

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

BADANIA SILNIKÓW BLDC PRZEZNACZONYCH DO ZASTOSOWANIA W BEZZAŁOGOWYM APARACIE LATAJĄCYM

RESEARCH OF BLDC MOTORS DESIGNED FOR AIRCRAFT HYBRID DRIVE

Abstract: The paper presents a comparison of research results of a few BLDC motors used for unmanned aerial vehicles (with engine – electric motor drive). Static characteristics like dependence on electromagnetic torque and cogging torque vs rotor position were determined. Efficiency and winding losses vs rotary speed were defined. Performance parameters of researched motors used in parallel configured aircraft hybrid drive were estimated. Finally some conclusions concerning the research results were enclosed.

1. Wstęp

Do napędu śmigła w modelach aparatów latających stosuje się silniki spalinowe lub elektryczne. Wysoka wartość energetyczna paliwa lotniczego pozwala uzyskać długi czas lotu, mimo małej sprawności silników spalinowych. Natomiast zdalne sterowanie pracą silnika spalinowego sprawia pewne problemy. W przypadku napędów elektrycznych stosuje się zaawansowane technologicznie silniki prądu stałego z magnesami trwałymi i komutacją elektroniczną (BLDCM - ang. Brushless Direct Current Motor). Charakteryzują się one wysoką sprawnością przetwarzania energii oraz wysokim współczynnikiem gęstości energii przypadającym na jednostkę objętości [1,4]. W ostatnich latach rozpoczęto badania nad możliwością zastosowania, szczególnie w bezzałogowych modelach latających, tzw. napędów hybrydowych (spalinowo – elektrycznych) [2,3,5]. Nowoczesny napęd hybrydowy jest próbą połączenia zalet silników spalinowych i elektrycznych. Zależnie od wzajemnego układu, w jakim pracują silniki, spalinowy i elektryczny, lotniczy napęd hybrydowy można podzielić na [6]:

- szeregowy,
- równoległy,
- mieszany.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie uzyskanych przez autorów wyników badań w zakresie możliwości zastosowania silnika elektrycznego w lotniczym napędzie hybrydowym pracującym w układzie równoległym.

W warunkach laboratoryjnych przebadano trzy silniki BLDC dedykowane do zastosowań

modelarskich. Na podstawie wyników badań określono przydatność silników modelarskich do zastosowania w napędzie hybrydowym równoległym, bezzałogowego aparatu latającego.

2. Napęd hybrydowy równoległy bezzałogowego aparatu latającego

W niniejszej pracy jest rozpatrywany napęd hybrydowy równoległy. W tym przypadku są możliwe dwa warianty:

- napęd ze wspólnym wałem,
- napęd z zastosowaniem przekładni planetarnej.

W założeniach projektowych dobiera się moc silnika spalinowego jedynie do potrzeb lotu modelu na określonym pułapie z ustaloną prędkością. W tych warunkach silnik spalinowy powinien pracować z maksymalną sprawnością. Konsekwencją takiego założenia jest to, że do czasu osiągnięcia przez model pułapu przelotowego silnik elektryczny musi dostarczać brakującej mocy, więc powinien być tak dobrany, aby uzupełniał brakującą moc przy możliwie jak najmniejszej masie oraz dużej sprawności przetwarzania energii elektrycznej. Pojemność akumulatorów dobiera się dla pokrycia zapotrzebowania na energię w fazie wznoszenia modelu. Po osiągnięciu przez model pułapu przelotowego silnik elektryczny zostaje wyłączony. Nie powinien on też w tej fazie lotu wytwarzać dodatkowego momentu obciążającego silnik spalinowy. W przypadku rozwiązania ze wspólnym wałem, które jest od strony konstrukcyjnej najprostsze, od silnika elektrycznego wymaga się, aby po jego wyłączeniu straty mechaniczne były minimalne (związane jedynie z tarciami w łożyskach). Dodatkowo, rozwiązanie ze wspólnym wałem

narzuca jednakową prędkość obrotową dla obu silników, ściśle związaną z charakterystyką śmigła. Wersja z przekładnią planetarną jest pod tym względem nieco mniej wymagająca. Jej zaletą jest możliwość zróżnicowania prędkości obrotowych obu silników, wprowadza jednak dodatkowy element, w którym występują straty mechaniczne oraz zwiększa ciężar wypadkowy całego modelu.

3. Wyniki badań laboratoryjnych

• Obiekty badań

Obiektami badań laboratoryjnych są trzy silniki BLDC dedykowane do zastosowań modelarskich. Na rysunku 1 przedstawiono wygląd jednego z silników.



Rys.1. Widok badanego silnika BLDC

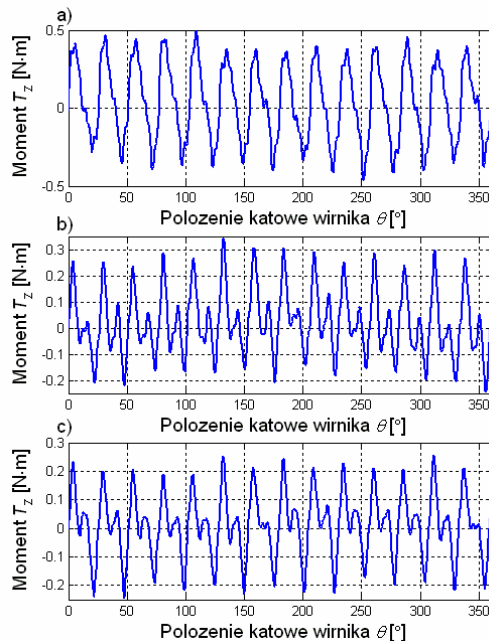
Wybrane parametry badanych silników BLDC zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane parametry badanych silników BLDC

Silnik	1	2	3
Napięcie zasilające [V]	24-42	24-42	24-42
Liczba pasm	3	3	3
Liczba biegunów stojana	12	12	12
Liczba biegunów wirnika	14	14	14
Stała k_v [rpm/V]	120	171	235
Maksymalna sprawność η [%]	94	94	93
Maksymalna wartość prądu źródła I_{dc} [A]	65/20s	75/20s	110/20s
Rezystancja pasma R_{ph} [Ω]	0,068	0,042	0,027
Liczba zwojów na biegun	20	18	14
Średnica zewnętrzna wirnika [mm]	53	53	53
Długość pakietu stojana [mm]	60	45	45
Waga [kg]	1,3	0,895	0,895

• Charakterystyki statyczne

Na stanowisku do badania maszyn elektrycznych z komutacją elektroniczną wyznaczono charakterystyki statyczne badanych silników. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi momentu zaczepowego T_z w funkcji kąta położenia wirnika θ dla trzech badanych silników.



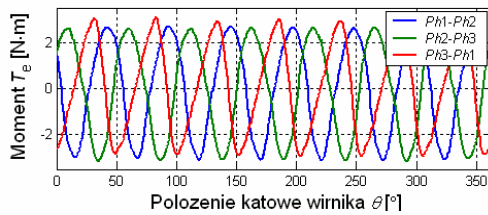
Rys.2. Moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu wirnika silnika: a) 1, b) 2 i c) 3

Badane silniki charakteryzują się stosunkowo dużymi wartościami maksymalnymi momentu zaczepowego T_{zmax} (tabela 2).

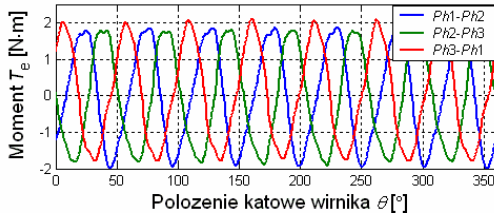
Tabela 2. Wartości maksymalne momentu zaczepowego badanych silników

Silnik	1	2	3
T_{zmax} [N·m]	0,49	0,34	0,25

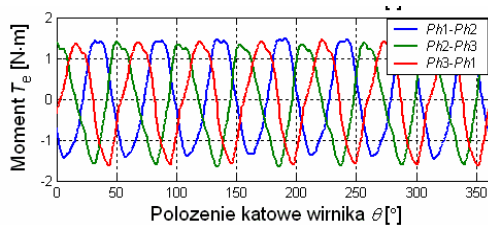
Przebieg momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji zmiany kąta położenia wirnika θ wyznaczono przy zasilaniu dwóch pasm prądem stałym. Przebiegi wyznaczano dla trzech możliwych konfiguracji zasilania pasm każdego badanego silnika ($Ph1-Ph2$, $Ph2-Ph3$ i $Ph3-Ph1$). Na rysunkach 3÷5 przedstawiono przebiegi momentu badanych silników w zakresie pełnego obrotu wirnika dla wszystkich trzech kombinacji zasilania, przy wymuszeniu prądu $I=32$ A.



Rys.3. Moment silnika 1 w funkcji kąta obrotu dla prądu $I=32A$



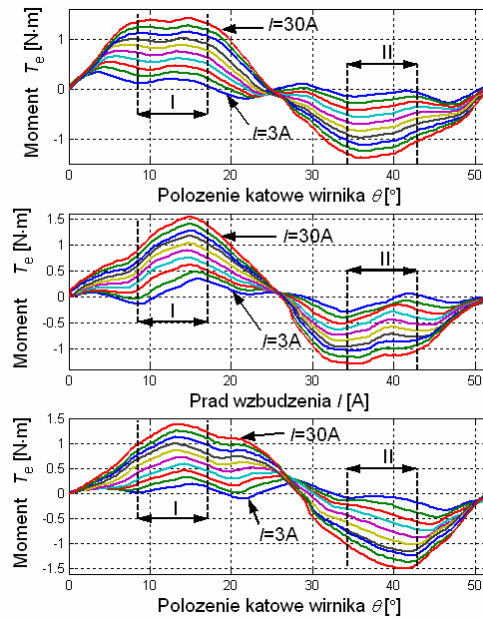
Rys.4. Moment silnika 2 w funkcji kąta obrotu dla prądu $I=32A$



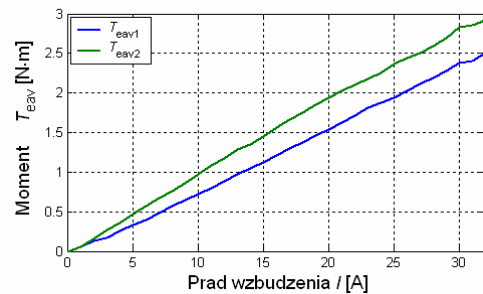
Rys.5. Moment silnika 3 w funkcji kąta obrotu dla prądu $I=32A$

Porównując rysunki 3÷5 można zauważyć, że przebiegi momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta obrotu wirnika θ , we wszystkich badanych silnikach wykazują znaczne dysproporcje. Są to różnice zarówno co do kształtu jak i wartości maksymalnych. Zauważalne dysproporcje występują nawet dla poszczególnych kombinacji zasilania pasm.

Na rysunku 6 przedstawiono wybrane charakterystyki momentowo - prądowo - kątowe silnika 3 dla trzech możliwych wariantów zasilania pasm. Wartość prądu pasma dla kolejnych charakterystyk (rys. 6) zmienia się co 3A. W przebiegach wszystkich wyznaczonych charakterystyk momentu T_e widać wyraźny wpływ momentu zaczepowego. Powoduje on deformacje kształtu charakterystyk szczególnie znaczące przy małych wartościach prądu. Na rysunku 7 przedstawiono zależności wartości średniej momentu T_{eav} w funkcji prądu I przy zasilaniu pasm Ph1-Ph2 dla przedziałów I i II zaznaczonych jak na rysunku 6.



Rys.6. Charakterystyki momentowo-prądowo-kątowe silnika 3 przy zasilaniu pasm a) Ph1-Ph2, b) Ph2-Ph3 oraz c) Ph3-Ph1



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

Przebieg T_{eav} jest praktycznie liniowy, co jest typowe dla tego rodzaju maszyn. Jak widać na rysunku 7 wartości średnie momentu elektromagnetycznego obu przedziałów położenia katowego wirnika (I - T_{eav1} i II - T_{eav2}) znacznie się różnią. Przy prądzie $I=32A$ ta różnica wynosi około 0,4Nm. W tabeli 3 zamieszczono wartości stałych momentowych $k_{Tav}=T_{eav}/I$ wyznaczonych na podstawie pomiarów charakterystyk momentu badanych silników. Podane wartości stałych momentowych k_{Tav} są uśrednione dla każdego silnika.

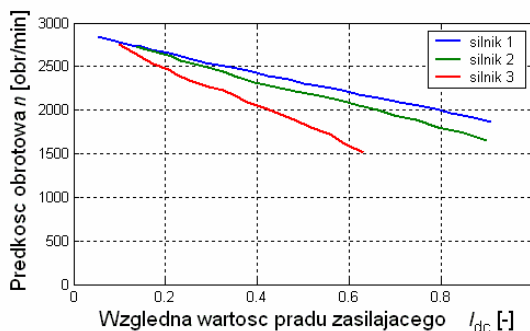
Tabela 3. Średnie wartości stałych momentowych k_{Tav} badanych silników BLDC

Silnik	1	2	3
k_{Tav} (Nm/A)	0,082	0,054	0,043

• Charakterystyki ruchowe

Charakterystyki ruchowe badanych silników wyznaczano na stanowisku, w skład którego wchodzi hamownica z programowalnym sterownikiem, oscyloskop cyfrowy z przetwornikami pomiarowymi oraz komputer do akwizycji danych. Silniki zasilano z baterii akumulatorów o napięciu 24V. W trakcie pomiarów rejestrowano wartość napięcia i prądu źródła zasilania. Rejestrowano również wartości skuteczne prądów pasm. Wartość momentu obciążenia T_L na wale i prędkość obrotową silnika odczytywano za pomocą specjalistycznego oprogramowania do akwizycji danych. Dokonywano również pomiaru temperatury uzwojeń badanego silnika. Pomiary wykonywano w trybie pracy hamownicy ze stałym momentem.

Na rysunku 9 przedstawiono charakterystykę prędkości obrotowej n w funkcji wartości względnej prądu zasilającego I_{dc} (odniesionego do wartości maksymalnej, podanej dla poszczególnych silników w tabeli 1).

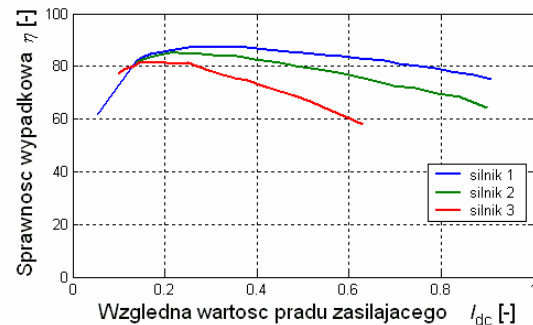


Rys.9. Charakterystyka prędkości obrotowej n w funkcji wartości względnej prądu zasilającego I_{dc}

W danych warunkach pomiarowych uzyskano następujące wartości maksymalne momentu obciążenia T_L : 5,5, 4,95, 4,75 N·m odpowiednio dla silników 1, 2 i 3. Charakterystyka mechaniczna silnika 3 okazała się najmniej sztywna dla zadanych warunków zasilania oraz parametrów sterowania.

Sprawność wypadkową η układu w funkcji względnej wartości prądu zasilającego I_{dc} .

pokazano na rysunku 10. Największą sprawność w zadanych warunkach pomiarowych uzyskano dla silnika 1.



Rys.10. Charakterystyka sprawności wypadkowej η w funkcji wartości względnej prądu zasilającego I_{dc}

W zadanych warunkach pracy silników uzyskano sprawności maksymalne η_{max} równe: 87,5%, 85,1% i 81,4%] odpowiednio dla silników 1, 2 oraz 3. Najszerszy zakres optymalnej pracy w zadanych warunkach ma silnik 1.

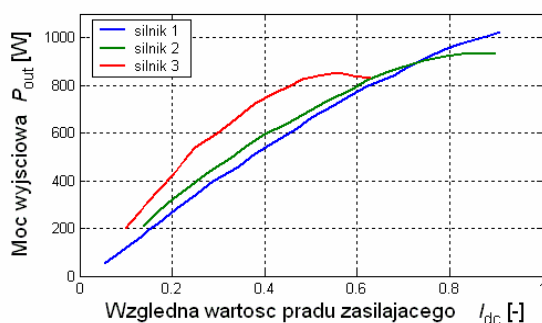
Na rysunku 11 przedstawiono charakterystykę strat w uzwojeniach ΔP_{cu} w funkcji wartości prądu zasilającego I_{dc} .



Rys.11. Charakterystyka strat w uzwojeniach ΔP_{cu} w funkcji wartości prądu zasilającego I_{dc}

W trakcie pomiarów obserwowano znaczny wzrost temperatury uzwojeń badanych silników. Największy przyrost temperatury zarejestrowano dla silnika 3. W tym przypadku straty w uzwojeniach są też największe, a temperatura ma znaczący wpływ na zmniejszanie się sprawności wypadkowej dla większych wartości momentu obciążenia T_L . Wzrost strat w uzwojeniach i pogarszanie się parametrów magnesów trwałych wpływają na zauważalny spadek sprawności maszyn w zakresie dużych wartości momentu obciążenia.

Największą wartość mocy wyjściowej uzyskuje silnik 1 (rys.12). W przypadku silników 2 i 3 można zauważyć, że zależność mocy wyjściowej w funkcji prądu źródła zasilającego nie jest liniowa. Szczególnie dotyczy to silnika 3. Główną przyczyną tego stanu jest znaczny wzrost temperatury uzwojeń w trakcie pomiarów.

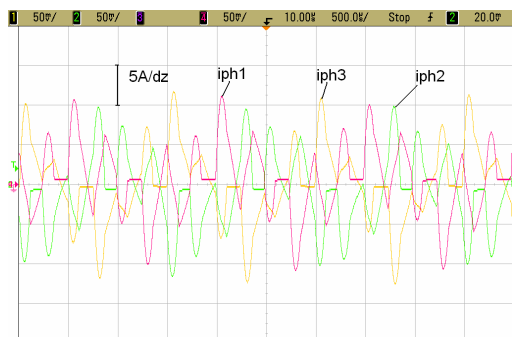


Rys.12. Charakterystyka mocy wyjściowej P_{out} w funkcji względnej wartości prądu zasilającego I_{dc}

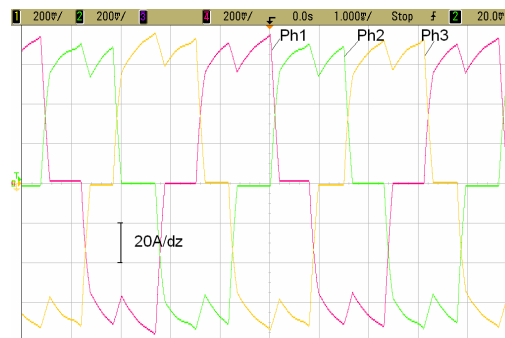
W przypadku silnika 3 nie uzyskano wartości maksymalnej prądu źródła zasilającego z uwagi na osiągnięcie dopuszczalnej temperatury pracy równej 100°C . Uniemożliwiło to dalsze pomiary. Zastosowane chłodzenie wymuszone badanych silników okazało się niewystarczające w warunkach laboratoryjnych. Zapewnienie lepszego chłodzenia poprawiłoby osiągi silników w zakresie większych wartości momentu obciążenia.

• Wybrane przebiegi czasowe prądów

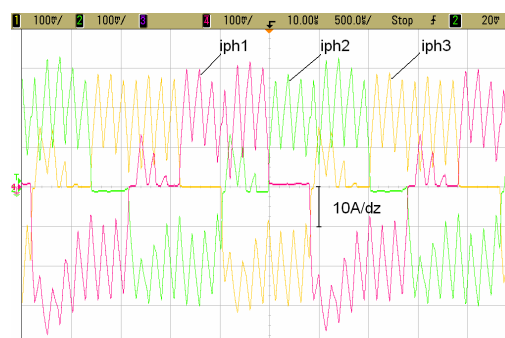
Na rysunku 13÷16 przedstawiono przebiegi czasowe prądów pasm silników 1 i 3 pracujących przy różnych wartościach momentu obciążenia.



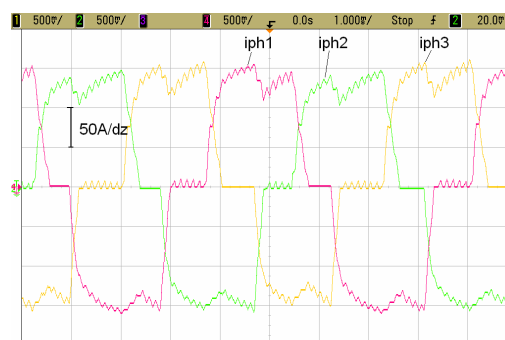
Rys.13. Przebiegi czasowe prądów pasm silnika 1 pracującego bez obciążenia



Rys.14. Przebiegi czasowe prądów pasm silnika 1 w stanie obciążenia



Rys.15. Przebiegi czasowe prądów pasm silnika 3 przy małym momencie obciążenia



Rys.16. Przebiegi czasowe prądów pasm silnika 3 przy dużym momencie obciążenia

Jak można zauważyć na rysunku 13 w przypadku pracy bez obciążenia występują duże dysproporcje pomiędzy poszczególnymi przebiegami czasowymi prądów pasm. Wraz ze wzrostem wartości momentu obciążenia różnice pomiędzy poszczególnymi przebiegami zmniejszają się. Nie mniej jednak badane silniki charakteryzuje niesymetria magnetyczna, której efekty są widoczne na rysunkach 15 ÷ 16 (przy pracy z dużą wartością momentu obciążenia). Przedstawione przebiegi czasowe potwierdzają wcześniejsze wyniki badań charakterystyk statycznych, które sugerowały istnienie znacznej niesymetrii magnetycznej.

4. Ocena możliwości zastosowania badanych silników w aparacie latającym

Badane konstrukcje silników BLDC charakteryzują się ogólnie wysoką sprawnością wypadkową. W pomiarach zastosowano napięcie zasilające równe 24 V. Dla uzyskania zbliżonych warunków pracy narzuconych przez silnik 1, poprzez sterownik zmniejszono wartość napięcia podawanego na dwa pozostałe silniki. To spowodowało, że charakterystyki mechaniczne dla silników 2 i 3 są zdecydowanie mniej sztywne.

Duża wartość sprawności badanych silników jest możliwa dzięki zastosowaniu odpowiednio dobranej materiału magnetycznego obwodu stojana oraz magnesów wykonanych z pierwiastków ziem rzadkich. Wysoka sprawność to niewątpliwie najkorzystniejsza właściwość badanych silników. Można założyć, że w przypadku zasilania wyższym napięciem wszystkie silniki będą pracowały ze sprawnością nie mniejszą niż 85 % w szerokim zakresie zmiany momentu obciążenia.

Największym mankamentem badanych silników okazała się duża wartość maksymalna momentu zaczepowego T_{zmax} . Jest to szczególnie niekorzystne w przypadku napędu hybrydowego ze wspólnym wałem, gdzie wymaga się minimalnych oporów mechanicznych po wyłączeniu silnika elektrycznego. W zasadzie eliminuje to możliwość zastosowania badanych silników BLDC w układzie ze wspólnym wałem.

Nieco mniejszym problemem jest niesymetria magnetyczna, która powoduje znaczne dysproporcje pomiędzy charakterystykami momentu dla poszczególnych sekwencji zasilania pasm. Niesymetria magnetyczna jest źródłem dodatkowych tętnień momentu elektromagnetycznego. Również w tym przypadku jest to mniej korzystne dla rozwiązania ze wspólnym wałem.

Badane konstrukcje silników BLDC mogą zostać wykorzystane tylko w przypadku napędu hybrydowego równoległego z przekładnią planetarną. W tej konfiguracji napędu wymienione wyżej mankamenty badanych silników z magnesami trwałymi nie są już dużym problemem.

5. Podsumowanie

Artykuł jest efektem prowadzonych badań laboratoryjnych silników BLDC

przeznaczonych do napędów hybrydowych, bezzałogowych aparatów latających o konfiguracji równoległej. Badane silniki posiadają wysoką sprawność, małe wymiary, co jest ich największą zaletą. Jednocześnie wszystkie silniki posiadają dużą wartość momentu zaczepowego oraz znaczną niesymetrię magnetyczną. Duża wartość momentu zaczepowego stanowi przeciwwskazanie do zastosowania tych silników w napędzie hybrydowym równoległym o konfiguracji ze wspólnym wałem. Dla ograniczenia dużej wartości momentu zaczepowego wskazane jest zaprojektowanie nowej konstrukcji silnika BLDC, która będzie posiadała wysoką sprawność przy praktycznie zerowej wartości momentu zaczepowego oraz pomijalnej niesymetrii magnetycznej. Będzie to tematem dalszych prac badawczych.

Literatura

- [1]. Gieras J.F., Wing M.: *Permanent magnet motor technology. Design and application*, Inc.; New York, 2002.
- [2]. Glasscock R. R., Hung J. Y. Gonzalez L.F. and Walker Rodney A: *Multimodal hybrid Powerplant for Unmanned Aerial Systems (UAS) Robotics*, Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, March 30th to April 1st 2009, Bristol United Kingdom.
- [3]. Harmon F. G., Frank A. A. and Chattot J.J. : *Conceptual Design and Simulation of a Small Hybrid-Electric Unmanned Aerial Vehicle*, Journal of Aircraft, vol. 43, pp. 1490-1498, 2006.
- [4]. Krishnan R.: *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010, NY.
- [5]. 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.
- [6]. 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 R10 0026 06

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn