

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

WYBRANE WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH BEZSZCZOTKOWEGO SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

CHOSEN LABORATORY TEST RESULTS OF BRUSHLESS PERMANENT MAGNET MOTOR

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań laboratoryjnych bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi przeznaczonego do napędu hybrydowego samolotu bezzałogowego. Maszyna bezszczotkowa z magnesami trwałymi zaprojektowana została pod kątem pełnienia funkcji rozrusznika, silnika oraz generatora. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono przykładowe charakterystyki statyczne oraz napięcia indukowane w badanej maszynie. Wyznaczono parametry ruchowe silnika w pełnym zakresie zmiany momentu obciążenia. Zarejestrowano przykładowe przebiegi czasowe prądów i napięć. Zamieszczono wnioski wynikające z badań prototypu silnika.

Abstract: In the paper, chosen laboratory test results of brushless motor with permanent magnets for hybrid unmanned aerial vehicle were presented. The brushless motor with permanent magnets was designed to operate as engine starter, motor and generator. Static characteristics and induced voltages in the machine were determined in the laboratory conditions. Dynamic parameters of the motor in the whole range of torque change were determined. Waveforms of currents and voltages were registered. Finally, conclusions were drawn.

Słowa kluczowe: *bezszytkowy silnik z magnesami trwałymi, stała momentowa, stała napięciowa, sprawność ogólna*

Keywords: *brushless motor with permanent magnet, torque constant, voltage constant, overall efficiency*

1. Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć dynamiczny rozwój napędów elektrycznych i hybrydowych pojazdów samochodowych. Szczególny postęp odnotowano w zakresie pojazdów z napędami hybrydowymi. Większość znaczących producentów samochodów ma w swojej ofercie auta z napędem hybrydowym. Niewątpliwie liderem jest jedna z firm japońskich, która oferuje całą gamę modeli z napędem hybrydowym [1]. Jest to jednocześnie firma, która jako pierwsza wyprodukowała na rynek auto z napędem hybrydowym. Wzrost popularności napędu hybrydowego w motoryzacji wywołał równocześnie zainteresowanie w innych rodzajach napędzanych obiektów. Zaliczyć do nich można np. lotnictwo. W chwili obecnej zainteresowanie napędami hybrydowymi dotyczy raczej małych obiektów latających ze szczególnym uwzględnieniem samolotów bezzałogowych lub innych obiektów latających [2-8]. Takim obiektom latającym w zależności od przeznaczenia stawiane są różne wymagania. Niemniej jednak niezależnie od przeznaczenia, w każdym przypadku wskazane jest, aby napęd hybrydowy spełniał nie tylko odpowiednie wymagania zwią-

zane z wykonywanym zadaniem, ale również był możliwie jak najbardziej efektywny. Jedną z maszyn elektrycznych, którą z powodzeniem można zastosować w napędzie hybrydowym jest bez wątpienia bezszczotkowa maszyna z magnesami trwałymi. Za jej wyborem przemawiają dotychczasowe wyniki prac badawczych [9-13]. Maszyna ta charakteryzuje się przynajmniej dwoma istotnymi parametrami tj. wysoką sprawnością przetwarzania energii oraz wysokim stosunkiem wytwarzanego momentu użytkowanego z jednostki objętości maszyny. Obydwa te parametry są szczególnie istotne w przypadku maszyny przeznaczonej do napędu hybrydowego bezzałogowego obiektu latającego. Duży stosunek wytwarzanego momentu z jednostki objętości pozwala uzyskać wymagane parametry maszyny przy możliwie jak najmniejszych gabarytach, co przekłada się na małą masę. Wysoka sprawność przetwarzania energii z kolei pozwala na wydłużenie czasu pracy silnika.

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań laboratoryjnych bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi przeznaczonego do

napędu hybrydowego bezzałogowego obiektu latającego. Zostały wyznaczone stałe momentowe oraz napięciowe badanego prototypu. Został wyznaczony moment zaczepowy wykonanego silnika. Na stanowisku do badań ruchowych zostały wyznaczone charakterystyki ruchowe badanego silnika oraz zarejestrowane przebiegi czasowe prądów oraz napięć. Zamieszczono wnioski dotyczące wykonanego prototypu silnika pod kątem jego przydatności do napędu hybrydowego.

2. Prototyp bezzszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi

Prototyp bezzszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi został wykonany i przystosowany do zamocowania w napędzie hybrydowym samolotu bezzałogowego. Na rysunku 1 pokazano widok zaprojektowanego i wykonanego silnika.



Rys. 1. Wykonany prototyp bezzszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi przystosowany do zamontowania w układzie hybrydowym samolotu bezzałogowego

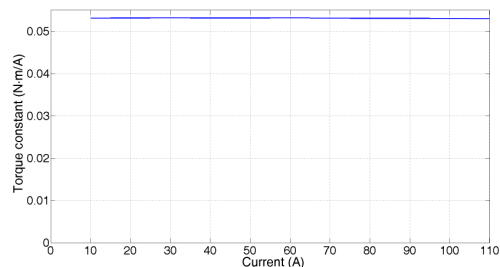
Przedstawiona na rysunku 1 konstrukcja projektowana była pod kątem pełnienia funkcji rozrusznika, silnika oraz generatora. Funkcja rozrusznika wymusiła wprowadzenie konieczności krótkotrwałej pracy w trybie regulacji prądowej. Przyjęto w założeniach projektowych, że silnik elektryczny powinien umożliwiać pracę cichą napędu hybrydowego (z wyłączonym silnikiem spalinowym). Jednocześnie ponowny rozruch silnika spalinowego powinien odbywać się w trakcie lotu. Zaprojektowana konstrukcja sprzęgła powinna umożliwiać rozruch silnika spalinowego przy prędkości silnika elektrycznego wynoszącej około 2000 obr/min. Wykonany wał silnika jest dostosowany do mechanicznego połączenia z ruchomą częścią sprzęgła rozłącznego. W prototypie przewidziano zamon-

owanie czujników położenia z uwagi na przewidzianą funkcję rozrusznika. W trakcie prac projektowych przyjęto ograniczenia i wymagania wynikające z konfiguracji układu napędowego. Silnik został zaprojektowany, tak aby wytwarzać moc równą 3500 W, przy napięciu zasilającym sterownik $U_{dc}=52$ V i prędkości obrotowej 8000 obr/min. Jenocześnie powinien wytwarzać moment na wale silnika w trybie pracy jako rozrusznik nie mniejszy niż 8 N·m przy jednoczesnym ograniczeniu wartości maksymalnej prądu źródła zasilającego do 200 A.

3. Wyznaczanie stałej momentowej i napięciowej maszyny

3.1. Wyznaczanie stałej momentowej

Stałą momentową silnika określono przy wyznaczaniu statycznych charakterystyk momentowych. Na stanowisku do wyznaczania charakterystyk statycznych zostały zasilone dwa wybrane pasma silnika umownie nazwane jako $Ph1$ i $Ph2$. Silnik skokowy poprzez przekładnię zwiększającą jego rozdzielczość, przemieszczał wirnik z prędkością pozwalającą pominąć efekty wynikające z jego ruchu. W tym czasie rejestrowano sygnał z przetwornika momentu umieszczonego pomiędzy badanym silnikiem, a przekładnią zwiększającą rozdzielczość. Wybrane pasma zasilano prądem stałym o regulowanej wartości. Z uwagi na ograniczenia wydajności prądowej źródła zasilania badania przeprowadzono do wartości prądu nie przekraczającego 110 A. Pomiary wykonano dla kilku wartości prądów zasilających z zakresu (10 A÷110 A). Na podstawie wyznaczonych charakterystyk statycznych wyznaczono stałe momentowe silnika dla każdej z wyznaczonych charakterystyk statycznych. Na rysunku 2 pokazano zależność wyznaczonej stałej momentowej k_T w funkcji prądu zasilającego I .



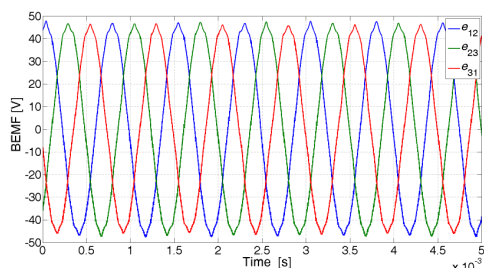
Rys. 2. Zależność stałej momentowej k_T w funkcji prądu I

Bardziej szczegółowa analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem

płynącego prądu stała momentowa silnika nieznacznie maleje. W przypadku badanego silnika wyznaczona stała momentowa k_T wynosi 0.053 N·m/A. Oznacza to, że przy maksymalnej wartości prądu zasilającego wynoszącego 200 A średni moment na wale silnika będzie wynosił 10.6 N·m. Na skutek działania regulatora prądu, powstające tętnienia wytwarzanego momentu elektromagnetycznego powodują nieznaczne zmniejszenie stałej momentowej. Przy rozruchu silnika wartość minimalna momentu będzie znacznie większa niż wymagane 8 N·m. Testy w zakresie rozruchu w układzie docelowym będą następnym etapem badań po zamontowaniu silnika w układzie hybrydowym.

3.2. Wyznaczanie stałej napięciowej

Innym ważnym parametrem silnika jest jego stała napięciowa. Określa ona punkt pracy silnika. Dla badanego prototypu, punkt pracy z mocą znamionową wynoszącą 3500 W określony był przy 8000 obr/min. Na rysunku 3 pokazano zarejestrowane przewodowe napięcia indukowane przy prędkości 8000 obr/min.



Rys. 3. Przebiegi czasowe przewodowych napięć indukowanych e przy prędkości 8000 obr/min

Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że w silniku występuje pewna niesymetria magnetyczna, która powoduje różnice, np. w wartościach indukowanych napięć. Kształty indukowanych napięć w poszczególnych pasmach są do siebie zbliżone, ale trudno je raczej uznać za przebiegi trapezoidalne. Wyznaczona stała napięciowa silnika wynosi $k_V=5.4$ V/1000 obr/min.

4. Wyznaczanie przebiegów czasowych oraz charakterystyk ruchowych

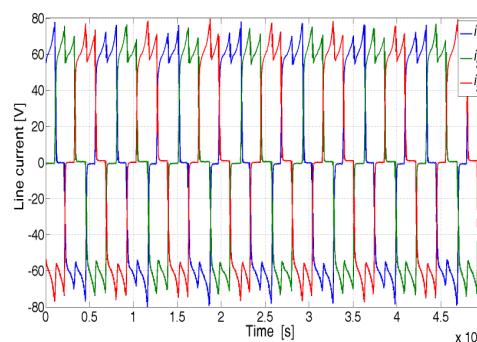
4.1. Stanowisko do badań

Do pomiarów przebiegów czasowych prądów i napięć oraz wyznaczania charakterystyk ruchowych zastosowano stanowisko wyposażone w hamownicę wiropadową o mocy 3 kW i momencie 3 N·m wraz z niezbędnym osprzę-

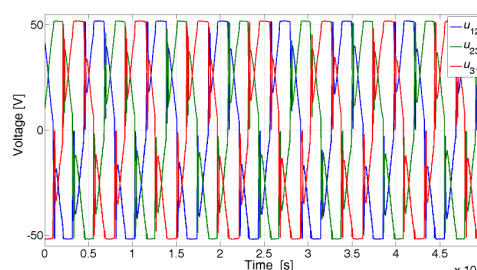
tem. W układzie zasilania zastosowano dwa zasilacze wysokoprądowe (30 V, 110 A) skonfigurowane do pracy szeregowej. W układzie do rejestracji parametrów elektrycznych i mechanicznych wykorzystywano sześciokanałowy analizator mocy wyposażony dodatkowo w moduł silnikowy. Moment obciążenia hamownicy zadawano z poziomu komputera PC, który służył jednocześnie do akwizycji danych pomiarowych.

4.2. Przebiegi czasowe prądów i napięć

Przykładowe przebiegi czasowe prądów i napięć przewodowych silnika pokazano na rysunkach 4-5. Przebiegi zarejestrowano przy prędkości 8600 obr/min i momencie obciążenia $T_L=3$ N·m.



Rys. 4. Przebiegi czasowe prądów przewodowych przy prędkości 8600 obr/min i momencie obciążenia $T_L=3$ N·m

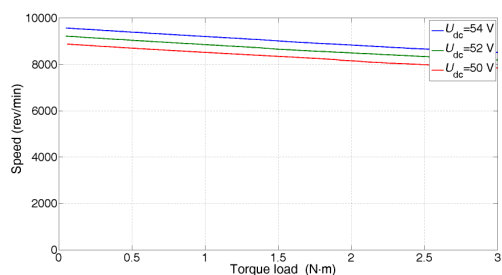


Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć przewodowych przy prędkości 8600 obr/min i momencie obciążenia $T_L=3$ N·m

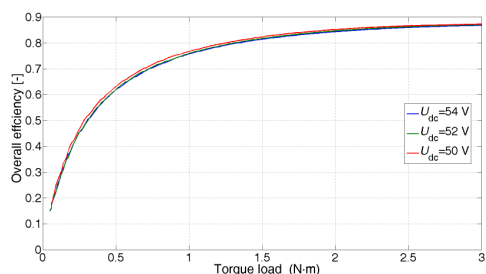
4.3. Wybrane charakterystyki ruchowe

Dla kilku napięć zasilających mieszczących się w dopuszczalnym zakresie zmian napięcia akumulatora wyznaczono charakterystyki ruchowe. Badany silnik obciążano do wartości znamionowej zastosowanej hamownicy wiropadowej, który wynosił 3 N·m. Na podstawie zarejestrowanych wyników zostały wykreślone charakterystyki mechaniczne oraz sprawności badanego układu napędowego. Na rysunku 6 pokazano zależność prędkości obrotowej n

w funkcji momentu obciążenia T_L dla trzech wartości napięć zasilających U_{dc} . Uzyskaną sprawność ogólną układu napędowego η wyznaczoną metodą bezpośrednią w funkcji momentu obciążenia, co pokazano na rys. 7.



Rys. 6. Zależność prędkości obrotowej w funkcji momentu obciążenia przy $U_{dc}=\text{var}$



Rys. 7. Zależność sprawności ogólnej w funkcji momentu obciążenia przy $U_{dc}=\text{var}$

Otrzymane charakterystyki mechaniczne są typowymi dla takiego silnika. W układzie docelowym po wyeliminowaniu dodatkowych połączeń pomiędzy zasilaniem a sterownikiem silnika powinna wzrosnąć sztywność charakterystyk badanego silnika. Po aproksymowaniu wyznaczonych charakterystyk silnik uzyskuje moment 4.3 N·m w wymaganym punkcie pracy, tj. dla prędkości obrotowej wynoszącej 8000 obr/min. Oznacza to, że wymaganą moc na wale silnik uzyska przy napięciu zasilającym nieznacznie mniejszym niż 52 V. Przy momencie obciążenia równym 3 N·m sprawność ogólna nieznacznie przekracza 87 % i wykazuje jeszcze niewielkie tendencje wzrostowe. Tym samym przewiduje się, że w docelowym punkcie pracy silnik będzie miał sprawność nie mniejszą niż 87 %. Należy jednak zauważyć, że warunki pracy silnika w trakcie badań znacznie odbiegały od rzeczywistych, jeżeli chodzi o chłodzenie. W warunkach laboratoryjnych silnik nie był chłodzony, natomiast w układzie hybrydowym po zamontowaniu na jego wale śmigła przewiduje się przepływ strugi powietrza omywającego silnik na poziomie kilkunastu m/s.

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań laboratoryjnych bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi. Zaprojektowana konstrukcja bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi do napędu hybrydowego została przebadana w zakresie pracy silnikowej. Istotny z punktu widzenia napędu hybrydowego jest minimalny moment rozruchowy z uwagi na przewidzianą funkcję rozrusznika dla silnika spalinowego. Przeprowadzone testy laboratoryjne wskazują, że silnik przez kilkanaście sekund będzie wytwarzał wymagany moment rozruchowy bez przekraczania maksymalnej dopuszczalnej wartości prądu źródła zasilającego. Amplituda momentu zaczepowego wynosi 2.3% wartości momentu znamionowego. Jest to wynik dobry, ale nie bardzo dobry. Jednak w trakcie projektowania silnika kryterium ograniczenia wartości maksymalnej momentu zaczepowego nie było najistotniejsze. W warunkach laboratoryjnych z uwagi na ograniczenia zastosowanego obciążenia silnik został przebadany tylko w zakresie obciążenia wynoszącego około 72 % wymaganego momentu na wale. Badania przeprowadzono dla kilku wartości napięcia zasilającego. Odpowiada to przewidywanym zmianom napięcia w układzie zasilania bateryjnego. W warunkach laboratoryjnych uzyskano sprawność ogólną układu napędowego na poziomie 87 %. Jest to wynik dobry, jeżeli uwzględni się rodzaj zastosowanej konstrukcji oraz wymagany punkt pracy. Możliwa jest zdaniem autorów jeszcze niewielka poprawa sprawności bez wprowadzania zmian konstrukcyjnych czy też materiałowych poprzez bardziej staranne wykonanie uzwojenia badanego prototypu.

6. Literatura

- [1]. www.toyota.com.
- [2]. Glasscock R. R., Hung J. Y., Gonzalez L.F., Walker R.A: "Multimodal hybrid Powerplant for Unmanned Aerial Systems (UAS) Robotics", Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, Bristol, United Kingdom, 2009.
- [3]. Harmon F.G., Frank A.A., Chattot J.J.: "Conceptual Design and Simulation of a Small Hybrid-Electric Unmanned Aerial Vehicle", Journal of Aircraft, vol. 43, 2006, pp. 1490-1498.
- [4]. Spinka O., Holub O., Hanzalek Z.: "Low-Cost Reconfigurable Control System for Small UAVs", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, Issue:3, 2011, pp. 880-889.

- [5]. Barczyk M., Lynch A. F.: "Invariant Observer Design for a Helicopter UAV Aided Inertial Navigation System", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, Issue:3, 2013, pp. 791-806.
- [6]. Telford R., Galloway S.: "Fault classification and diagnostic system for unmanned aerial vehicle electrical networks based on hidden Markov models", IET Electrical Systems in Transportation, Vol.: 5, Issue: 3, 2015, pp. 103-111.
- [7]. Islam S., Liu P. X., El Saddik A.: "Robust Control of Four-Rotor Unmanned Aerial Vehicle With Disturbance Uncertainty", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, Issue:3, 2015, pp. 1563-1571.
- [8]. Dong X., Yu B. Shi Z., Zhong Y.: "Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 23, Issue:3, pp.340-348, 2015.
- [9]. Glinka T., Jakubiec M.: "Silniki elektryczne z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 71, 2005, str. 103 -111.
- [10]. Glinka T., Król E., Białas A., Wolnik T.: "Silniki tarczowe z magnesami trwałymi", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 87, 2010, str. 63-68.
- [11]. Melfi M.J., Evon S., McElveen R.: "Induction versus permanent magnet motors", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 15, Issue:6, pp.28-35, 2009.
- [12]. Pfister P. D., Perriard Y.: "Very-High-Speed Slotless Permanent-Magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design, and Torque Measurement Methods", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, Issue:1, 2010, pp. 296-303.
- [13]. Antonello R., Carraro M., Zigliotto M.: "Maximum-Torque-Per-Ampere Operation of Anisotropic Synchronous Permanent-Magnet Motors Based on Extremum Seeking Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, Issue:9, 2014, pp.5086-5093.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz

pbogu@prz.edu.pl

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

dr hab. inż. Mariusz Korkosz

mkosz@prz.edu.pl

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

dr hab. inż. Jan Prokop

jprokop@prz.edu.pl

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

dr inż. Piotr Wygonik

piowyg@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

ul. Al. Powstańców Warszawy 12

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.