

**Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Piotr Wygonik**  
**Politechnika Rzeszowska**  
**Magdalena Dudek, Bartłomiej Lis**  
**Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków**

## **BADANIA LABORATORYJNE SILNIKA ELEKTRYCZNEGO PRZEZNACZONEGO DO NAPĘDU MAŁEGO BEZZAŁOGOWEGO APARATU LATAJĄCEGO ZASILANEGO Z OGNIWA PALIWOWEGO**

### **LABORATORY TEST OF ELECTRIC MOTOR TO DRIVE OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE POWERED FROM FUEL CELL**

**STRESZCZENIE:** Ogniwa paliwowe są nowoczesnym źródłem zasilania. W ostatnim czasie prowadzone są intensywne prace związane z zastosowaniem ogniwo paliwowych w różnych aplikacjach. Jedną z tych aplikacji jest napęd małego bezzałogowego aparatu latającego. Charakterystyka wyjściowa ogniwa paliwowego charakteryzuje się stosunkowo dużą zmiennością napięcia wyjściowego. Wymaga to dopasowania napięcia zasilającego silnik do możliwości ogniwa paliwowego oraz jego wydajności prądowej. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania silników elektrycznych przewidzianych do napędu małego bezzałogowego aparatu latającego. Badania przeprowadzono przy zasilaniu ze źródła stabilizowanego oraz z ogniwa paliwowego dedykowanego do zasilania silnika elektrycznego.

**Abstract:** Fuel cells are a modern source of supply. An intensive works connected with application fuel cells in various application were recently conducted. One of this application is a drive of a small unmanned aerial vehicle. The output characteristic of fuel cell has relatively large variation of the output voltage. It cause the necessity to fit the supply voltage to possibilities of fuel cell and its current efficiency. Studies of electric motors intended to drive of small unmanned aerial vehicle were performed. Studies were performed by supply from stabilized source and from fuel cell intended to supply the electric motor.

**Słowa kluczowe:** *bezzałogowy aparat latający, bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi, ogniwo paliwowe*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, brushless direct current DC motor, fuel cell*

### **1. Wstęp**

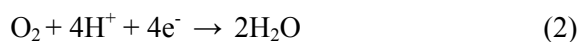
Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się szybki rozwój technologii ogniwo paliwowych (OP) – efektem wieloletnich prac badawczych i rozwojowych jest pojawienie się na rynku komercyjnym alternatywnych źródeł energii elektrycznej. Cechuje je wysoka efektywność konwersji, znikoma szkodliwość dla środowiska, bezgłośna praca i pozornie nieskomplikowana budowa. Ogniwo paliwowe jest ogniwo 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 [1]. 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.

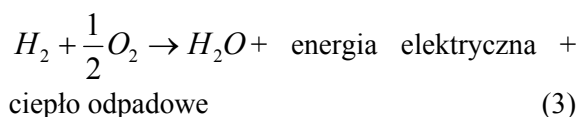
W ogniwo paliwowym reakcje elektrochemiczne zachodzące na anodzie i katodzie rozdzielone są gazoszczelnym elektrolitem. Na anodzie następuje utlenianie wodoru (równanie 1):



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 [2-7].

## 2. Założenia techniczne dla elektrycznego systemu napędowego bezzałogowego aparatu latającego

W celu doboru silnika do lekkiego bezzałogowego aparatu latającego przyjęto następujące założenia:

- moc stosu ogniw paliwowych przy obciążeniu znamionowym powinna wynosić 200W przy napięciu 20V,
- moc maksymalna pobierana ze źródła zasilania przez silnik elektryczny bezszczotkowy prądu stałego z magnesami trwałymi (BLDC) nie powinna przekraczać 200W,
- prędkość obrotowa silnika elektrycznego przy obciążeniu znamionowym powinna wynosić około 11000obr/min.

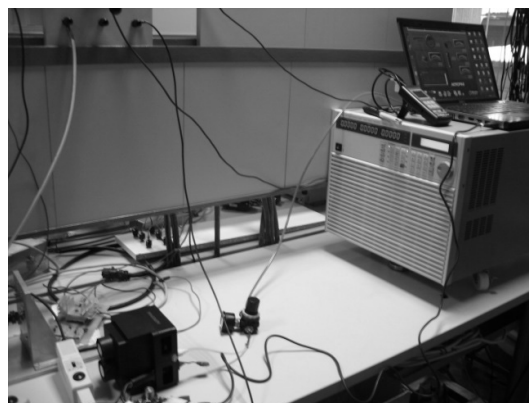
## 3. Badania ogniwa paliwowego

Do zasilania bezzałogowego aparatu latającego przewidziano ogniwo paliwowe. W projekcie założono, że przebadane zostaną dwa rozwiązania ogniw:

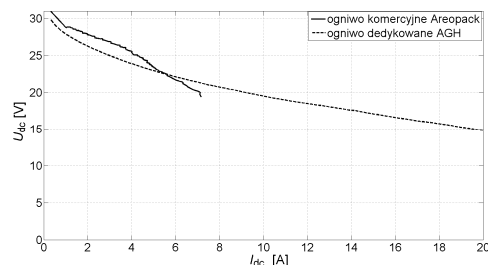
- komercyjne (Aeropack) [9]

- dedykowane - opracowane i wykonane w ramach projektu (AGH).

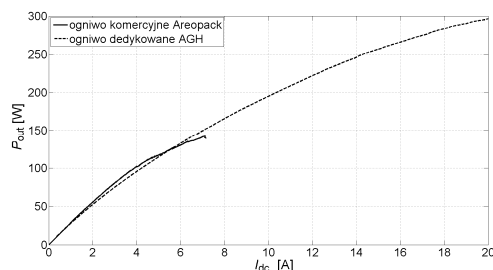
Ogniwa paliwowe przebadano na opracowanym i wykonanym stanowisku badawczym wyposażonym w obciążenie programowalne (rys.1). Obydwa ogniwa przebadano w warunkach laboratoryjnych. Na rysunkach 2 i 3 pokazano charakterystyki obciążeniowe (rys.2) oraz mocy oddawanej (rys.3) w funkcji prądu obciążenia  $I_{dc}$ .



Rys.1. Stanowisko badawcze do testowania wydajności prądowej ogniwa paliwowego z zastosowaniem obciążenia programowalnego



Rys.2. Zależność napięcia wyjściowego  $U_{dc}$  w funkcji prądu obciążenia  $I_{dc}$  badanych ogniw paliwowych



Rys.3. Zależność mocy wyjściowej  $P_{out}$  w funkcji prądu obciążenia  $I_{dc}$  badanych ogniw paliwowych

Jak widać z zamieszczonych badań laboratoryjnych ogniwo dedykowane do zasilania silnika elektrycznego posiada

znacznie korzystniejsze charakterystyki obciążeniowe. Uzyskano ponad dwukrotnie większą moc z ogniwa dedykowanego do zasilania silnika elektrycznego przewidzianego do napędu małego bezzałogowego aparatu latającego. Natomiast badany egzemplarz ogniwa komercyjnego Aeropack nie osiągnął mocy katalogowej.

#### 4. Dobór silnika do napędu małego bezzałogowego aparatu latającego

Jak zauważono w przeprowadzonych badaniach, nieobciążone ogniwo paliwowe posiada na wyjściu napięcie na poziomie około 32V. Przy obciążeniu prądem około 10A napięcie na wyjściu ogniwa zmniejsza się do wartości około 20V. Ogniwo pozwala obciążyć się mocą  $P=200\text{W}$  (według karty katalogowej producenta ogniwa komercyjnego Aeropack) [9]. Dobierając silnik elektryczny do napędu małego bezzałogowego aparatu latającego należało zatem uwzględnić nie tylko wydajność prądową ogniwa, ale również zakres zmiany napięcia na jego wyjściu.

Uwzględniając ograniczenia wynikające z charakterystyki ogniwa paliwowego dla silnika elektrycznego zostały postawione następujące wymagania:

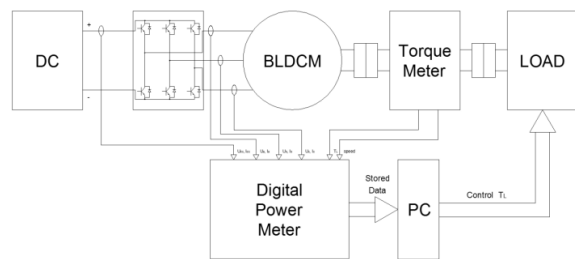
- napięcie zasilające (20÷32)V,
- moc pobierana nie większa niż 200W.

Analiza dostępnych na rynku silników elektrycznych wykazała, że nie ma seryjnie produkowanego silnika, który spełniłby oba postawione warunki. Dlatego też, aby nie przekroczyć wagi, gabarytów i mocy maksymalnej pobieranej przez silnik zdecydowano się, aby wybrać silniki o mniejszym napięciu zasilającym, które można dostosować poprzez układ elektroniczny lub zmianę danych nawojowych silników. Wybrano dwa silniki: AXI 2808/24 oraz Hacker A30/28SV2. Są to porównywalne silniki pod względem gabarytowym. Silniki te powinny być zasilane maksymalnie z trzech ogniw litowo-polimerowych połączonych szeregowo, co daje maksymalne napięcie równe 12,6V. Przy tym napięciu prędkość obrotowa silnika AXI nieobciążonego będzie równa 15000 obr/min i jest nieco wyższa niż w przypadku silnika Hacker. Przy napięciu powyżej 20V, co jest sytuacją typową przy przewidywanym zasilaniu z ogniwa paliwowego prędkość obrotowa wybranych silników musi być

znacząco ograniczana przez układ sterowania. Z tego też względu w jednym z silników (Hacker A30/28SV2) została zwiększona stała napięciowa  $k_v$ . Dzięki temu uzyskano lepsze dopasowanie wymagań prądowo-napięciowych silnika adaptowanego do charakterystyki wyjściowej ogniwa paliwowego.

#### 5. Badania laboratoryjne silników zasilanych ze źródła stabilizowanego

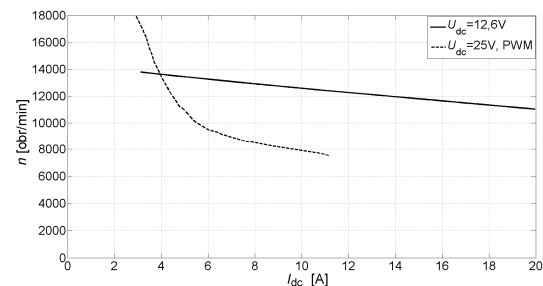
W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania oryginalnego oraz adaptowanego silnika Hacker. Schemat blokowy stanowiska pokazano na rysunku 4.



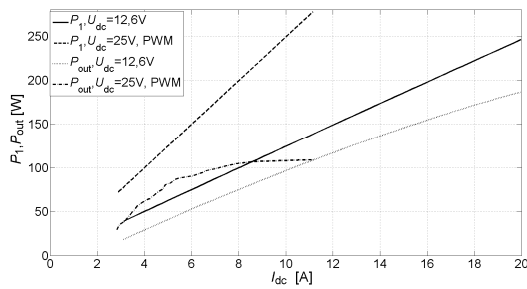
Rys.4. Schemat blokowy stanowiska do wyznaczania charakterystyk ruchowych

Badania oryginalnego silnika Hacker przeprowadzono przy zasilaniu napięciem maksymalnym tj.  $U_{dc}=12,6\text{V}$ . Dodatkowo przeprowadzono badania przy podwyższonym napięciu  $U_{dc}=25\text{V}$  z ograniczeniem prędkości poprzez układ sterowania pracą silnika (sterowanie PWM). W przypadku adoptowanego silnika badania przeprowadzono dla znacznie szerszego zakresu zmiany napięcia zasilającego (15÷31)V ze skokiem co 1V.

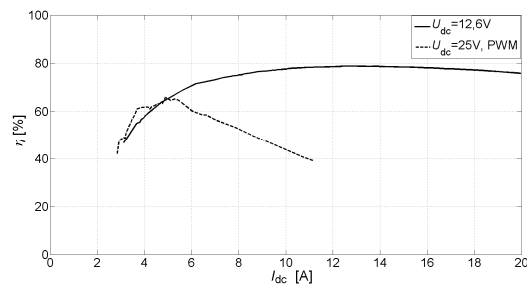
Na rysunkach 5-7 pokazano wyniki badań silnika oryginalnego tj. zależność prędkości obrotowej  $n$  (rys.5), mocy pobieranej  $P_1$  oraz mocy na wale  $P_{out}$  (rys.6) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (rys.7) w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$ .



Rys.5. Zależność prędkości obrotowej  $n$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  dla silnika oryginalnego



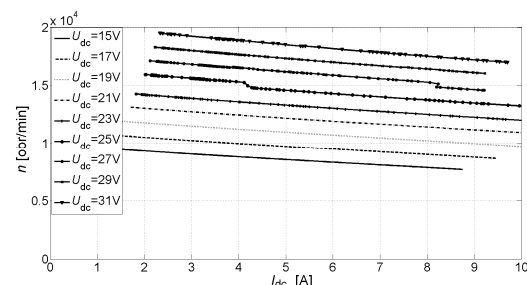
Rys.6. Zależność mocy pobieranej  $P_1$  oraz mocy na wale silnika  $P_{out}$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  dla silnika oryginalnego



Rys.7. Zależność sprawności wypadkowej  $\eta$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  dla silnika oryginalnego

Jak widać z przeprowadzonych badań jednego z oryginalnych silników możliwe będzie ich zastosowanie do napędu małego bezzałogowego aparatu latającego wyposażonego w ogniwo paliwowe, ale kosztem znacznego pogorszenia sprawności przetwarzania energii elektrycznej. Jednak przy zastosowaniu sterowania PWM może okazać się, że moc na wale silnika może być niewystarczająca do zmiany parametrów lotu bezzałogowego aparatu latającego.

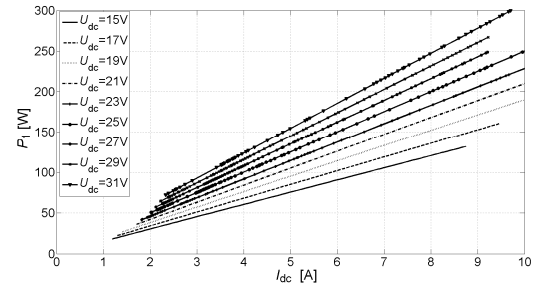
Silnik adaptowany został przebadany dla zakresu zmiany napięć zasilających  $U_{dc}=(15\div 31)V$  ze skokiem napięcia co 1V.



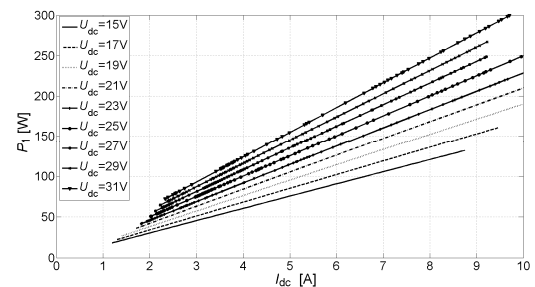
Rys.8. Zależność prędkości obrotowej silnika  $n$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  dla silnika adaptowanego

Na rysunkach 8-11 pokazano wyniki badań silnika adoptowanego tj. zależność prędkości obrotowej  $n$  (rys.8), mocy pobieranej  $P_1$  (rys.9)

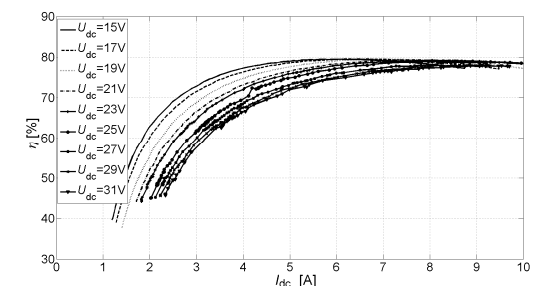
mocy na wale  $P_{out}$  (rys.10) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (rys.11) w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  przy różnych wartościach napięć zasilających  $U_{dc}=\text{var}$ .



Rys.9. Zależność mocy pobieranej  $P_1$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  silnika adaptowanego



Rys.10. Zależność mocy na wale silnika  $P_{out}$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  silnika adaptowanego



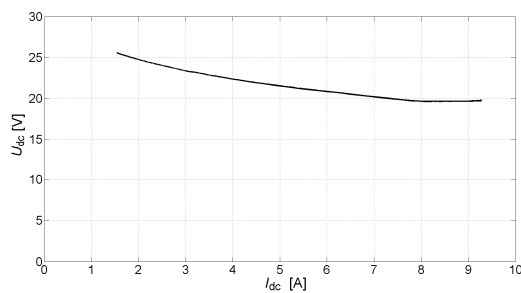
Rys.11. Zależność sprawności wypadkowej  $\eta$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  silnika adaptowanego

Zwiększenie stałej napięciowej w silniku adaptowanym Hacker pozwoliło dopasować zakres napięciowo-prądowy silnika do charakterystyki ogniwa paliwowego. Dzięki temu silnik spełnia postawione wymagania przez układ napędowy bezzałogowego aparatu latającego. Silnik adaptowany będzie posiadał też wyższą sprawność wypadkową. Z tego też względu silnik adaptowany został przebadany po zastąpieniu źródła stabilizowanego ogniwem paliwowym.

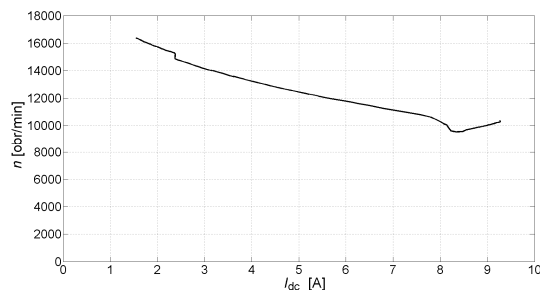
## 6. Badania laboratoryjne silnika adaptowanego zasilanego z ogniwa paliwowego

Do dalszych badań został przewidziany silnik adaptowany. Po zastąpieniu zasilacza stabilizowanego dedykowanym ogniwem paliwowym zostały ponownie wyznaczone charakterystyki silnika.

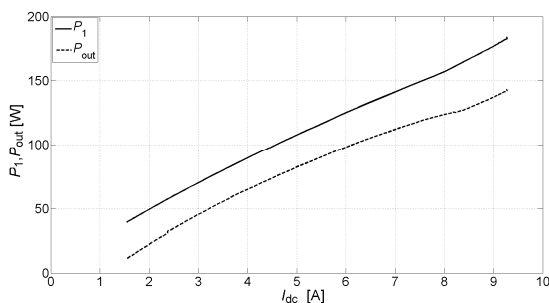
Na rysunku 12 przedstawiono zależność napięcia ogniwa w funkcji prądu pobieranego przez układ napędowy (sterownik + silnik). Można tutaj zauważyć, że napięcie na ogniwie spadło do około 20V.



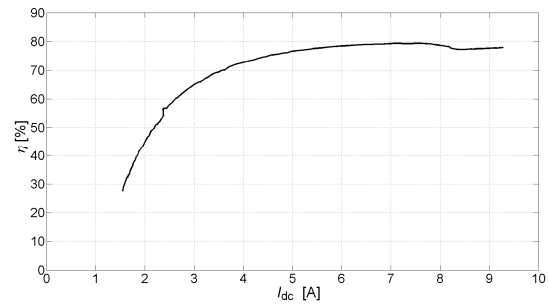
Rys.12. Zależność napięcia zasilającego  $U_{dc}$  silnika adaptowanego w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  przy zasilaniu z ogniwa paliwowego



Rys.13. Zależność prędkości obrotowej  $n$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  silnika adaptowanego zasilanego z ogniwa paliwowego



Rys.14. Zależność mocy pobieranej  $P_1$  oraz mocy na wale silnika  $P_{out}$  w funkcji pobieranego prądu  $I_{dc}$  silnika adaptowanego zasilanego ze ogniwa paliwowego



Rys.15. Zależność sprawności wypadkowej  $\eta$  w funkcji wartości pobieranego prądu  $I_{dc}$  silnika adaptowanego zasilanego z ogniwa paliwowego

Na rysunkach 13-15 pokazano wyniki badań silnika adaptowanego tj. zależność prędkości obrotowej  $n$  (rys.13), mocy pobieranej  $P_1$ , mocy na wale  $P_{out}$  (rys.14) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (rys.16) w funkcji wartości pobieranego prądu  $I_{dc}$ .

Założoną prędkość  $n=11000$  obr/min osiągnięto przy poborze prądu równym 7A. Najwyższą sprawność  $\eta$  wynoszącą około 80% silnik osiąga przy prądzie 7,5A.

## 7. Wnioski

Zastosowanie ogniwa paliwowego dedykowanego do zasilania silnika elektrycznego jest bardzo dobrą alternatywą dla dalszych prac prowadzących do zastąpienia tradycyjnych akumulatorów. Dla efektywnego wykorzystania możliwości ogniwa paliwowego należy dostosować parametry prądowo-napięciowe zasilanego silnika elektrycznego. Pewnym mankamentem jest stosunkowo duża zmienność napięcia wyjściowego ogniwa paliwowego. Można to jednak uwzględnić przy projektowaniu silnika elektrycznego przewidzianego do zasilania z ogniwa paliwowego. Dzięki temu można uzyskać maksymalne wykorzystanie ogniwa paliwowego przy jednoczesnej wysokiej sprawności silnika elektrycznego. Zasilanie napędów elektrycznych z ogniwa paliwowego może być zastosowane również w innych dziedzinach jak np.: napędy pojazdów elektrycznych.

## 6. Literatura

- [1] Lapena-Rey N., Mosquera J., Bataller E., and Orti F.: *Environmentally friendly power sources for aerospace applications*, Journal of Power Sources 181 (2) 2008, pp.353-362.
- [2] Lapena-Rey N., Mosquera J., Bataller E., and Orti F.: *First fuel-cell manned aircraft*, Journal of aircraft, 47 (6) 2010, pp.1825-1835.

[3] Moffitt B. A., Bradley T.H., Parekh D., Mavris D.: *Design and performance validation of a fuel cell unmanned aerial vehicle*, American Institute of Aeronautics and Astronautics

[4] 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

[5] Rhoads G. D., Wagner N. A., Taylor B., Keen D.: *Design and flight test results for a 24 hour fuel cell unmanned aerial vehicle*, 5<sup>th</sup> Annual International Energy Conversion Engineering Conference, AIAA 2010-6690

[6] *Record flight for UAV using Protonex fuel cell system*, Fuel Cells Bulletin December 2009,4

[7] Jadoo fuel cells powers Mako unmanned aerial vehicle, Fuel Cells Bulletin 2009,4

[8] [www.jadoolpower.com](http://www.jadoolpower.com)

[9] Horizon fuel cell technology, [www.hes.sg/](http://www.hes.sg/)  
AEROPAK, Technical data sheet

### Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, [pbogu@prz.edu.pl](mailto:pbogu@prz.edu.pl) \*

dr inż. Mariusz Korkosz, [mkosz@prz.edu.pl](mailto:mkosz@prz.edu.pl) \*

dr inż. Piotr Wygonik, [piowyg@prz.edu.pl](mailto:piowyg@prz.edu.pl) \*\*

Politechnika Rzeszowska

ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

\* Wydział Elektrotechniki i Informatyki

\*\* Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

dr inż. Magdalena Dudek, [potoczek@agh.edu.pl](mailto:potoczek@agh.edu.pl)

mgr inż. Bartłomiej Lis

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Energetyki i Paliw

### Informacje dodatkowe

*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.*

*Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia badań została zakupiona w wyniku realizacji Projektu „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.*

### Recenzent

*Prof. dr hab. inż. Zbigniew Goryca*