

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

BADANIA SYMULACYJNE SILNIKA BLDC PRZEZNACZONEGO DO NAPĘDU HYBRYDOWEGO BEZZAŁOGOWEGO APARATU LATAJĄCEGO

SIMULATION RESEARCH OF BLDC MOTOR USED FOR HYBRID UNMANNED AERIAL VEHICLE DRIVE

Abstract: The research results of BLDC motor used for drive of a hybrid unmanned aerial vehicle have been presented in the paper. The geometry of the designed electric motor and influence of form and magnetizing manner on permanent magnet versus average torque have been described. Using the simulation model, the designed motor output characteristics were defined. The influence of battery voltage changes on specificity of the motor has also been defined.

1. Wstęp

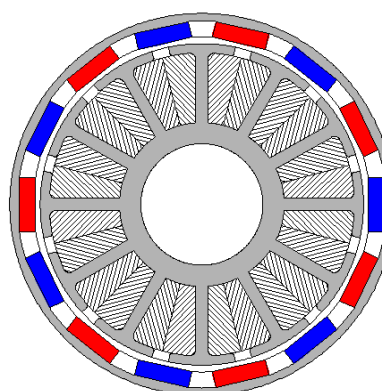
W ostatnich latach w lotnictwie rozpoczęto badania nad możliwością zastosowania napędów hybrydowych, szczególnie w bezzałogowych modelach latających [1-5]. Nowoczesny napęd hybrydowy jest próbą połączenia zalet napędu z silnikiem spalinowym (duża wartość energetyczna paliwa lotniczego) oraz napędu z silnikiem elektrycznym (wysoka sprawność przetwarzania energii). W zależności od układu, w którym pracuje silnik spalinowy i elektryczny lotniczy napęd hybrydowy można podzielić na: szeregowy, równoległy lub mieszany [5-7]. W niniejszej pracy jest rozpatrywany napęd hybrydowy równoległy, w którym silnik spalinowy pracuje z silnikiem elektrycznym na wspólnym wale lub poprzez przekładnię. Rozwiązanie ze wspólnym wałem jest najprostsze od strony konstrukcyjnej, jednak narzuca jednakową prędkość obrotową dla obu silników. Prędkość ta jest ściśle związana z charakterystyką śmigła.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań symulacyjnych polowo-obwodowych zaprojektowanego przez autorów bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDCM) przeznaczonego do lotniczego napędu hybrydowego. W pracy przedstawiono geometrię silnika oraz obliczone przebiegi czasowe napięć i prądów i charakterystyki ruchowe projektowanego silnika. Określono wpływ zmiany napięcia baterii akumulatorów na właściwości silnika. Na podstawie obliczeń FEM w programie CAD zbudowano pełny model 3D projektowanego silnika.

2. Projekt wstępny i model symulacyjny silnika BLDC

2.1. Wybór konstrukcji silnika

Z uwagi na wymagania dotyczące silnika przeznaczonego do napędu bezzałogowego aparatu latającego (minimalne wymiary, jak najmniejsza masa oraz możliwie największa sprawność), autorzy zdecydowali się na zastosowanie bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDCM). Dla otrzymania dużej wartości momentu przy małych gabarytach silnika zastosowano rozwiązanie z wirnikiem zewnętrznym. Na rysunku 1 przedstawiono przekrój poprzeczny konstrukcji projektowanego silnika BLDC.



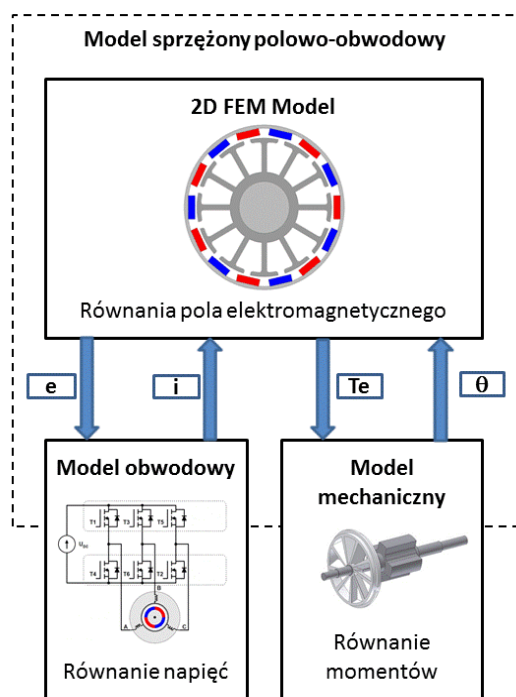
Rys.1. Przekrój poprzeczny projektowanego silnika BLDC

Z uwagi na specyfikę projektu, według której od silnika elektrycznego wymaga się możliwie jak najmniejszej wartości momentu zaczepowego, zdecydowano się na zastosowanie maszyny o liczbie biegunów stojana $N_s = 12$ i liczbie bie-

gunów wirnika $N_r = 14$ (liczba par biegunów wirnika $p = 7$). W celu ograniczenia strat w rdzeniu zastosowano blachę magnetyczną prądnicową izotropową o grubości 0.35 mm, zamiast standardowo stosowanej blachy 0.5 mm. Dla uzyskania założonych parametrów silnika zastosowano magnesy neodymowe klasy N42SH, które mogą pracować w temperaturze do 150°C. W projekcie analizowano cztery przypadki różniące się kształtem i/lub sposobem magnesowania magnesów trwałych.

2.2. Model polowo-obwodowy 2D projektowanego silnika BLDC

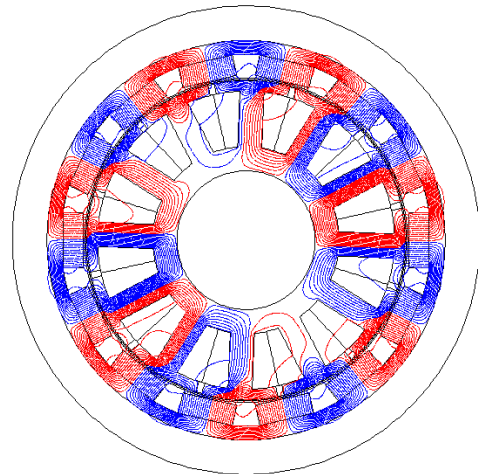
Metodykę obliczeń symulacyjnych projektowanego silnika BLDC oparto o model polowo-obwodowy 2D pozwalający na rozwiązywanie jednocześnie równań pola elektromagnetycznego metodą elementów skończonych (FEM), równań obwodowych uzwojeń silnika wraz z zasilaniem oraz równań ruchu mechanicznego. Na rysunku 2 przedstawiono ogólny schemat opracowanego modelu polowo-obwodowego silnika BLDC.



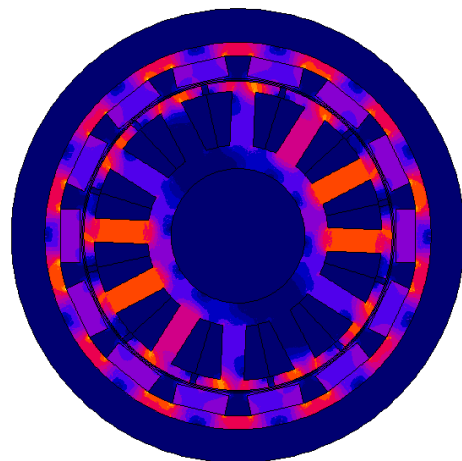
Rys.2. Schemat modelu polowo-obwodowego projektowanego silnika BLDC

Omawiany model symulacyjny jest w pełni sparametryzowany i pozwala na analizę nie tylko rozkładu pola magnetycznego, ale także na obliczanie przebiegów czasowych napięć, prądów i momentu, a także charakterystyk regulacyjnych silnika. Na rysunku 3

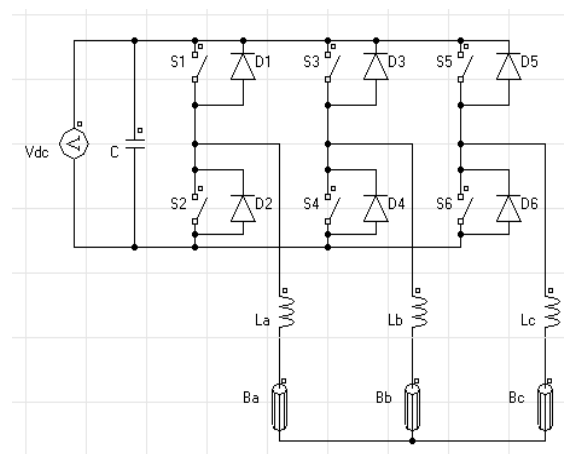
przedstawiono rozkład linii strumienia, zaś na rysunku 4 rozkład gęstości strumienia w obwodzie magnetycznym zaprojektowanego silnika BLDC.



Rys.3. Rozkład linii strumienia projektowanego silnika BLDC



Rys.4. Rozkład gęstości strumienia projektowanego silnika BLDC



Rys.5. Schemat modelu układu zasilającego

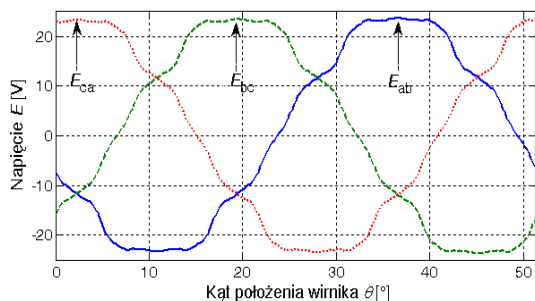
Na podstawie modelu symulacyjnego przeprowadzono obliczenia elektromagnetyczne ukierunkowane na uzyskanie możliwie jak największej wartości momentu elektromagnetycznego, przy możliwie jak najmniejszej wartości momentu zaczepowego. Obliczenia prowadzono dla czterech różnych kształtów magnesów i różnych ich polaryzacji. Do wyznaczenia przebiegów czasowych prądów poszczególnych pasm zamodelowano typowy układ zasilający stosowany w silnikach BLDC, którego schemat przedstawiono na rysunku 5.

Omawiany model pozwala także na analizę wpływu parametrów silnika na wypadkowe przebiegi napięć, prądów i momentu, a także wyjściowych charakterystyk regulacyjnych silnika.

3. Wyniki symulacji charakterystyk silnika BLDC

3.1. Przebiegi czasowe napięć, prądów i momentu

Napięcia indukowane E w poszczególnych pasmach silnika wyznaczono w obwodzie otwartym przy stałej prędkości obrotowej n . Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi czasowe napięć indukowanych międzypasmowych w funkcji kąta położenia wirnika θ .



Rys. 6. Zależność napięć indukowanych w silniku BLDC w funkcji kąta obrotu wirnika przy prędkości 8000 min^{-1}

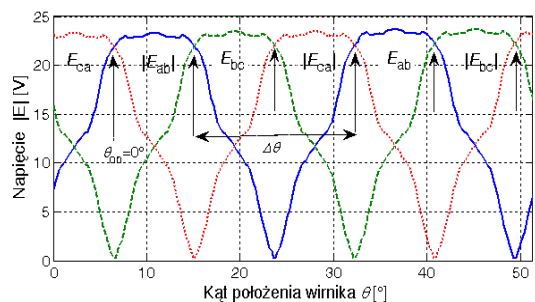
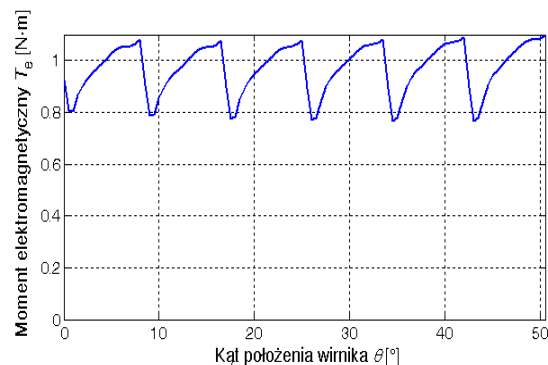


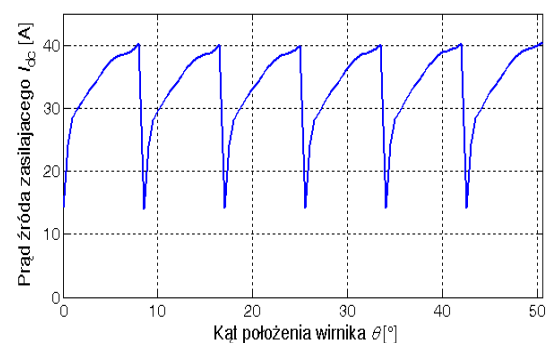
Fig. 7. Zależność napięć indukowanych z zaznaczeniem kątów komutacji poszczególnych elementów przełączających

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi czasowe napięć indukowanych E z zaznaczonymi chwilami załączania poszczególnych elementów przełączających układu. Kąt załączania θ_{on} w miejscach zaznaczonych strzałkami przyjęto umownie, jako równy 0° . Kąt przewodzenia $\Delta\theta$ każdego tranzystora jest równy $1/3$ okresu elektrycznego, co w analizowanym przypadku wynosi 17.14° stopnia mechanicznego. Z uwagi na niską wartość napięcia zasilającego $U_{dc}=[24\text{V} \div 29.6\text{V}]$, szczególną uwagę zwrócono na poprawne zamodelowanie spadków napięcia występujących na tranzystorach MOSFET oraz diodach.

Na rysunku 8 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta obrotu wirnika, zaś na rysunku 9 zależność prądu źródła zasilającego silnika I_{dc} od kąta obrotu.



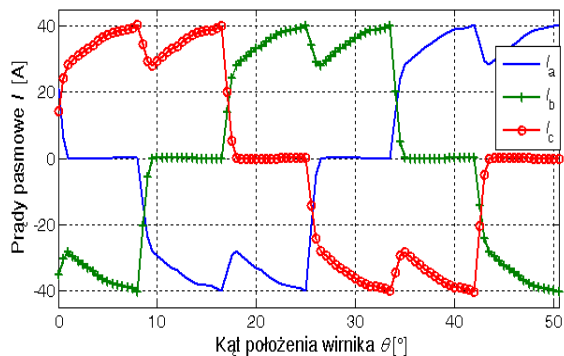
Rys. 8. Moment elektromagnetyczny T_e w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$ i $U_{dc}=26.5\text{V}$



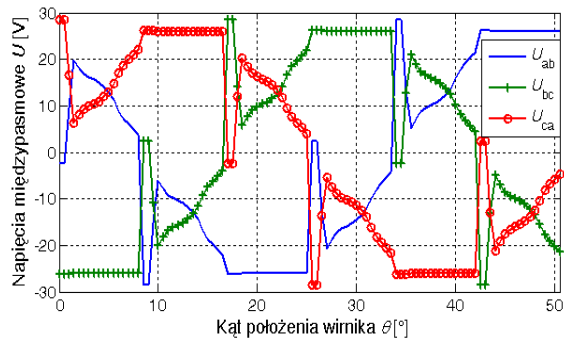
Rys. 9. Prąd źródła zasilającego w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$ i $U_{dc}=26.5\text{V}$

Na rysunkach 10 oraz 11 przedstawiono odpowiednio prądy poszczególnych pasm i_a , i_b , i_c (rys.10) oraz napięcia międzypasmowe U_{ca} , U_{bc} , U_{ab} (rys.11) w funkcji kąta położenia wirnika θ za jeden okres elektryczny przy prędkości $n=8000 \text{ min}^{-1}$. Zależności

wyznaczono przy napięciu zasilającym $U_{dc}=26.5V$ oraz przy kącie załączenia $\theta_{on}=0^\circ$.



Rys. 10. Prądy pasm w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$ i $U_{dc}=26.5V$



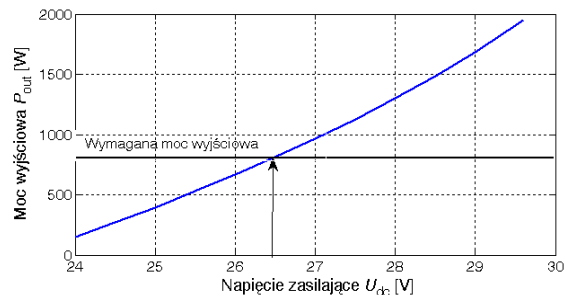
Rys. 11. Napięcia międzyprzewodowe w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$ i $U_{dc}=26.5V$

3.2. Charakterystyki regulacyjne silnika

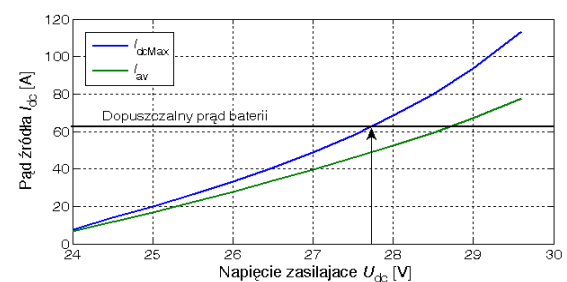
Zakres zmiany napięcia zasilającego wynika z właściwości zastosowanych ogniw zasilających. W analizowanym przypadku mieści się on w przedziale od $U_{dcmax}=29.6V$ do $U_{dcmin}=24V$. Dla przyjętego zakresu zmiany wartości napięcia zasilającego na podstawie modelu symulacyjnego FEM wyznaczano zależności prądów i momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu stałej prędkości obrotowej $n=8000 \text{ min}^{-1}$ oraz kącie załączenia $\theta_{on}=0^\circ$. Obliczenia FEM prowadzono dla różnych położeń wirnika, z krokiem 0.5° . Na podstawie wygenerowanych zależności momentu elektromagnetycznego oraz prądów wyznaczono zależność mocy wyjściowej P_{out} i prądu źródła zasilającego I_{dc} w funkcji wartości napięcia zasilającego U_{dc} , co przedstawiono odpowiednio na rysunkach 12 i 13.

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono odpowiednio zależności sprawności wypadkowej układu napędowego η (rys.14)

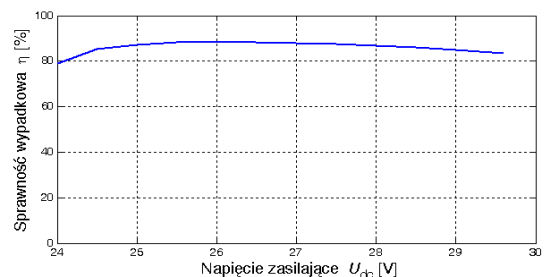
oraz strat w miedzi P_{Cu} (rys.15) w funkcji wartości napięcia zasilającego U_{dc} .



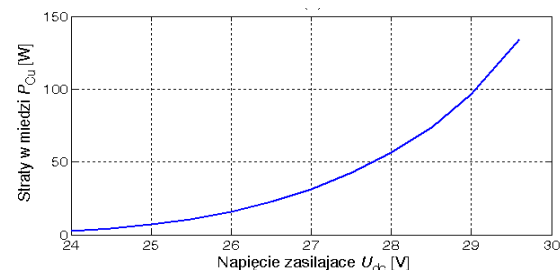
Rys. 12. Zależność mocy wyjściowej od napięcia zasilającego dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 13. Zależność prądu źródła zasilającego od napięcia zasilającego dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 14. Zależność sprawności wypadkowej układu napędowego od napięcia zasilającego dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$

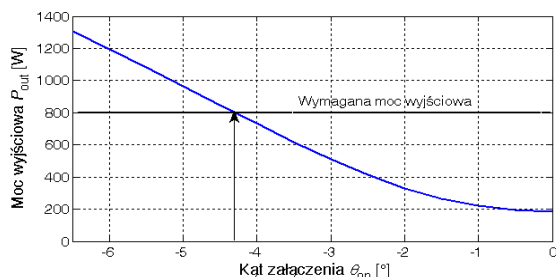


Rys. 15. Zależność strat w miedzi od napięcia zasilającego dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$

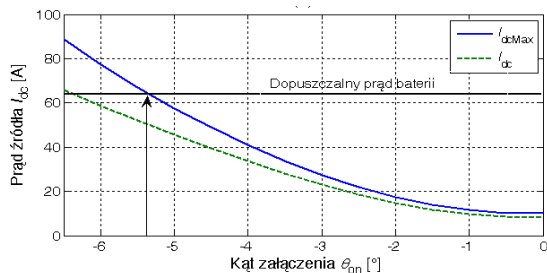
Przy wzroście napięcia zasilającego powyżej $27.6 V$ jest wymagane zastosowanie sterowania PWM dla ograniczenia wartości maksymalnej prądu źródła zasilającego (rys.13). Poniżej napięcia $U_{dc}=26.7V$ silnik nie jest w stanie

osiągnąć założonej mocy wyjściowej (rys.12). Od projektowanego silnika wymaga się, aby moc wyjściowa $P_{out}=800W$ była wytwarzana przy minimalnym napięciu zasilającym $U_{dcmin}=24V$. Można to uzyskać przez zwiększenie gabarytów silnika lub korektę kąta załączenia θ_{on} . Z uwagi na ograniczenia wagowe napędu elektrycznego zdecydowano się wprowadzić korektę kąta załączenia.

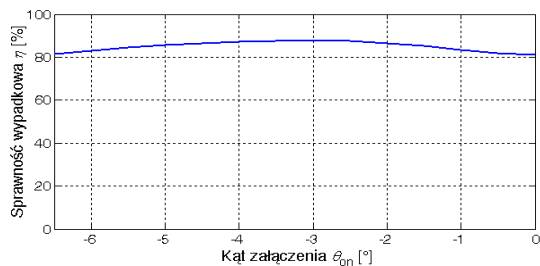
Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono zależność mocy wyjściowej P_{out} (rys. 16) oraz prądu źródła zasilającego I_{dc} (rys.17) od kąta załączenia θ_{on} . Zależność sprawności wypadkowej układu napędowego η oraz strat w miedzi P_{Cu} od kąta załączenia θ_{on} przy napięciu zasilającym $U_{dcmin}=24V$ oraz stałych kątach przewodzenia przedstawiono odpowiednio na rysunkach 18 i 19.



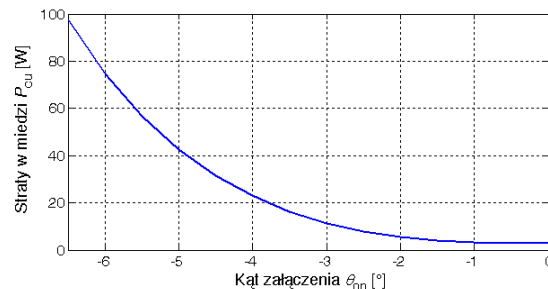
Rys. 16. Zależność mocy wyjściowej od kąta załączenia dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 17. Zależność prądu źródła zasilającego od kąta załączenia dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 18. Zależność sprawności wypadkowej układu napędowego od kąta załączenia dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 19. Zależność strat w miedzi od kąta załączenia dla $n=8000 \text{ min}^{-1}$

Wprowadzając odpowiednią korektę kąta załączenia $\theta_{on}=4.3^\circ$ uzyskuje się wymaganą moc wyjściową na wale silnika (rys.16). Jednak utrzymanie wymaganej wartości mocy wyjściowej przy spadku napięcia do wartości minimalnej będzie powodowało pogorszenie sprawności wypadkowej (rys.17). Z rysunku 16 wynika również, że zastosowanie niewielkiej korekty kąta załączenia $\theta_{on}\approx 1^\circ$ powoduje nieznaczny wzrost sprawności wypadkowej układu napędowego niezależnie od wartości napięcia zasilającego.

4. Model finalny zaprojektowanego silnika BLDC

Na podstawie wyników obliczeń symulacyjnych w programie CAD zbudowano kompletny model 3D projektowanego silnika BLDC. Na rysunku 20 przedstawiono widok zaprojektowanego modelu silnika przeznaczonego do realizacji praktycznej. Waga kompletnego modelu silnika obliczona na podstawie przewidzianych do wykonania materiałów wynosi 0.55 kg.

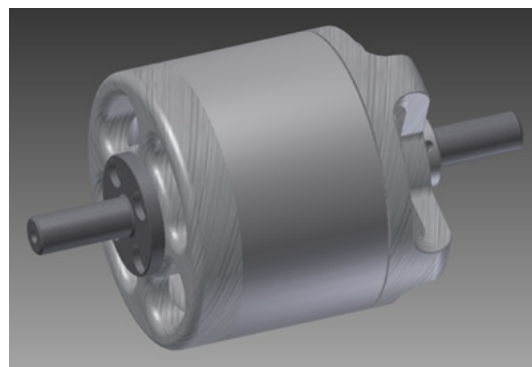


Fig. 20. Widok modelu 3D zaprojektowanego silnika BLDC

Na podstawie opracowanego modelu 3D wykonano prototyp silnika BLDC. Na rysunku 21 przedstawiono widok wykonanego wirnika zewnętrznego silnika, wałka oraz tarcz łożyskowych.



Rys.21. Widok tarcz łożyskowych, wirnika i wałka wykonanego silnika BLDC

Wyniki badań laboratoryjnych silnika będą tematem następných prac autorów.

5. Wnioski

W artykule przedstawiono studium możliwości zastosowania silnika BLDC do napędu bezzałogowego aparatu latającego. Ze względu na specyficzne wymagania zaproponowano zastosowanie silnika BLDC o konstrukcji 12/14. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że zaprojektowany silnik BLDC spełnia przyjęte założenia. Z badań symulacyjnych można wyciągnąć następujące wnioski.

- Zaprojektowany silnik posiada bardzo mały moment zaczepowy, co w przypadku pracy w równoległym napędzie hybrydowym jest dużą zaletą.
- Silnik ma wysoką sprawność, sprawność wypadkowa napędu (silnik wraz z układem zasilającym) przekracza 85%.
- Dzięki odpowiednio dobranemu kątowi załączenia θ_{on} silnik może dostarczać wymaganej mocy nawet w przypadku obniżenia się napięcia na akumulatorach zasilających poniżej 26.7V.
- Zastosowanie magnesów neodymowych powoduje, że silnik waży 0.55 kg, co stanowi 1/3 założonej wagi całego napędu elektrycznego, tj. silnika, sterownika i akumulatora.

Kolejnym etapem badań będzie laboratoryjna weryfikacja wyników uzyskanych metodą symulacyjną.

6. Literatura

[1] Glasscock, Richard R. and Hung, Jane Y. and Gonzalez, Luis F. and Walker, Rodney A.: *Multimodal hybrid powerplant for unmanned aerial*

systems (UAS) Robotics, In: Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, March 30th to April 1st 2009, Bristol United Kingdom

[2] Karunaratne, Lakmal; Economou, John T.; Knowles, Kevin; *Model based power and energy management system for PEM fuel cell/ Li-Ion battery driven propulsion system*, Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th, pp. 1-6

[3] Harmon F. G., Frank A. A., Chattot J.; *Conceptual Design and Simulation of a Small Hybrid-Electric Unmanned Aerial Vehicle*, Journal of Aircraft Vol. 43, No. 5, September–October 2006, pp. 1490-1498

[4] 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

[5] Zhang H., Saudemont C., Robyns B., Petit M.: *Comparison of Technical Features between a More Electric Aircraft and a Hybrid Electric Vehicle*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China

[6] Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2003.

[7] Szumanowski A: *Fundamentals of hybrid vehicle driver*, Monographic book. ITE Warsaw-Radom, 2000

[8] Gieras J. F., Wing M.: *Permanent Magnet Motor Technology - Design and Applications*, Second Edition, 2002, ISBN 0-8247-0739-7

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego R10 0026 06

Badania przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania AUTODESK INVENTOR zakupionego 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.

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

Recenzent

Prof. dr hab. Krystyna Macek-Kamińska