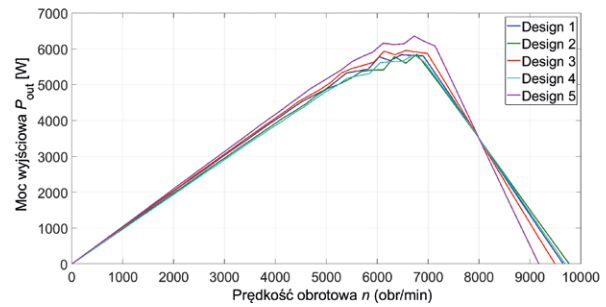
Na każde pasmo silnika przypada po 8 łóbków. Z uwagi na relatywnie niewielką moc założono, że zostanie zastosowane uzwojenie skupione, które pozwala na istotne ograniczenie długości połączeń czołowych oraz skrócenie całkowitej długości maszyny. Jednocześnie założono możliwość zastosowania w każdym pasmie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

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

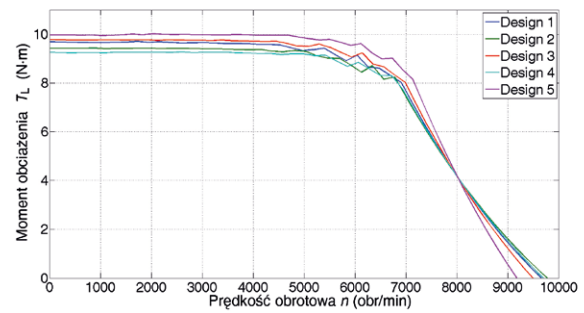
#### 3.1. Charakterystyki ruchowe

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.

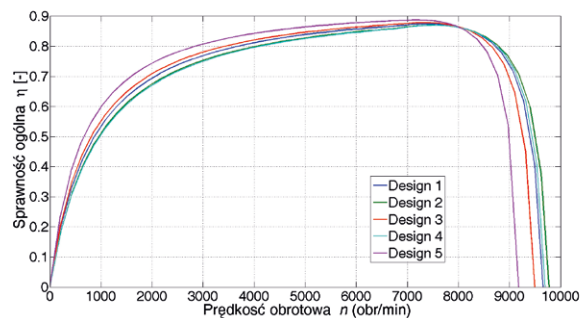
W punkcie 3.3 dokonano zestawienia uzyskanych wyników badań.



Rys. 2. Zależność mocy wyjściowej  $P_{out}$  w funkcji prędkości obrotowej  $n$



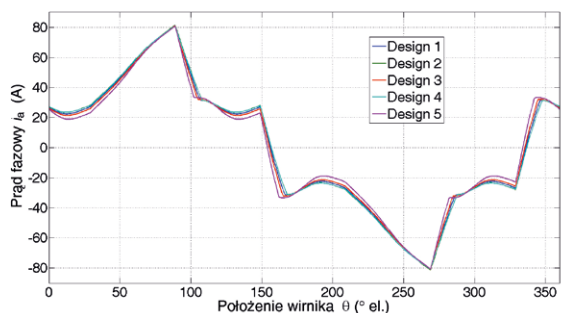
Rys. 3. Zależność momentu na wale  $T_L$  w funkcji prędkości obrotowej  $n$



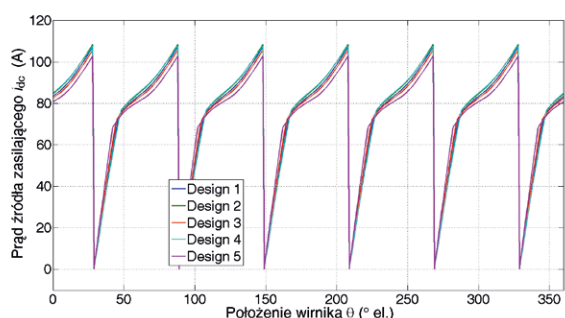
Rys. 4. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prędkości obrotowej  $n$

#### 3.2. Przebiegi czasowe prądów i napięć

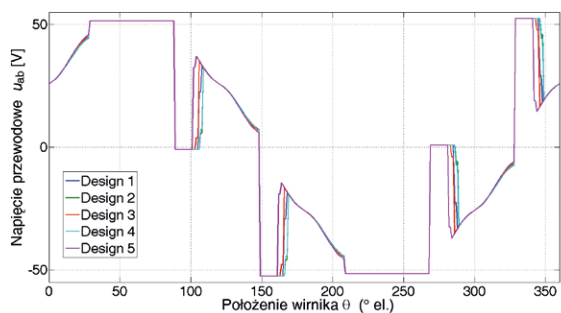
Dla projektowanego silnika w zakładanym punkcie pracy zostały pokazane wybrane przebiegi czasowe prądów oraz napięć, tj. przy napięciu zasilającym wynoszącym 52 V oraz prędkości obrotowej  $n = 8000$  obr./min. Na rysunkach 5–7 pokazano zależność jednego z prądów fazowych silnika (rys. 5), prądu źródła zasilającego (rys. 6) oraz napięcia przewodowego (rys. 7) w funkcji kąta położenia wirnika (w stopniach elektrycznych) dla pięciu analizowanych wariantów.



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

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.

### 3.3. Analiza wyników badań

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

Ze wszystkich rozpatrywanych wariantów najbardziej interesujące są przypadki Design 1, Design 2 i Design 4. Oznacza

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 $N_b$	15	8	7	4	3
Współczynnik wypełnienia żłobka $k_z$ [%]	45,1	45,4	44,4	45,3	45,1
Masa uzwojenia [kg]	0,18	0,18	0,19	0,18	0,21
Masa części czynnej [kg]	0,75	0,71	0,81	0,71	0,97
Rezystancja fazowa [mΩ]	27	30	25	30	20
Indukcyjność połączenia czołowego [μH]	2,1	2,4	1,8	2,4	1,4
Stała momentowa przy rozruchu [N · m/A]	0,049	0,048	0,049	0,047	0,050
Prędkość biegu jałowego [obr./min]	9707	9838	9525	9749	9380
Straty w żelazie [W]	159	147	174	149	210
Straty w miedzi [W]	143	161	128	161	98
Moc wejściowa [W]	4045	4053	4044	4054	4047
Sprawność ogólna [%]	86,5	86,3	86,5	86,3	86,4
Moment rozruchowy [N · m]	9,7	9,4	9,8	9,2	9,9
Względna długość czynna obwodu magnetycznego [%]	100	92,5	109,2	93,3	132,4

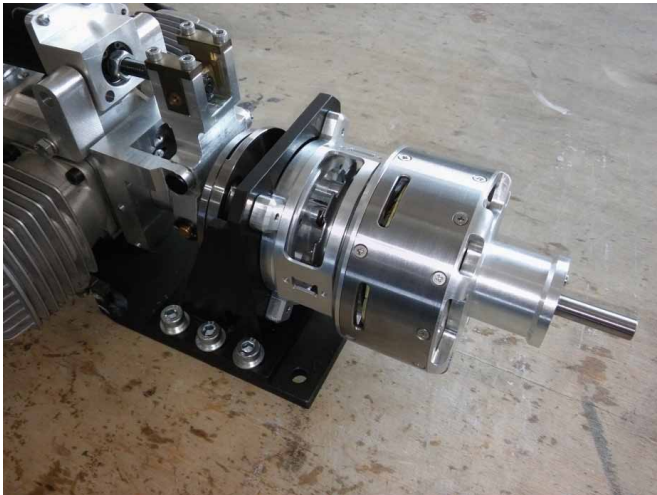
to, że możliwe jest zastosowanie w analizowanej konstrukcji zarówno klasycznego uzwojenia z jedną gałęzią (wariant Design 4), z dwiema gałęziami równoległymi (wariant Design 2) oraz czterema gałęziami równoległymi (wariant Design 1). Jednocześnie warianty Design 2 i Design 4 posiadają mniejsze wartości momentu rozruchowego oraz sprawności ogólne. 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. Wybrane wyniki badań laboratoryjnych

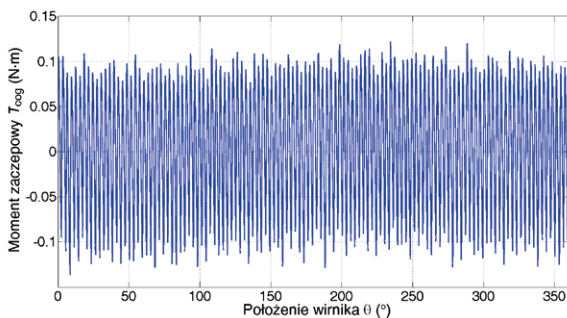
Wariant 1 silnika został wykonany praktycznie. Na rys. 8 pokazano wykonany prototypowy napęd hybrydowy UAV z zaprojektowanym przez autorów silnikiem BLDC.

Śmigło zostało przewidziane do zamontowania na wale silnika BLDC. Sam silnik BLDC został połączony z silnikiem spalinowym za pomocą specjalnie zaprojektowanego sprzęgła. W takiej konfiguracji napędu hybrydowego (praca na wspólnym wale) od maszyny elektrycznej wymaga się małej wartości momentu zaczepowego. Dla ograniczenia strat w żelazie silnika, wywołanych dużą częstotliwością komutacyjną uzwojeń, zastosowano blachę magnetyczną o grubości 0,23 mm (blachę anizotropową M120-23S). Przy zastosowaniu odpowiedniego sposobu pakietowania blach wpływ efektu anizotropowości

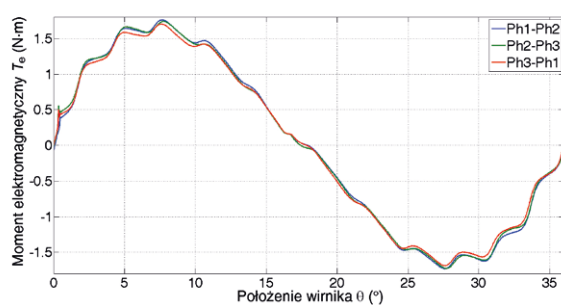




Rys. 8. Napęd hybrydowy UAV z zaprojektowanym silnikiem BLDC



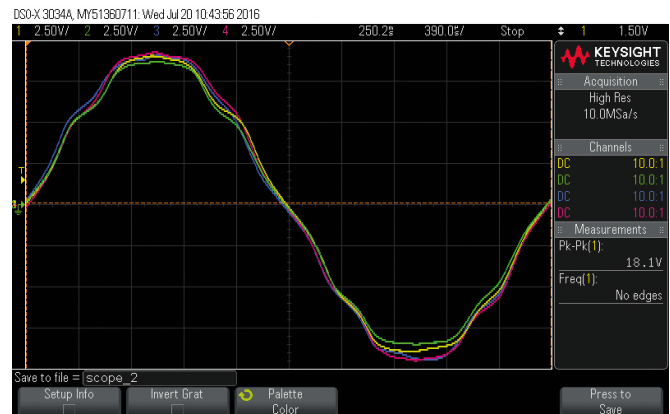
Rys. 9. Zależność momentu zaczepowego w funkcji położenia wirnika



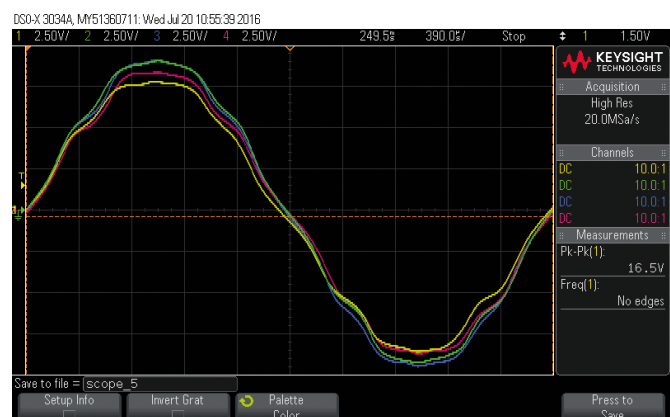
Rys. 10. Zależność statycznego momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika

na moment zaczepowy czy też moment elektromagnetyczny można praktycznie wyeliminować. Zaprojektowana konstrukcja warunków ten spełnia. Na rysunku 9 pokazano zależność momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wirnika, wyznaczonego w warunkach laboratoryjnych.

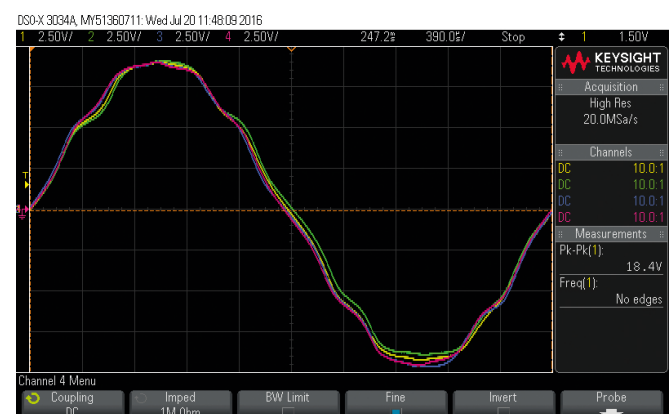
Styczne charakterystyki momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta położenia wirnika, wyznaczone przy prądzie  $I = 30$  A, pokazano na rysunku 10.



Rys. 11. Przebiegi czasowe napięć indukowanych w poszczególnych gałęziach równoległych pasma Ph1



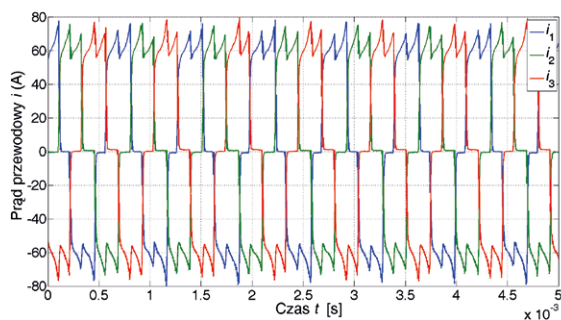
Rys. 12. Przebiegi czasowe napięć indukowanych w poszczególnych gałęziach równoległych pasma Ph2



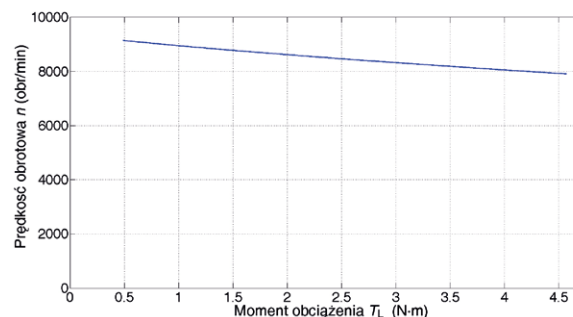
Rys. 13. Przebiegi czasowe napięć indukowanych w poszczególnych gałęziach równoległych pasma Ph3

Również w przypadku statycznych charakterystyk momentu elektromagnetycznego różnice pomiędzy poszczególnymi przypadkami zasilania poszczególnych pasm są niewielkie.

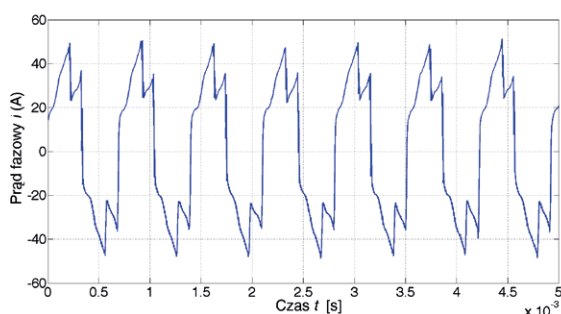
W warunkach laboratoryjnych zostały również zarejestrowane przebiegi czasowe napięć indukowanych w poszczególnych gałęziach równoległych każdego z pasm silnika. Na rysunkach 11–13 pokazano zarejestrowane napięcia indukowane prototypowego silnika.



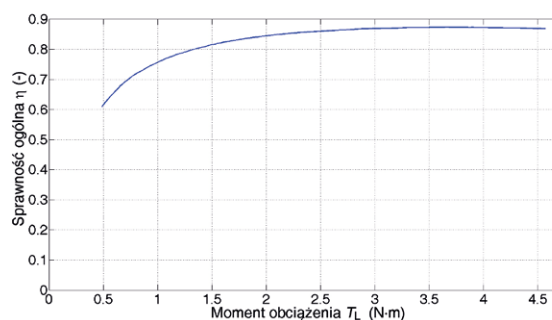
**Rys. 14.** Przebiegi czasowe prądów przewodowych



**Rys. 16.** Zależność prędkości obrotowej w funkcji momentu obciążenia



**Rys. 15.** Przebieg czasowy prądu fazowego



**Rys. 17.** Zależność sprawności ogólnej w funkcji momentu obciążenia

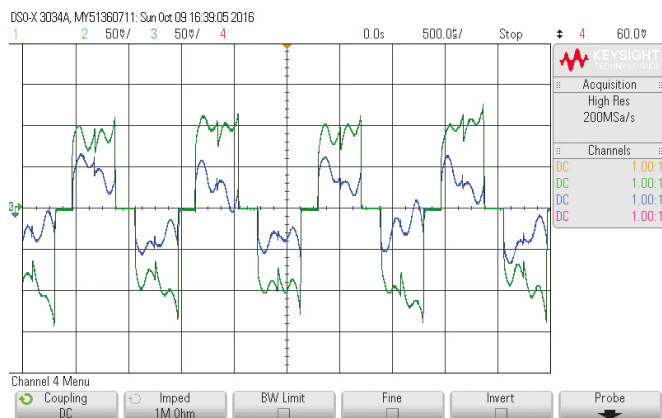
Największe różnice w wartościach napięć indukowanych w poszczególnych gałęziach równoległych zaobserwowano w pasmie  $Ph2$ . W pozostałych dwóch pasmach różnice nie są aż tak duże. Niemniej jednak z uwagi na konfigurację uzwojeń silnika w trójkąt nie jest to sytuacja korzystna. Dysproporcje pomiędzy poszczególnymi napięciami indukowanymi zarówno w obrębie jednego pasma, jak też pomiędzy poszczególnymi pasmami wpływają na pogorszenie sprawności silnika.

W warunkach laboratoryjnych dokonano rejestracji przebiegów czasowych prądów przewodowych i fazowych silnika. Wybrane przebiegi czasowe prądów pokazano na rysunkach 14–15.

Przykładowe charakterystyki mechaniczne oraz sprawności ogólnej w funkcji momentu obciążenia pokazano na rysunkach 16–17. Charakterystyki wyznaczono dla znamionowej wartości napięcia zasilającego ( $U_{dc} = 52$  V).

Zastosowanie większej liczby gałęzi równoległych daje możliwość podwyższenia niezawodności układu napędowego. Propozycję takiego układu napędowego autorzy zaprezentowali np. w pracy [8]. Jest to koncepcja zasilania dwukanałowego, która wymaga dwóch niezależnych układów zasilających oraz dwóch niezależnych uzwojeń silnika. Zasilanie dwukanałowego silnika pozwala nie tylko podwyższyć niezawodność układu napędowego, ale również np. częściowo ograniczyć problem prądów wyrównawczych płynących w gałęziach równoległych. Przykładowe przebiegi czasowe prądów przewodowych silnika obu kanałów (A i B) pokazano na rysunku 18.

Na rysunku 18 widoczna jest duża dysproporcja pomiędzy prądami przewodowymi w obu kanałach. Jest to skutek różnic



**Rys. 18.** Przebiegi czasowe prądów przewodowych kanału A i B

w napięciach indukowanych, pokazanych na rysunkach 11–13. Najkorzystniejszą sytuacją jest przypadek, kiedy każdy kanał tworzą gałęzie równoległe, o zbliżonych wartościach napięcia indukowanego (w przypadku, kiedy ma się do czynienia z minimum czterema gałęziami równoległymi).

## 5. 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 jak 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 przewodów przypadających na jeden zwój. Z uwagi na zastosowanie niskonapięciowe wraz ze wzrostem liczby gałęzi równoległych maleje liczba przewodów 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 przewodów przypadających na jeden zwój znacznie gorzej jest osiągnąć zakładany współczynnik wypełnienia żłobka, szczególnie kiedy stosuje się żłobki półzamknięte o małej wartości otwarcia. Testy laboratoryjne wariantu 1 potwierdziły wyniki badań symulacyjnych co do słuszności podejścia. Jednocześnie testy laboratoryjne pokazały, że zastosowanie wielokrotnych gałęzi równoległych wymaga szczególnej precyzji w procesie technologicznym. Nawet stosunkowo niewielkie różnice w wartościach napięć indukowanych w poszczególnych gałęziach równoległych powodują powstawanie prądów wyrównawczych. Zastosowanie większej liczby gałęzi równoległych (dwóch, czterech itd.) w silniku pozwala zaprojektować napęd o podwyższonej niezawodności. Jest to możliwe poprzez zastosowanie np. zasilania dwukanałowego silnika.

## Literatura

- [1] ZEMBRZUSKI 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, pp. 1258–1266, 1994.
- [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, pp. 2583–2591, 2012.
- [4] SOON-O KWON; SUNG-IL KIM; PENG ZHANG; JUNG-PYO HONG: *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, pp. 1984–1988, 2006.
- [5] DĄBROWSKI M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1988.
- [6] EL-Refae A.M.: *Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, Issue: 1, pp. 107–121, 2010.
- [7] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Wpływ konfiguracji uzwojeń na właściwości bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(113)/2017.
- [8] KORKOSZ M., BOGUSZ P., PROKOP J.: *Modelling and experimental research of fault-tolerant dual-channel brushless DC motor*. IET Electr. Power Appl., DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0752, 2018 (w trakcie procesu publikacji).



dr inż. Piotr Bogusz, e-mail: pbogu@prz.edu.pl

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, e-mail: mkosz@prz.edu.pl

mgr inż. Bartłomiej Pakla, e-mail: b.pakla@prz.edu.pl

dr hab. inż. Jan Prokop, e-mail: jprokop@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

artykuł recenzowany