

doi:10.15199/48.2015.05.33

Analiza wpływu źródła zasilającego na właściwości bezzszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi przeznaczonego do napędu bezzałogowego aparatu latającego

Streszczenie. Czas przebywania obiektu latającego w powietrzu zależy zarówno od rodzaju zastosowanego napędu oraz rodzaju źródła zasilania. Klasyczne akumulatory elektrochemiczne pomimo zwiększenia ich energii właściwej w ostatnich latach nie zapewniają podstawowego wymogu jakim jest długi czas przebywania w powietrzu. Alternatywą są ogniwa paliwowe. Omówiono podstawowe właściwości analizowanych źródeł zasilania. Zamieszczono charakterystyki obciążeniowe wybranych klasycznych źródeł zasilania jak również ogniwa paliwowe. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz sprawności silnika zasilanego z różnych źródeł. Dokonano analizy wpływu rodzaju źródła zasilającego na właściwości bezzszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi.

Abstract. The residence time of the flying object in the air depends both on the type of propulsion and the type of the power source. Classical electrochemical batteries, in spite of the increase of specific energy, have not provided in recent years the basic requirement such as a long residence time in the air. The fuel cells are an alternative. In the paper the basic properties of the analyzed sources of power were analyzed. The load characteristics of the selected traditional power sources as well as the fuel cell were featured. In the laboratory conditions the mechanical characteristics were determined as well as the efficiency of the motor supplied from a variety of sources. An analysis of the impact of the type of power source on the characteristics of the brushless permanent magnet DC motor was done. (**Analysis of the impact of the power source on the properties of brushless permanent magnet DC motor for the propulsion of UAV.**)

Słowa kluczowe: bezzałogowy aparat latający, źródło zasilające, ogniwo paliwowe, ogniwo litowo-polimerowe, bezzszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi.

Keywords: unmanned aerial vehicle, the source of power, fuel cell, lithium polymer cell, brushless permanent magnet DC motor

Wstęp

Bezzałogowe aparaty latające (BAL) są małymi statkami powietrznymi, które w zależności od przeznaczenia mogą pełnić różne funkcje np. monitorowania linii energetycznych, lasów, itp. Napędy przeznaczone do BAL muszą charakteryzować się możliwie wysoką sprawnością. W dotychczas istniejących napędach elektrycznych najwyższe sprawności uzyskiwane są przy zastosowaniu maszyn z magnesami trwałymi. Ze względu na prosty algorytm sterowania najczęściej w takich napędach stosuje się bezzszczotkowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi (BLDCM – Brushless DC Motors) [1-4]. Ze względu na konieczność autonomicznego zasilania napędu elektrycznego w BAL niezbędnym elementem całego systemu jest źródło zasilania. Od jego parametrów zależy zarówno zasięg BAL, jak i osiągi układu napędowego.

Celem niniejszej pracy jest badanie właściwości napędu z silnikiem BLDC zasilanego z baterii akumulatorów oraz ogniwa paliwowego [5-11]. Badanie właściwości zestawów napędowych ma na celu określenie przydatności ich do zastosowań w bezzałogowych aparatach latających.

W niniejszej pracy przedstawiono właściwości oraz wyniki badań laboratoryjnych różnego typu akumulatorów elektrochemicznych oraz ogniwa paliwowego. Zamieszczono wyznaczone w warunkach laboratoryjnych charakterystyki mechaniczne i sprawności ogólnej badanego silnika przy zastosowaniu różnych źródeł zasilania. Dokonano analizy otrzymanych wyników szczególnie w odniesieniu do ogniwa paliwowego. Zamieszczono wnioski dotyczące wpływu źródła zasilającego na właściwości silnika.

Akumulatory elektrochemiczne

Z punktu widzenia użytkownika stosowane akumulatory elektrochemiczne powinny charakteryzować się:

- małymi wymiarami,
- niską masą,
- krótkim czasem ładowania,

- wysokim bezpieczeństwem użytkowania,
- dużą trwałością,
- znikomym zjawiskiem samorozładowania,
- niską ceną.

Powyższe cechy powodują, że w jak najmniejszej objętości, przy możliwie niskiej masie otrzymuje się źródło energii elektrycznej dużej wydajności energetycznej. Możliwość szybkiego ładowania pozwala w krótkim czasie uzupełnić energię w akumulatorze. Duża trwałość akumulatorów ma zasadnicze znaczenie tam, gdzie czas eksploatacji akumulatorów jest długi, a ich cena wysoka. Taki przypadek występuje np. w samochodach elektrycznych i hybrydowych, gdzie żywotność akumulatorów przewiduje się na około 10 lat. Jednoczesne spełnienie powyższych warunków jest jednak bardzo trudne do zrealizowania w praktyce.

Obecnie w powszechnym użytku od wielu lat stosowane są akumulatory kwasowo-ołowiowe (Pb) charakteryzujące się niską ceną, łatwością recyklingu. Oprócz wymienionych zalet akumulatory tego typu posiadają również wady do których należą niska energia właściwa (40-60 Wh/kg) oraz wysoki współczynnik samorozładowania. Drugim rodzajem ogniwo powszechnie stosowanych od prawie wieku są ogniwa niklowo-kadmowe (NiCd), charakteryzujące się bardzo wysoką trwałością i niezawodnością. Akumulatory tego typu posiadają wyższą energię właściwą w porównaniu do akumulatorów kwasowo-ołowiowych, która wynosi od 60 do 80 Wh/kg. Wadą tych akumulatorów jest wysoka toksyczność kadmu oraz tzw. efekt pamięciowy. Efekt ten polega na zmniejszeniu pojemności akumulatora wskutek niewłaściwej jego eksploatacji. Następcą ogniwo Ni-Cd są ogniwa niklowo-wodorkowe (NiMH), które posiadają podobne właściwości elektryczne. Jednak ze względu na brak kadmu są bardziej przyjazne dla środowiska. Ponadto charakteryzują się większą energią właściwą, która zawiera się między 60 a 100 Wh/kg.

Zarówno ogniwa Pb, NiCd oraz NiMH posiadają małą energię właściwą w porównaniu do ogniwo wykonanych z

zastosowaniem litu. Akumulatory litowe charakteryzują się znacznie wyższą energią właściwą w porównaniu do wyżej wymienionych ogniw. Dostępne na rynku akumulatory litowe w zależności od typu i zastosowania posiadają energię właściwą zwiernającą się pomiędzy 100 a 260 Wh/kg.

Obecnie dostępne na rynku akumulatory litowe można podzielić na trzy grupy:

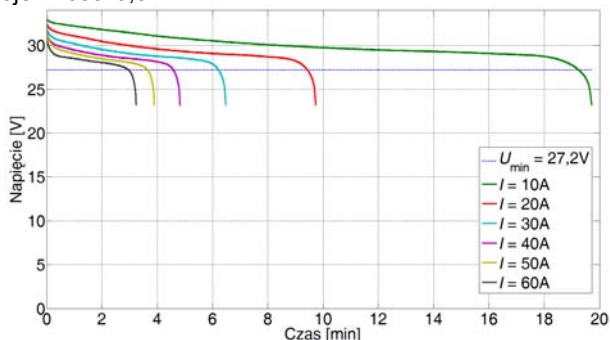
- litowo-jonowe (Li-ion),
- litowo-polimerowe (Li-Po),
- litowo-żelazowo-fosforowe (LiFePO₄).

Ogniwa litowo-jonowe (Li-ion)

Ogniwa Li-ion posiadają stosunkowo wysokie napięcie pracy, zawierające się w przedziale 4,1 – 2,5 V, przy czym ich znamionowe napięcie wynosi 3,6 V. Energia właściwa dostępnych na rynku ogniw Li-ion wynosi ponad 150 Wh/kg. Maksymalne wartości prądu rozładowania mogą dochodzić do 5C, chociaż w większości przypadków nie jest zalecane przekraczania obciążenia 1-2C. Współczynnik samorozładowania ogniw Li-ion jest bardzo nieznaczny, mogą one być przechowywane nawet kilka lat, bez znaczącej straty pojemności. Nie wykazują też efektu pamięci, a zakres temperatury w jakim mogą pracować jest bardzo szeroki i wynosi od -40 do 65 °C.

Ogniwa litowo-polimerowe (Li-Po)

Ogniwa litowo-polimerowe (Li-Po) są następną generacją ogniw wywodzącą się z ogniw litowo-jonowych i różniącą się od nich tylko niektórymi właściwościami i parametrami. Podstawowa zasada działania, jak też zachodzące w ogniwie reakcje chemiczne są takie same jak w ogniwach Li-ion. Z punktu widzenia użytkownika ogniwa Li-Po różnią się napięciem znamionowym (wynosi ono 3,7 V) oraz maksymalnym (4,2V). Ponadto ogniwa Li-Po charakteryzują się większą wytrzymałością na uszkodzenia mechaniczne od ogniw Li-ion, a także potrafią pracować przy znacznie większych obciążeniach, w zależności od typu ogniwa, nawet do 30C. Na rysunku 1 pokazano charakterystyki rozładowania ogniwa LiPo o znamionowej pojemności 3,3Ah.



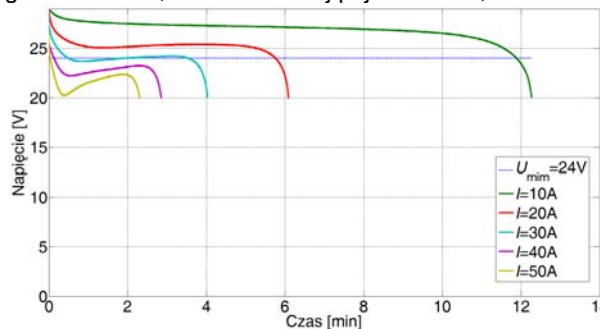
Rys.1. Charakterystyki rozładowania ogniwa LiPo o pojemności znamionowej 3,3Ah

Ogniwa litowo-żelazowo-polimerowe (LiFePO₄)

Akumulatory litowo-polimerowo-żelazowe (LiFePO₄) oprócz Li-ion, LiPo, są kolejną odmianą akumulatorów litowych. Tego typu akumulatory charakteryzują znamionowym napięciem pracy wynoszącym 3,3V. Jest ono niższe niż w przypadku ogniw Li-ion i Li-Po akumulatory LiFePo₄ posiadają szereg zalet, do których należy zaliczyć:

- duży prąd ładowania,
- duży prąd rozładowania (do 30C),
- odporność na przeładowania większą niż Li-Po i Li-ion ale nadal ograniczoną,
- dużą żywotność (od 1000 do 5000 cykli).

Na rysunku 2 pokazano charakterystyki rozładowania ogniwa LiFePO₄ o znamionowej pojemności 2,3Ah.



Rys.2. Charakterystyki rozładowania ogniwa LiFePO₄ o pojemności znamionowej 2,3Ah

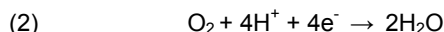
Ogniwo paliwowe

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się szybki rozwój technologii ogniw paliwowych (OP) – efektem wieloletnich prac badawczych i rozwojowych jest pojawienie się na rynku komercyjnym alternatywnych źródeł energii elektrycznej. Cechuje je wysoka efektywność konwersji, znikoma szkodliwość dla środowiska, bezgłośna praca i pozornie nieskomplikowana budowa. Ogniwo paliwowe jest ogniwem galwanicznym, a jego cechą wyróżniającą jest to, że substancje aktywne elektrochemicznie, tj. biorące udział w procesach elektrodowych, są dostarczane z zewnątrz do ogniwa zaś produkty reakcji wyprowadzane na zewnątrz ogniwa [5]. Tak więc OP działa tak długo jak dostarczane jest paliwo (najczęściej wodór) i utleniacz (najczęściej tlen z powietrza). Proces konwersji energii zachodzi jednak w OP w jednym etapie (konwersja bezpośrednia) i prowadzi do wytworzenia energii elektrycznej oraz ciepła odpadowego i wody.

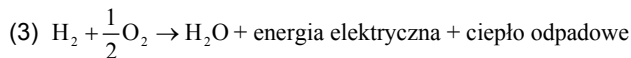
W ogniwie paliwowym reakcje elektrochemiczne zachodzące na anodzie i katodzie rozdzielone są gazoszczelnym elektrolitem. Na anodzie następuje utlenianie wodoru (równanie 1):



Na katodzie zachodzi proces redukcji tlenu zapisany w postaci równania 2:



Sumaryczna reakcja zachodząca w OP może zostać zapisana w postaci równania 3:

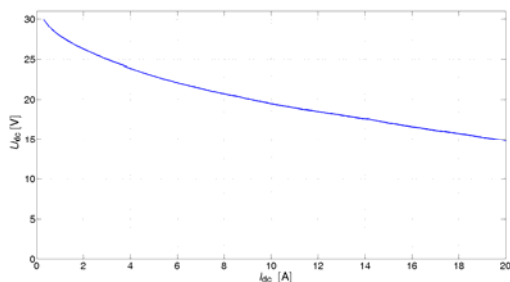


W stosunku do konkurencyjnego zasilania elektrycznego z akumulatorów elektrochemicznych, system ogniw paliwowych waży ponad 3,5 razy mniej niż bateria ogniw litowo-jonowych o podobnych parametrach, 8 razy mniej niż bateria ogniw niklowo-wodorkowych oraz 16 razy mniej niż zespół akumulatorów kwasowo-ołowiowych.

Z uwagi na znacznie korzystniejsze parametry gęstości energii prowadzone są próby zastępowania dotychczas stosowanych ogniw (np. litowo-polimerowych) właśnie ogniwami paliwowymi. W bezzałogowych aparatach latających wydłużenie czasu lotu jest w wielu przypadkach czynnikiem wręcz krytycznym. Z tego też powodu podejmowane są próby zastosowania ogniw paliwowych w bezzałogowych aparatach latających [6-11].

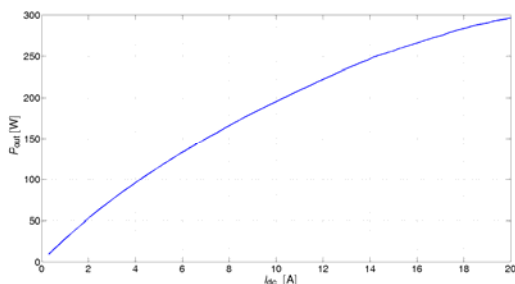
Ogniwa paliwowe mają w odniesieniu do klasycznych źródeł bateryjnych mniej korzystną charakterystykę zewnętrzną. W warunkach laboratoryjnych została wyznaczona charakterystyka obciążeniowa ogniwa paliwowego przewidzianego do zastosowania w

bezzałogowym aparacie latającym (rys.3). Ogniwo paliwowe zostało zbudowane na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie.



Rys.3. Zależność napięcia U_{dc} badanego ogniwa paliwowego w funkcji prądu obciążenia I_{dc}

Zależność mocy wyjściowej ogniwa P_{out} w funkcji prądu obciążenia I_{dc} pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Zależność mocy wyjściowej P_{out} badanego ogniwa w funkcji prądu obciążenia I_{dc}

Badania laboratoryjne silnika BLDC

W warunkach laboratoryjnych wyznaczone zostały charakterystyki mechaniczne oraz sprawności badanego silnika BLDC (liczba zębów stojana $N_s=12$, liczba biegunów wirnika $N_r=14$, $P_{inmax}=290W$ przy $I_{dc}=10A$ przez 20s) przeznaczony do napędu lekkiego testowego bezzałogowego aparatu latającego. Widok stanowiska laboratoryjnego pokazano na rysunku 5. Badania laboratoryjne przeprowadzono dla trzech przypadków zasilania:

- ze źródła o stabilizowanej wartości napięcia o regulowanej wartości,
- z pakietu ogniw Li-Po o pojemności 3,3Ah i napięciu znamionowym 29,6V,
- z ogniwa paliwowego.

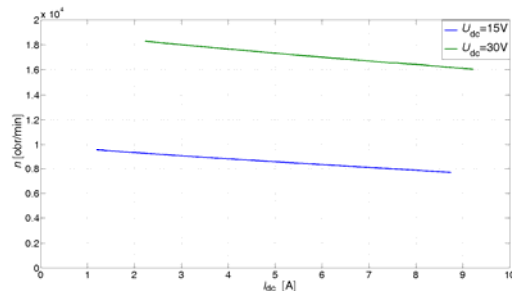


Rys.5. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyk ruchowych badanego silnika BLDC

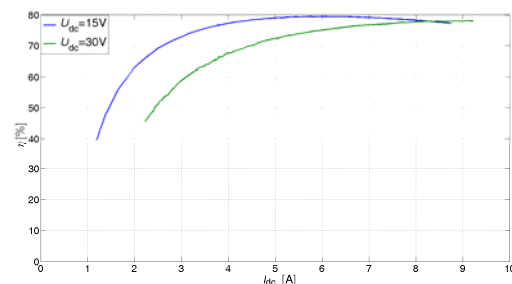
Źródło o stabilizowanej wartości napięcia

W przypadku źródła o stabilizowanej badania przeprowadzono dla dwóch wartości napięcia zasilającego

tj. 15V i 30V. Są to graniczne wartości napięcia zasilającego ogniwa paliwowego wyznaczone w warunkach laboratoryjnych (rys.3). Dla każdej wartości napięcia zasilającego została wyznaczona zależność prędkości obrotowej n (rys. 6) oraz sprawności ogólnej η (rys.7) w funkcji prądu pobieranego ze źródła zasilającego I_{dc} .

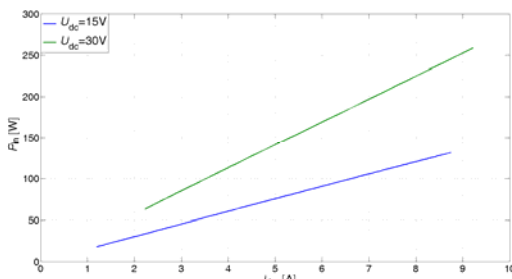


Rys.6. Zależność prędkości obrotowej silnika n w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania ze źródła o stabilizowanej wartości



Rys.7. Zależność sprawności ogólnej η w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania ze źródła o stabilizowanej wartości

Wyznaczone charakterystyki mechaniczne silnika otrzymane przy zasilaniu napięciem o stabilizowanej wartości można traktować jako odniesienie. Uzyskana sprawność ogólna w tym przypadku nie przekraczała 80%. Zależność mocy pobieranej P_{in} w funkcji prądu źródła I_{dc} pokazano na rysunku 8.



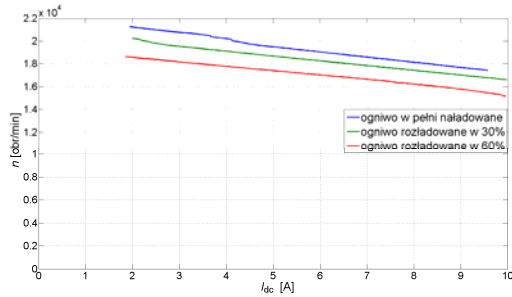
Rys.8. Zależność mocy pobieranej P_{in} w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania ze źródła o stabilizowanej wartości

Przy napięciu $U_{dc}=30V$ silnik pobiera moc $P_{in}=200W$ oraz prądzie około $I_{dc}=7A$ (prędkość $n=16800$ obr/min i sprawności $\eta=76\%$). Dla napięcia równego 15V silnik nie będzie już osiągał założonego punktu pracy.

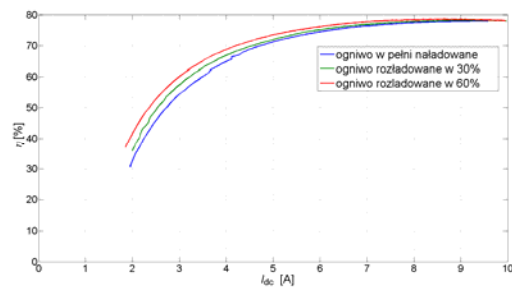
Ogniwo litowo-polimerowe (Li-Po)

Pakiet ogniw litowo-polimerowych (Li-Po) o pojemności 3,3Ah przed rozpoczęciem badań został w pełni naładowany. Napięcie spoczynkowe w pełni naładowanego pakietu Li-Po wynosiło wartość 33,6V. Wyznaczanie charakterystyk ruchowych tj. prędkości obrotowej n i sprawności ogólnej od prądu I_{dc} pakietu ogniwa Li-Po przeprowadzono kilkakrotnie aż do osiągnięcia minimalnej wartości napięcia (rys.1). Na rysunku 9 pokazano zależność prędkości obrotowej n w funkcji prądu źródła I_{dc} dla trzech stanów naładowania ogniwa Li-Po tj. w pełni naładowanego, rozładowanego w 30% oraz rozładowanego

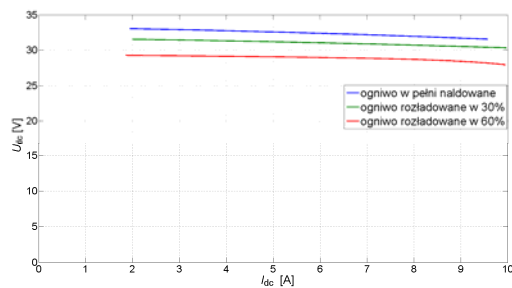
w 60%. Zależność sprawności ogólnej η funkcji prądu źródła I_{dc} pokazano na rysunku 10. Napięcie zasilające U_{dc} oraz moc pobieraną przez silnik P_{in} w funkcji prądu źródła I_{dc} pokazano odpowiednio na rysunkach 11 i 12.



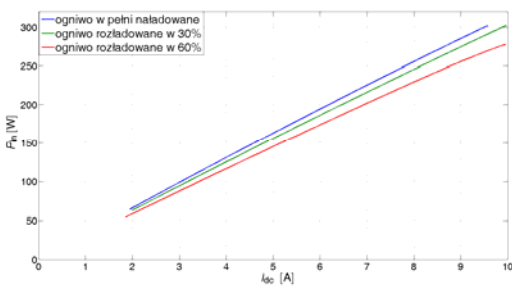
Rys.9. Zależność prędkości obrotowej silnika n w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z pakietu ogniw Li-Po



Rys.10. Zależność sprawności ogólnej η w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z pakietu ogniw Li-Po



Rys.11. Zależność napięcia zasilającego U_{dc} w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z pakietu ogniw Li-Po



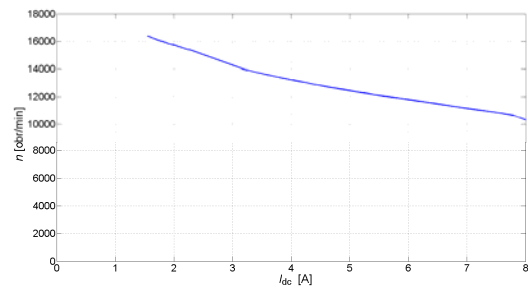
Rys.12. Zależność mocy pobieranej P_{in} w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z pakietu ogniw Li-Po

Sztywność uzyskanych charakterystyk mechanicznych przy zasilaniu z pakietu ogniw LI-Po jest zauważalnie mniejsza co związane jest z procesem rozładowania ogniwa. Pakiet ogniw Li-Po w pełni naładowany początkowo dość szybko obniża wartość napięcia wyjściowego. Jest to widoczne na rysunku 1 i 11. Częściowo rozładowane ogniwo Li-Po charakteryzuje się najmniejszą zmiennością napięcia co wpływa na poprawę sztywności charakterystyki mechanicznej (rys.10). Przy znacznym rozładowaniu ogniwa Li-Po (powyżej 60%) występuje największa zmienność napięcia zasilającego i tym samym najmniejsza sztywność charakterystyki mechanicznej. Sprawność przy mocy pobieranej równej 200W nie przekraczała (75-77)% w

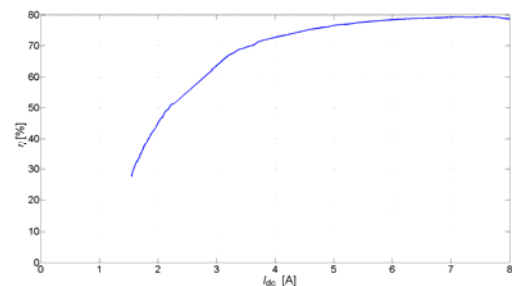
zależności od stanu naładowania ogniwa. Wzrost prędkości obrotowej powoduje zwiększone straty mechaniczne oraz w żelazie silnika co w konsekwencji prowadzi do pogorszenia sprawności.

Ogniwo paliwowe

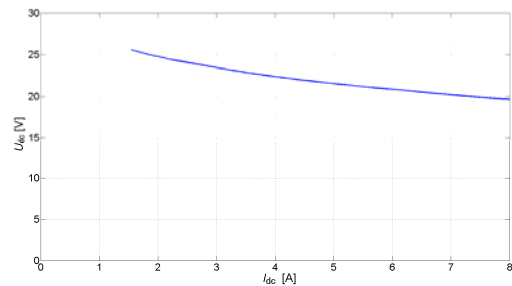
Przy badaniach wykonywanych z wykorzystaniem ogniwa paliwowego silnik obciążano do momentu obniżenia się napięcia zasilającego do wartości 19V co wynika z postawionego ograniczenia. Na rysunku 13 pokazano zależność prędkości obrotowej n w funkcji prądu źródła I_{dc} w przypadku zasilania silnika ze źródła paliwowego. Sprawność ogólną η , napięcie zasilające U_{dc} oraz moc pobieraną P_{in} w funkcji prądu źródła I_{dc} pokazano odpowiednio na rysunkach 14-16.



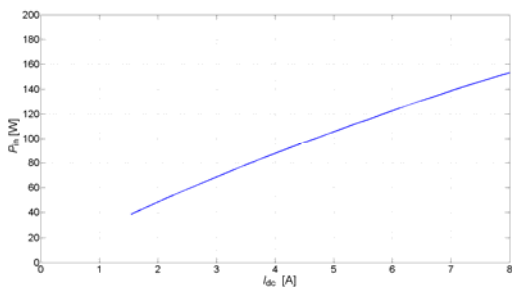
Rys.13. Zależność prędkości obrotowej silnika n w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z ogniwa paliwowego



Rys.14. Zależność sprawności ogólnej η w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z ogniwa paliwowego



Rys.15. Zależność napięcia zasilającego U_{dc} w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z ogniwa paliwowego



Rys.16. Zależność mocy pobieranej P_{in} w funkcji pobieranego prądu I_{dc} dla zasilania z ogniwa paliwowego

Uzyskana sztywność charakterystyki mechanicznej jest niezadawalająca, ale wynika ona z charakterystyki obciążeniowej ogniwa paliwowego (rys.3, 15). Nie uzyskano

wymaganej mocy z ogniwa paliwowego (200W) przy określonej minimalnej wartości napięcia zasilającego (19V). Badane ogniwo paliwowe pozwala na utrzymanie aparatu w powietrzu oraz wykonywanie manewrów nie wymagających znacznego wzrostu mocy na wale silnika. Ten problem można rozwiązać poprzez zmiany konstrukcyjne stosu ogniwa paliwowego co pozwoli uzyskać wymaganą moc przy określonej minimalnej wartości napięcia. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie równolegle ogniwa Li-Po które pozwoli uzyskać wymaganą moc przy określonej wartości napięcia zasilającego [12] np. w fazie wznoszenia czy też przy wykonywaniu manewrów wymagających znacznej wartości mocy na wale silnika.

Wnioski

Rodzaj źródła zasilania wpływa na uzyskaną sztywność charakterystyk mechanicznych. Klasyczne źródła zasilania bateryjnego oparte o ogniwa Li-Po zapewniają stabilne warunki pracy silnika w szerokim zakresie charakterystyki obciążeniowej ogniwa. Niewątpliwie z uwagi na określoną wartość napięcia pojedynczego ogniwa nie można uzyskać dowolnej wartości napięcia zasilającego silnik. Zastosowanie ogniwa paliwowego do zasilania silnika elektrycznego jest alternatywą dla klasycznych rozwiązań wykorzystujących akumulatory elektrochemiczne. Niezbędne są dalsze prace badawczo rozwojowe mające na celu integrację i dostosowanie ogniwa paliwowego i silnika elektrycznego. Możliwości kształtowania napięcia wyjściowego są znacznie większe. Pozwala to dopasować napięcie wyjściowe do wymagań układu napędowego. Z uwagi na duży zakres zmienności napięcia wyjściowego ogniwa paliwowego sztywność charakterystyki mechanicznej silnika jest niezadawalająca. Wymaga to już na etapie projektowania układu napędowego uwzględnienia charakterystyki obciążeniowej ogniwa paliwowego w celu uzyskania wymaganych parametrów silnika. Alternatywnie należy przewidzieć zasilanie hybrydowe które składa się z ogniwa paliwowego oraz klasycznego ogniwa np. Li-Po.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego „Technologie hybrydowego zespołu napędowego lekkich lub bezzałogowych statków powietrznych” – DZP/INNOLOT-1/2020/2013

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] 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
- [4] Glinka T., Silniki elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.84, Nr 07/2008,1-7
- [5] Lapena-Rey N., Mosquera J., Bataller E., and Otri F., Environmentally friendly power sources for aerospace applications, *Journal of Power Sources* 181 (2) 2008, 353-362.
- [6] Lapena-Rey N., Mosquera J., Bataller E., and Otri F., First fuel-cell manned aircraft, *Journal of Aircraft*, 47 (6), (2010), 1825-1835
- [7] Moffitt B. A., Bardley T.H., Parekh D., Mavirs D., Design and performance validation of a fuel cell unmanned aerial vehicle, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*
- [8] Bardley T. H., Moffitt B. A., Fuller T. F., Mavris D., Parekh D., Design studies for hydrogen fuel cell powered unmanned aerial vehicles, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*
- [9] Rhoads G. D., Wagner N. A., Taylor B., Keen D., Design and flight test results for a 24 hour fuel cell unmanned aerial vehicle, *5th Annual International Energy Conversion Engineering Conference*, AIAA 2010-6690
- [10] Record flight UAV using Protonex fuel cell system, *Fuel Cells Bulletin* December 2009,4
- [11] Jadoo fuel cells powers Mako unmanned aerial vehicle, *Fuel Cells Bulletin* 2009, 4
- [12] Horizon fuel cell technology, www.hes.sg/areopack, Technical data sheet

Autorzy:

dr inż. Piotr Bogusz, e-mail: pbogu@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, e-mail: mkosz@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

dr inż. Piotr Wygonik, e-mail: piowyg@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

dr inż. Magdalena Dudek, e-mail: potoczek@agh.edu.pl, AGH - Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

mgr inż. Bartłomiej Lis, e-mail: blis@agh.edu.pl, AGH - Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków