

*bezzałogowy aparat latający, napęd hybrydowy,
maszyna prądu stałego z magnesami trwałymi,
BLDC, praca silnikowa*

Piotr BOGUSZ*, Mariusz KORKOSZ*,
Jan PROKOP*, Piotr WYGONIK*

BADANIA SILNIKA BLDC PRZEZNACZONEGO DO HYBRYDOWEGO NAPĘDU BEZZAŁOGOWEGO APARATU LATAJĄCEGO

W pracy zawarto wyniki badań laboratoryjnych zaprojektowanego i wykonanego przez autorów silnika BLDC przeznaczonego do hybrydowego napędu równoległego dla bezzałogowego aparatu latającego. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono charakterystyki mechaniczne badanego silnika oraz jego sprawności przy różnych wartościach napięć zasilających wynikających z założeń projektowych. Wyznaczono również charakterystyki regulacyjne silnika

1. WSTĘP

Napędy hybrydowe stanowią formę łączącą klasyczny napęd spalinowy z napędem elektrycznym [1]–[2]. Stosowanie napędów hybrydowych w motoryzacji jest już faktem czego przykładem są seryjnie produkowane samochody (np. Toyota Prius). Inną dziedziną, w której podejmowane są próby zastosowania tego typu napędu są bezzałogowe aparaty latające (BAL) [3]. Autorzy w ramach prowadzonych prac badawczych zaprojektowali układ napędu hybrydowego w konfiguracji równoległej. Napęd ten jest przeznaczony do bezzałogowego aparatu latającego. Podstawową częścią napędu oprócz silnika spalinowego jest silnik elektryczny, który został zaprojektowany i wykonany. Jest to silnik BLDC charakteryzujący się małymi wymiarami i odpowiednio dobrymi parametrami eksploatacyjnymi. Wyniki badań symulacyjnych dla tego silnika zamieszczono w pracach [4]–[5].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań laboratoryjnych zaprojektowanego przez autorów silnika BLDC przeznaczonego do równoległego hybry-

* Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów.

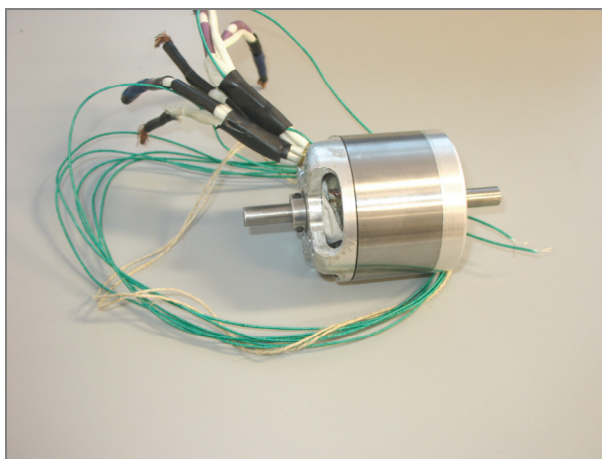
dowego napędu dla bezzałogowego aparatu latającego. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono charakterystyki mechaniczne badanego silnika oraz jego sprawności przy różnych wartościach napięć zasilających wynikających z założeń projektowych. Wyznaczono również charakterystyki regulacyjne silnika.

2. WYMAGANIA RÓWNOLEGŁEGO HYBRYDOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Równoległemu hybrydowemu układowi napędowemu zostały postawione następujące wymagania:

- Prędkość robocza układu napędowego 8000–9000 obr/min .
- Napięcie zasilające silnik elektryczny $U_{dc} = (24 \div 29,6)$ V.
- Sumaryczna moc obu silników nie mniejsza niż 1600 W dla uzyskania wymaganej siły ciągu na wale śmigła.
- Moc silnika elektrycznego nie mniejsza niż 800W przy prędkości 8000 obr/min.
- Sprawność wypadkowa napędu elektrycznego nie mniejsza niż 85%.
- Całkowita waga części elektrycznej nie większa niż 1,8 kg.
- Całkowita waga napędu hybrydowego nie powinna przekraczać 5 kg.

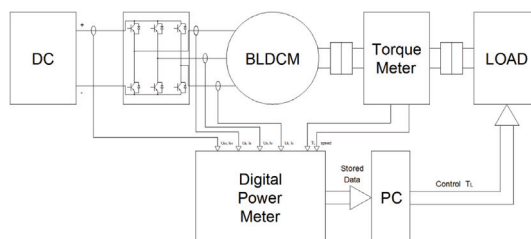
Na bazie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych sporządzono projekt wykonawczy silnika [5]. Na rysunku 1 przedstawiono wykonany prototyp silnika BLDC. W celu uzyskania możliwości kontroli temperatury podczas pracy silnika zamontowano dwie termopary typu K. Jedna z nich kontroluje temperaturę czoła wybranego uzwojenia, druga temperaturę rdzenia stojana.



Rys. 1. Widok zaprojektowanego silnika BLDC
Fig. 1. View of designed BLDC motor

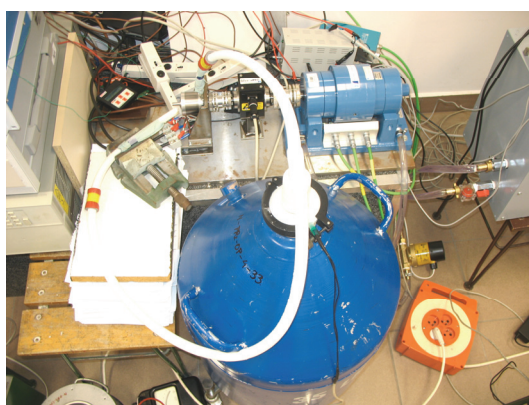
3. STANOWISKO DO BADAŃ LABORATORYJNYCH ZAPROJEKTOWANEGO SILNIKA

Do przeprowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe umożliwiające wyznaczenie charakterystyk mechanicznych i regulacyjnych. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego do badania prototypu silnika
Fig. 2. Block diagram of measurement system

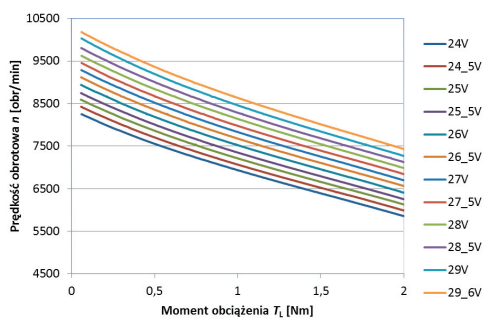
W skład stanowiska pomiarowego, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 2 wchodziła następująca aparatura badawcza: zasilacz stabilizowany o napięciu 60 V i prądzie 110 A (Agilent 6692A), przetworniki momentu (Magtrol TMHS 5 Nm), hamownica wiroprądowa (Magtrol WB43 3 Nm, 3 kW), analizator mocy (Yokogawa WT1600), oprogramowanie LabView z komputerem do akwizycji danych i sterowania wartością momentu obciążenia T_L . Widok rzeczywistego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3. W układzie pomiarowym do chłodzenia badanego silnika zastosowano nawiew ciekłym azotem.



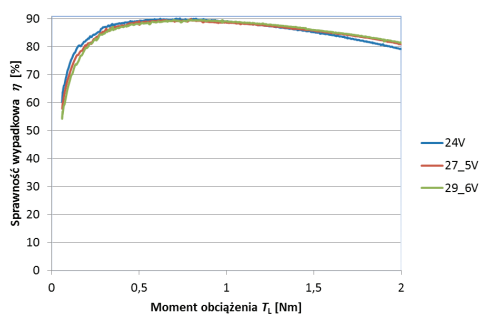
Rys. 3. Widok stanowiska pomiarowego
Fig. 3. View of laboratory station

4. WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH

Charakterystyki mechaniczne badanego prototypu silnika wyznaczano przy zasilaniu silnika ze stabilizowanego wysokoprądowego źródła napięcia stałego. Napięcie zasilające zmieniano od wartości 24 V do 29,6 V ze skokiem co 0,5 V. Dla każdej wartości napięcia zasilającego wyznaczano charakterystykę mechaniczną zmieniając moment obciążenia T_L od 0 do 2 Nm. Na rysunku 4 przedstawiono rodzinę wyznaczonych charakterystyk mechanicznych. Zależność sprawności wypadkowej prototypu silnika w funkcji momentu obciążenia T_L dla wybranych wartości napięć zasilających (24 V, 27,5 V i 29,6 V) przedstawiono na rysunku 5.



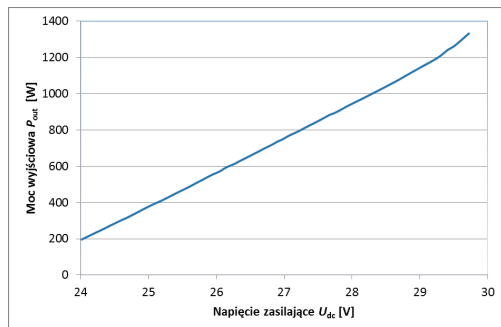
Rys. 4. Prędkość obrotowa n w funkcji momentu obciążenia T_L
Fig. 4. Rotor speed vs. load torque T_L



Rys. 5. Sprawność η w funkcji momentu obciążenia T_L dla różnych napięć zasilających
Fig.5. Efficiency η vs. load torque T_L for various supply voltage U_{dc}

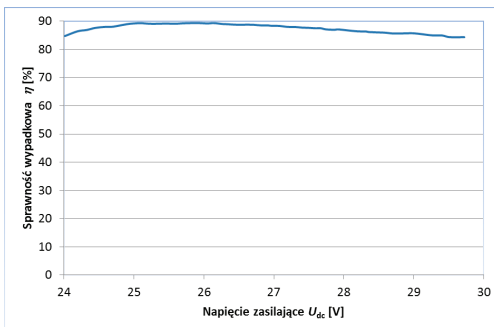
5. WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYKI REGULACYJNEJ

W rzeczywistym układzie napędowym następuje zmiana wartości napięcia zasilającego U_{dc} z uwagi na postępujący proces rozładowania baterii akumulatorów. Dlatego należało określić wpływ zmian napięcia zasilającego na osiągi badanego silnika. W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania wpływu napięcia zasilającego U_{dc} na osiągi silnika przy założeniu pracy z prędkością $n = 8000$ obr./min. Przy zmianie wartości napięcia zasilającego zmieniano wartość momentu obciążenia tak, aby uzyskać prędkość roboczą równą 8000 obr./min (± 3 obr./min). Na rysunku 6 przedstawiono zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji napięcia zasilającego U_{dc} . Funkcje sprawności wypadkowej układu napędowego w funkcji napięcia zasilającego U_{dc} przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Moc wyjściowa P_{out} badanego silnika w funkcji napięcia zasilającego U_{dc}

Fig. 6. Output power P_{out} vs. supply voltage U_{dc}



Rys. 7. Sprawność η badanego silnika w funkcji napięcia zasilającego U_{dc}

Fig. 7. Efficiency η vs. supply voltage U_{dc}

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych prototypu silnika BLDC przeznaczonego do równoległego hybrydowego układu napędowego można przedstawić następujące wnioski:

- Silnik spełnił postawione wymagania projektowe odnośnie wymaganego punktu pracy.
- Sprawność wypadkowa napędu przekracza wymagane 85%.
- Przy napięciu zasilającym mniejszym niż 27,3 V silnik nie wytwarza już wymaganej mocy na wale. Jednak po uwzględnieniu charakterystyki rozładowania zastosowanych ogniw Li-Po minimalna wartość napięcia zasilającego wynosi nie jak wcześniej założono 24 V a 27,2 V. Tym samym silnik spełnił wymaganie co do wytarzania wymaganej mocy przy minimalnej wartości napięcia zasilającego.
- Przy w pełni naładowanych akumulatorach silnik jest w stanie wytworzyć moc około 1300 W bez przekraczania dopuszczalnej wartości prądu źródła zasilającego.
- Waga wykonanego prototypu silnika nie przekracza 0,55 kg, a całkowita waga części elektrycznej jest mniejsza niż dopuszczalne 1,8 kg.

Zatem zaprojektowany i wykonany silnik spełnił wszystkie postawione wymogi równoległego hybrydowego układu napędowego.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NRI0 0026 06/2009.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 „Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

LITERATURA

- [1] HODKINSON R., FENTON J., *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*, Reed Educational and Professional Publishing, Ltd., 2001.
- [2] HUSAIN I., *Electric and hybrid vehicles Design Fundamentals*, CRC PRESS LLC, 2003.
- [3] GLASSOCK R., HUNG J.Y., GONZALEZ L.F., WALKER R.A., *Multimodal hybrid powerplant for unmanned aerial systems (UAS) Robotics*, In: Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, March 30th–April 1st, 2009, Bristol, United Kingdom.
- [4] BOGUSZ P., KORKOSZ M., MAZURKIEWICZ A., PROKOP J., *Badania symulacyjne silnika bldc przeznaczonego do napędu hybrydowego bezzalogowego aparatu latającego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 93/2011, 13–18.
- [5] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J., *A study of design process of BLDC motor for aircraft hybrid drive*, Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, Gdańsk 2011, 508–513.

BLDC MOTOR RESEARCH USED FOR
UNMANNED AERIAL VEHICLE HYBRID DRIVE

The research results of designed BLDC motor for parallel drive of a hybrid unmanned aerial vehicle have been presented in the paper. Mechanical characteristics of examined motor and its efficiency at various supply voltage resulting from design assumptions have been determined. Regulation characteristics of motor have been also determined.