

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

BADANIA SILNIKA BLDC PRZEZNACZONEGO DO LOTNICZEGO NAPĘDU HYBRYDOWEGO

RESEARCH OF BLDC MOTOR DESIGNED FOR AIRCRAFT HYBRID DRIVE

Abstract: The concept of aircraft hybrid drive (engine – electric motor) was discussed in the paper. Basic laboratory research results of BLDC motor like dependence on electromagnetic torque and cogging torque vs rotor position were also included in the paper. Parameters needed for the proper performance of the BLDC motor in the aircraft hybrid drive were assessed.

1. Wstęp

W napędach lotniczych zarówno dużych samolotów, jak i małych modeli wykorzystuje się głównie silniki spalinowe. Jednak w modelarstwie już od dawna jest stosowany typowy napęd elektryczny jako alternatywa dla silnika spalinowego. Oba typy napędów mają swoje zalety i wady. Istotną zaletą silników elektrycznych jest znacznie wyższa sprawność energetyczna w porównaniu do silników spalinowych. W ostatnich latach rozpoczęto badania nad możliwością zastosowania, szczególnie w bezzałogowych modelach latających, napędów hybrydowych, spalinowo - elektrycznych [3, 5]. Nowoczesny napęd hybrydowy jest próbą połączenia zalet napędu z silnikiem spalinowym (duża wartość energetyczna paliwa lotniczego) oraz napędu z silnikiem elektrycznym (wysoka sprawność przetwarzania energii).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie uzyskanych przez autorów wyników badań w zakresie możliwości zastosowania silnika elektrycznego w lotniczym napędzie hybrydowym. Maszyną elektryczną charakteryzującą się wysokim wskaźnikiem gęstości energii przypadającym na jednostkę objętości jest bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi (BLDCM - ang. Brushless Direct Current Motor) [2, 4, 6]. Do badań laboratoryjnych wybrano przeznaczony do zastosowań modelarskich silnik BLDC, zasilany ze sterownika z wbudowanym algorytmem sterowania bezczujnikowego. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych określono przydatność omawianego silnika BLDC do zastosowania w lotniczym napędzie hybrydowym.

2. Koncepcja lotniczego napędu hybrydowego

W zależności od układu, w którym pracuje maszyna spalinowa i elektryczna, lotniczy napęd hybrydowy można podzielić na [7]:

- szeregowy,
- równoległy,
- mieszany.

W niniejszej pracy rozpatrywany jest układ szeregowy, w którym silnik spalinowy napędza generator, ten zaś wykorzystując baterię akumulatorów zasila silnik elektryczny napędzający śmigło. W tym układzie punkt pracy silnika spalinowego jest dobierany tak, aby pracował on z maksymalną sprawnością. Silnik elektryczny, napędzający śmigło, może pracować w jednym z trzech stanów. Pierwszym jest stan pracy z maksymalną mocą, który występuje w fazie wznoszenia się samolotu. W tym przypadku sterowanie jest ukierunkowane na uzyskanie odpowiedniej mocy na wale przy zachowaniu możliwie dużej sprawności. Po osiągnięciu pułapu przelotowego silnik elektryczny powinien pracować z maksymalną sprawnością, ponieważ jest to najdłuższy stan pracy maszyny. W trzecim stanie pracy, występującym w trakcie zmniejszania wysokości, silnik elektryczny jest obciążony niewielkim momentem (może nawet wystąpić stan bezprądu). W dalszej części pracy przeprowadzono badania silnika BLDC pod kątem zastosowania w lotniczym napędzie hybrydowym o konfiguracji szeregowej.

3. Badania laboratoryjne silnika BLDC

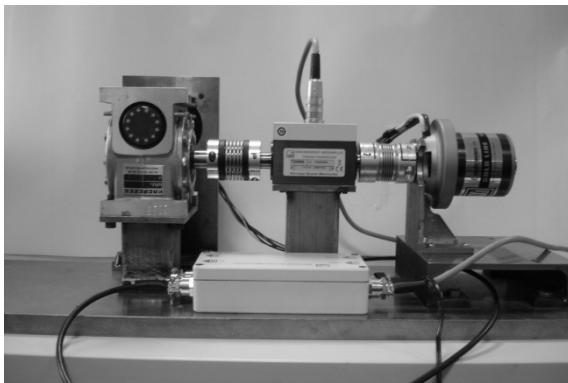
3.1. Obiekt badań i stanowisko pomiarowe

Obiektem badań laboratoryjnych był silnik BLDC dedykowany do zastosowań modelar-

skich, którego wybrane parametry zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry badanego silnika BLDC

Napięcie zasilające [V]	24-42
Liczba pasm	3
Liczba biegunów stojana	12
Liczba biegunów wirnika	14
Stała napięciowa k_V [obr/V]	120
Maksymalna sprawność [%]	94
Maksymalna wartość prądu [A]	65/20s
Rezystancja pasma [Ω]	0,068



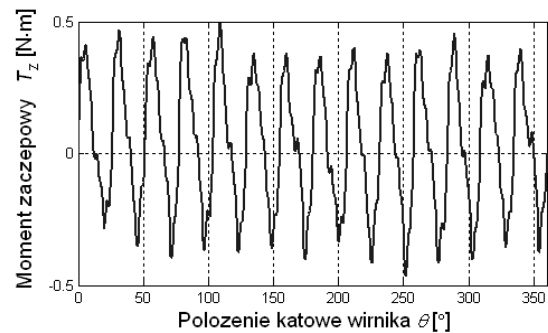
Rys. 1. Stanowisko do badania silnika BLDC

Do wyznaczenia charakterystyk statycznych silnika wykorzystano stanowisko przeznaczone do badań silników z komutacją elektroniczną [1]. Widok stanowiska pomiarowego do wyznaczania charakterystyk statycznych z zamocowanym silnikiem BLDC przedstawiono na rysunku 1. W skład stanowiska wchodzi, silnik skokowy (skok znamionowy $1,8^\circ$), przekładnia, przetwornik momentu oraz dwa sprzęgła. Po zdemontowaniu przekładni i silnika skokowego oraz zamocowaniu maszyny obciążającej stanowisko służy do wyznaczania charakterystyk ruchowych badanego silnika.

3.2. Pomiar charakterystyk statycznych

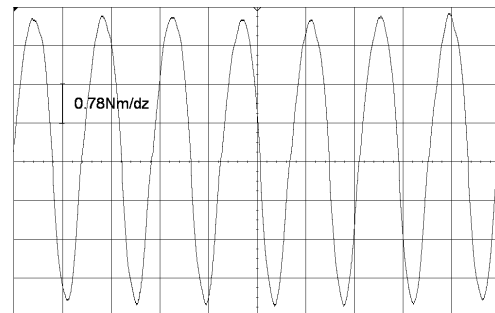
W przypadku silnika z magnesami trwałymi występuje konieczność wykonania pomiarów momentu w stanie bezprądowym, (tzw. momentu zaczepowego). Na rysunku 2 przedstawiono zależność momentu zaczepowego T_z w funkcji kąta położenia wirnika θ .

Wartość maksymalna momentu zaczepowego wynosi $0,5\text{Nm}$. Ponadto można zauważyć znaczne dysproporcje zarówno w samych kształtach, jak i amplitudach poszczególnych cykli momentu zaczepowego.

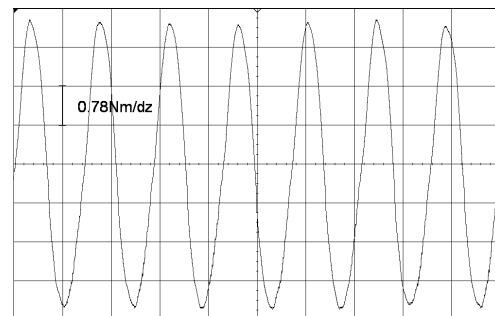


Rys. 2. Zależność momentu zaczepowego T_z w funkcji kąta położenia wirnika θ

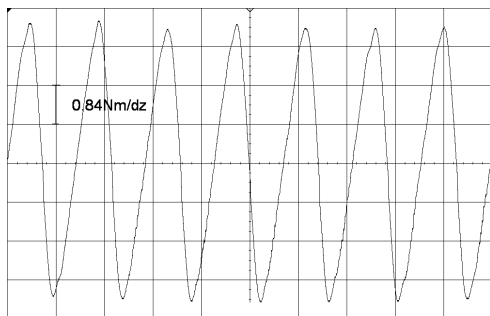
Przy zasilaniu dwóch pasm stałym prądem I , wyznaczano zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji zmiany kąta położenia wirnika θ . Pomiarów wykonano dla trzech możliwych kombinacji zasilania. Na rysunkach 3 ÷ 5 przedstawiono charakterystyki momentowe w zakresie pełnego obrotu wirnika dla trzech możliwych kombinacji ($Ph1-Ph2$, $Ph2-Ph3$ i $Ph3-Ph1$) zasilania pasm silnika dla prądu $I=30\text{A}$.



Rys. 3. Moment T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy zasilaniu pasm $Ph1-Ph2$



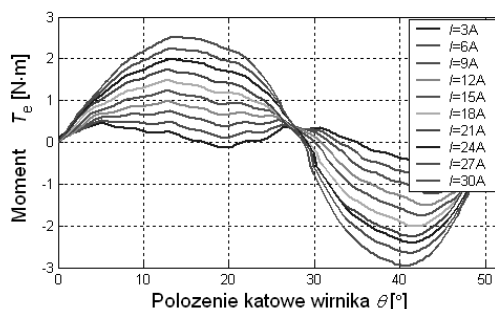
Rys. 4. Moment T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy zasilaniu pasm $Ph2-Ph3$



Rys. 5. Moment T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy zasilaniu pasm Ph3-Ph1

Porównując pokazane na rysunkach 3 ÷ 5 przebiegi momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąt obrotu wirnika θ można zauważyć znaczne dysproporcje dla poszczególnych kombinacji zasilania pasm. Są to różnice w kształtach przebiegów jak i wartościach maksymalnych.

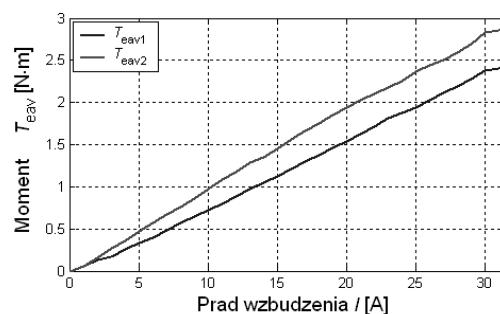
Na rysunku 6 pokazano charakterystyki momentowo - prądowo - kątowe przy zasilaniu pasm Ph1-Ph2.



Rys. 6. Charakterystyki momentowo-prądowo-kątowe przy zasilaniu pasm Ph1 – Ph2

Duża wartość maksymalna momentu zaczepowego ($T_{zmax}=0,5Nm$) powoduje znaczne deformacje [0] kształtu charakterystyk momentowych silnika. Widać bardzo duży wpływ momentu zaczepowego na kształt charakterystyki momentu, szczególnie przy prądzie mniejszym niż 15A.

Zależność wartości średniej momentu T_{eav} w funkcji prądu I przedstawiono na rysunku 7. Zależność wartości średniej momentu T_{eav} w funkcji prądu I ma praktycznie liniowy przebieg, [0]typowy dla tego rodzaju maszyn. Jak widać na rysunku 7 wartości średnie momentu elektromagnetycznego dla obu przedziałów położenia kątowego jak na rysunku 6 (T_{eav1} i T_{eav2}) znacznie się różnią. Przy prądzie $I=32A$ różnica ta wynosi około 0,4Nm.

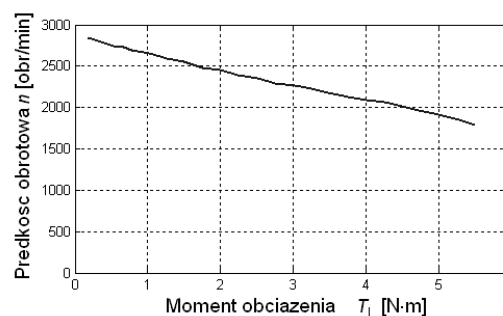


Rys. 7. Zależność wartości średniej momentu T_{eav} w funkcji prądu I przy zasilaniu pasm Ph1-Ph2

3.3. Wyznaczanie charakterystyk ruchowych

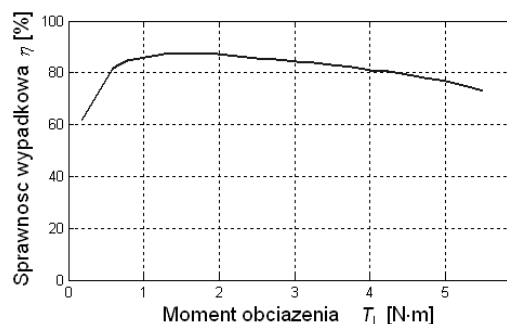
Charakterystyki ruchowe wyznaczano przy zasilaniu badanego silnika BLDC z baterii akumulatorów o napięciu znamionowym 24V.

Wartość momentu obciążenia T_L na wale silnika mierzono za pomocą przetwornika momentu. Dokonywano również pomiaru temperatury uzwojeń badanego silnika. Na rysunku 8 przedstawiono zależność prędkości obrotowej n w funkcji momentu obciążenia T_L .



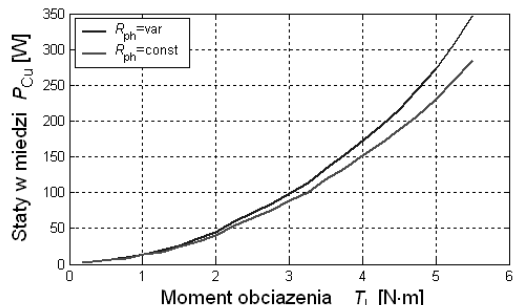
Rys. 8. Zależność prędkości obrotowej n w funkcji momentu obciążenia T_L

Sprawność wypadkową układu η w funkcji momentu obciążenia T_L przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Zależność sprawności η w funkcji momentu obciążenia T_L

Wyznaczona maksymalna sprawność silnika wynosi $\eta_{\max}=85\%$. Zakres optymalnej pracy silnika przypada na przedział obciążenia pomiędzy $T_L=(1\div 3)Nm$.



Rys. 10. Zależność strat w uzwojeniach ΔP_{Cu} w funkcji momentu obciążenia T_L

W trakcie pomiarów obserwowano znaczny wzrost temperatury uzwojeń badanego silnika. Na rysunku 9 przedstawiono zależność strat w uzwojeniach ΔP_{Cu} w funkcji momentu obciążenia T_L dla dwóch przypadków: przy stałej temperaturze silnika i z uwzględnieniem nagrzewania uzwojeń.

Można zauważyć, że nagrzewanie uzwojeń powoduje znaczące zmniejszenie się sprawności silnika, szczególnie dla większych wartości momentu obciążenia T_L . Nie bez znaczenia jest też wpływ temperatury na pogorszenie parametrów magnesów trwałych. Największą zaletą badanego silnika BLDC jest wysoka sprawność wypadkowa, uzyskana dzięki zastosowaniu odpowiednich blach obwodu magnetycznego stojana oraz magnesów wykonanych z pierwiastków ziem rzadkich. Największą wadą badanego silnika jest duża wartość maksymalnego momentu zaczepowego T_{zmax} . Nieco mniejszym problemem są znaczne dysproporcje pomiędzy charakterystykami momentowymi dla poszczególnych kombinacji zasilania pasm.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych silnika BLDC przeprowadzonych pod kątem zastosowania go w lotniczym napędzie hybrydowym. Badany silnik BLDC posiada wysoką sprawność, która jest szczególnie pożądana w napędach hybrydowych. Omawiany silnik posiada dwa mankamenty: dużą wartość momentu zaczepowego i znaczne dysproporcje charakterystyk momentowych dla poszczególnych pasm. Powyższe mankamenty nie są przeciwwskazaniem do zastosowania bada-

nego silnika w układzie napędowym hybrydy szeregowej.

5. Literatura

- [1]. Mercow B, Bennett J., Jack A., Atkinson D. and Freeman A: *Very High Efficiency Drives for Solar Powered*, Proceedings of the 2008 ICEM, pp.1-6, Unmanned Aircraft
- [2]. Lukic S.M. and Emadi A.: *Modeling of electric machines for automotive applications using efficiency maps*, Proc. 2003 Electrical Manufacturing and Coil Winding Expo, Indianapolis, IN, Sept. 2003, pp.1-7
- [3]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Stanowisko do badań silników reluktancyjnych przełączalnych z zastosowaniem procesora sygnałowego*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 69, 2004, str. 7-12
- [4]. Szumanowski A: *Fundamentals of hybrid vehicle driver*, Monographic book. ITE Warsaw-Radom, 2000

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl
 dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl
 dr inż. Adam Mazurkiewicz, madam@prz.edu.pl
 dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 0576/R/2/T02/2007/03