

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

KONCEPCJA HYBRYDOWEGO UKŁADU ZASILANIA NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO MOTOSZYBOWCA

THE CONCEPTION OF HYBRID SUPPLY OF ELECTRIC DRIVE OF MOTOR GLIDER

Streszczenie: Motoszybowce są rozwiązaniem pozwalającym częściowo uniezależnić się od typowych problemów występujących podczas lotów szybowcem. Jednak najważniejszą zaletą motoszybowca jest możliwość samodzielnego startu. Takiej możliwości nie posiadają klasyczne szybowce. Zastosowanie silnika elektrycznego napędzającego śmigło daje taką możliwość. Jednak typowym problemem z którym należy się zmierzyć jest dobór pojemności baterii akumulatorów. Autorzy proponują koncepcję zasilania hybrydowego napędu elektrycznego. W koncepcji zasilania hybrydowego przewidziano zastosowanie stosu ogniwi paliwowych jako podstawowego źródła zasilania pozwalającego na utrzymanie motoszybowca na pułapie przelotowym przez określony czas. Bateria akumulatorów pełni rolę bufora który ma dostarczać dodatkową energię podczas startu motoszybowca. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań stosów ogniwi paliwowych przewidzianych do zastosowania w hybrydowym układzie zasilania motoszybowca.

Abstract: The motor gliders are a solution which allow partially eliminating typical problems which occur during flights of classic gliders. Nevertheless, the ability of self-launching is the biggest advantage of the motor gliders and classic gliders don not have such ability. An electric motor which drives a propeller gives such possibility. However, a selection of accumulators capacity is a typical problem which should be tackled. Authors propose the concept of supply method of hybrid electric drive where a fuel cell is used as a primary source of energy which allows maintaining the motor glider on a specified altitude during specified time period. Accumulators are an additional source of energy to deliver missing energy during a motor glider launch. In the paper, chosen results of tests of fuel cells for hybrid supply system of motor glider were presented.

Słowa kluczowe: zasilanie hybrydowe, ogniwo paliwowe, motoszybowiec, napęd elektryczny
Keywords: hybrid supply, fuel cell, motor glider, electric drive

1. Ogólne wymagania stawiane motoszybowcom

Motoszybowce zalicza się do klasy lekkich statków powietrznych. Ich powstanie wynikało z chęci uniezależnienia się od infrastruktury lotniskowej, do której w uproszczeniu zalicza się wyciągarkę (zapewniającą start z wymaganą prędkością) lub samolot umożliwiające start i wyholowanie szybowca na określoną wysokość lotu. Dzięki temu, motoszybowiec jest w stanie wystartować i wykonać przelot nawet ze zwykłego lądowiska, pozbawionego infrastruktury lotniskowej. Dodatkowo, zespół napędowy umożliwia powrót na lotnisko bazowe, lub lądowanie w zaplanowanym miejscu, jak również możliwość poszukiwania tzw. "kominów powietrznych", umożliwiających długotrwałe przebywanie w powietrzu. Ograniczeniem jest tylko pojemność

zasobnika energii (paliwa, akumulatora). Stąd też niezwykła popularność tego typu statków powietrznych w ostatnich latach [1-2]. Motoszybowce wykorzystywane są obecnie nie tylko przez osoby prywatne, ośrodki szkolenia lotniczego ale również przez instytucje w celu realizacji różnego rodzaju zadań: od fotograficznych, przez patrolowe po dozór i kontrolę np. instalacji przesyłowych. Wykorzystuje je nawet straż graniczna w celu kontroli granic państwa.

Zespół napędowy motoszybowca wytwarza ciąg wymagany do uzyskania niezbędnej prędkości lotu (siły nośnej) w sposób pośredni. Oznacza to, że do wytworzenia siły ciągu stosowane jest śmigło, napędzane przez silnik. Zespół napędowy składa się więc ze śmigła, silnika, zasobnika/zasobników energii, instalacji energetycznej. Zespół napędowy

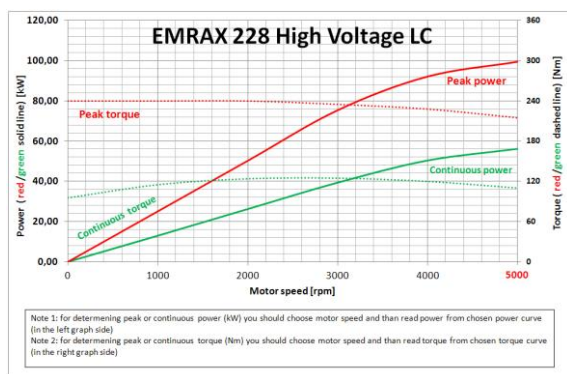
musi spełniać szereg wymagań, charakterystycznych dla napędu lotniczego. Musi charakteryzować go duża moc jednostkowa (czyli zdolność uzyskiwania dużej mocy z kilograma masy układu napędowego, współcześnie wskaźnik ten jest bliski 1), niskie jednostkowe zużycie paliwa/energii, wysoka niezawodność, wysoka podatność eksploatacyjna (niskie koszty obsługi i eksploatacji, prostota obsługi). Dąży się do uzyskania masy jednostkowej (masa zespołu napędowego odniesiona do masy startowej motoszybowca) o wartości z przedziału 0.35...0.5. Moc silników współczesnych motoszybowców mieści się w przedziale 20÷100 kW [3]. To zróżnicowanie mocy wynika z przeznaczenia motoszybowca (jedno, dwu osobowy), a szczególnie od tego na jakie warunki startowe projektowany jest motoszybowiec. Im krótsza ma być droga startu, lub start odbywać ma się z trudnych nawierzchni lotniskowych tym moc pokonania oporów ruchu musi być większa – stąd większa moc napędu. Im lżejszy motoszybowiec i im lepiej przygotowana powierzchnia lotniskowa tym wymogi co do wartości mocy startowej są mniejsze. We współczesnych motoszybowcach stosuje się trzy rodzaje napędów. Pierwsza grupa to zespoły napędowe wykorzystujące silniki spalinowe, napędzające śmigła. Źródłem energii jest paliwo, magazynowane w zbiornikach paliwowych. Wykorzystuje się silniki tłokowe dwu i czterosurowe oraz silniki Wankla (z wirującym tłokiem). Cechą charakterystyczną tych zespołów napędowych jest zbiornik paliwa. Wraz ze wzrostem czasu pracy silnika maleje ilość masy paliwa na pokładzie samolotu, co musi być uwzględnione w bilansie masy samolotu. Drugi rodzaj napędu to silniki elektryczne zasilane z ogniw elektrochemicznych. Wskaźnik mocy silnika do masy całego zespołu napędowego jest mniejszy niż w napędzie spalinowym (ze względu na dużą masę akumulatorów). Ale zespół ten charakteryzuje się stałą masą bez względu na warunki i czas lotu. Wadą jest to, że gęstość energii (stosunek energii możliwy do uzyskania z masy paliwa lub akumulatora) zgromadzonej w akumulatorach jest mniejsza niż tej zawartej w paliwie, co oznacza, że zasięg motoszybowca z silnikiem spalinowym jest większy niż motoszybowca z akumulatorami elektrochemicznymi. Trzecia grupa napędów to napędy hybrydowe. Stosuje się klasyczne

połączenia silnika elektrycznego i spalinowego w układzie równoległym i dwa zasobniki energii właściwe dla każdego silnika. Z tym, że śmigło napędzane jest bezpośrednio przez silnik elektryczny, silnik spalinowy wykorzystywany jest tylko w fazie startu, albo do doładowania akumulatorów, o ile przewidziano odpowiedni zapas paliwa na realizację takiego stanu pracy. Druga grupa napędów hybrydowych to wykorzystanie silnika elektrycznego, który może być zasilany z klasycznego akumulatora elektrochemicznego oraz z ogniwa paliwowego OP (wodorowego). Oba te źródła mogą być wykorzystywane niezależnie lub jednocześnie np. w warunkach zwiększonego zapotrzebowania na moc w czasie startu. Zaletą napędu hybrydowego jest jego funkcjonalność, która ma bardzo duże znaczenie w lotnictwie. Polega ona na możliwości wykorzystania dzielonego źródła mocy (np. możliwość wykonywania lotu poziomego tylko z wykorzystaniem ogniwa paliwowego) lub zasilania zamiennie w momencie np. awarii któregoś z zespołów lub braku energii w którymś ze źródeł. Dzięki temu wzrasta poziom bezpieczeństwa realizowanego zadania lotniczego. Pilot motoszybowca ma możliwość nie tylko wykonania startu silnikowego, ale także (nawet w warunkach awarii zespołu napędowego) bezpiecznego wylądowania w wybranym miejscu, nie stwarzając zagrożenia dla samolotu i otoczenia. Można to zrealizować albo poprzez wykorzystanie działającego źródła zasilania (akumulator lub ogniwo wodorowe) albo wykorzystanie silnika spalinowego lub elektrycznego w przypadku hybrydy elektryczno-spalinowej [4]. Wadą rozwiązań hybrydowych jest stosunkowo duża masa, skomplikowana architektura konstrukcyjna i złożony układ sterowania. W układzie wykorzystującym ogniwa wodorowe problemem jest również brak przepisów lotniczych w zakresie zastosowań wodoru w instalacjach samolotów (szczególnie tankowanie na lotnisku). Wadą jest też fakt, że zespoły napędowe (hybrydowe) mają moc jednostkową mniejszą niż napędy spalinowe. Jednakże z analizy rynku motoszybowców wynika, że to funkcjonalność ma dzisiaj większe znaczenie niż dążenie do uzyskania małej masy. Czynnikiem, który pozwala zwiększyć masę zespołu napędowego jest stosowanie do budowy struktury płatowca

ultral lekkich i jednocześnie bardzo wytrzymałych materiałów kompozytowych. Motoszybowiec, do którego projektowany jest napęd hybrydowy ma masę startową około 700 kg. Motoszybowiec w czasie startu z prędkością poziomą $V_p=1.5$ m/s, ma osiągnąć wysokość 400 m w czasie 5 min. Do zrealizowania tego fragmentu misji lotniczej wymagana jest źródło zasilania o mocy 40 kW. W trakcie ustalonego silnikowego lotu poziomego (przewiduje się na potrzeby projektu czas tej fazy lotu około 1 h) wymagana jest źródło zasilania o mocy 10 kW.

2. Koncepcja zasilania hybrydowego

Zapotrzebowanie na moc elektryczną w pierwszej fazie lotu wynosi 40 kW natomiast po osiągnięciu pułapu przelotowego zapotrzebowanie to zmniejsza się do około 10 kW. W układzie napędowym przewidziano zastosowanie bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi ERMAX 228 w wariantcie wysokonapięciowym [5].

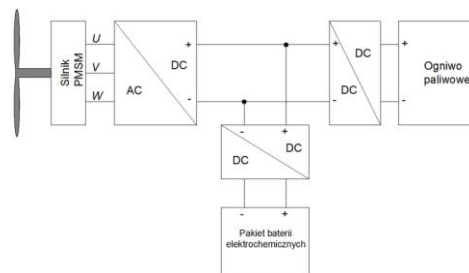


Rys.1. Zależność momentu i mocy silnika od prędkości obrotowej [5]

Na rysunku 1 pokazano zależność momentu i mocy w funkcji prędkości obrotowej wyznaczone przy napięciu zasilającym 600 V.

Przewiduje się pracę silnika w zakresie zmiany prędkości obrotowej od 1500 do 2000 obr/min.

Do zasilania napędu śmigła przewidziano zastosowanie dwóch źródeł energii elektrycznej tj. klasycznych akumulatorów elektrochemicznych oraz wodorowych ogniw paliwowych [6-14]. Takie podejście ma na celu wydłużenie czasu lotu motoszybowca. Schemat blokowy koncepcyjnego hybrydowego układu zasilania silnika elektrycznego pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Schemat blokowy koncepcyjnego układu hybrydowego zasilania napędu elektrycznego

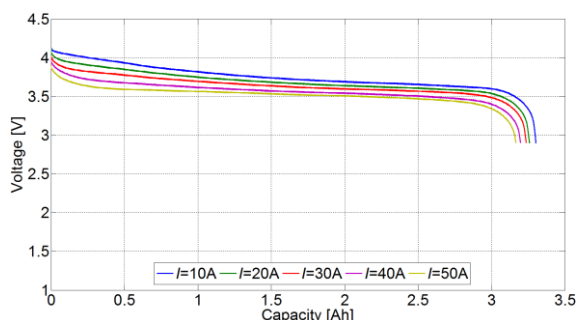
Ze względu na dużą zmienność napięć wyjściowych zarówno pakietu ogniw paliwowych jak i baterii akumulatorów, zaistniała konieczność zastosowania przetwornic DC/DC stabilizujących napięcie zasilające falownik silnika napędowego (AC/DC) na określonym poziomie. Na schemacie można zauważyć dwie przetwornice DC/DC, które są niezbędne do poprawnego działania hybrydowego systemu zasilania. Przy projektowaniu systemu zasilania przyjęto wariant w którym ogniwo paliwowe ma zapewnić pokrycie potrzeb wynikających z lotu poziomego wynoszące około 10 kW. Pozostała moc tj. 30 kW będzie zgromadzona w pakiecie baterii elektrochemicznych. Założono, że pakiet baterii akumulatorów będzie pracował podczas startu motoszybowca, ewentualnie w przypadku awarii pakietu ogniw paliwowych (OP).

3. Źródła zasilania hybrydowego

3.1. Akumulatory elektrochemiczne

Zgodnie z obserwowanym trendem nieodłącznym elementem systemu zasilania motoszybowca są akumulatory elektrochemiczne. Jest sprawą bezdyskusyjną, że akumulatory zastosowane w motoszybowcu muszą mieć możliwie wysoką gęstość energetyczną. Zaletą akumulatorów elektrochemicznych w odróżnieniu od stosów ogniw paliwowych jest to, że energia może być z nich pobierana w sposób natychmiastowy, wadą natomiast jest ich niska gęstość energii. Akumulatory elektrochemiczne w całym systemie zasilania stanowią bufor, zapewniający ciągłość zasilania elektrycznego silnika napędowego w chwilach rozruchu stosu ogniw paliwowych lub w razie jego awarii. W proponowanym rozwiązaniu są również dodatkowym źródłem energii elektrycznej wykorzystywanym w fazie wznoszenia motoszybowca. Obecnie z dostępnych na rynku akumulatorów elektrochemicznych najlepszymi

parametrami charakteryzują się ogniwa litowo-polimerowe, których energia właściwa dochodzi do 200 Wh/kg. Napięcie znamionowe pojedynczego ogniwa wynosi 3.7 V. W stanie pełnego naładowania napięcie spoczynkowe tego ogniwa wynosi 4.2 V, a w stanie pełnego rozładowania 2.9 V. Ogólną zasadą przyjętą przy eksploatacji akumulatorów elektrochemicznych jest, to że nie powinny być rozładowywane do samego końca oraz nie powinny być przeladowywane, gdyż grozi to pogorszeniem ich parametrów, a nawet uszkodzeniem. W proponowanym rozwiązaniu przyjęto, że akumulatory elektrochemiczne nie powinny być rozładowane do poziomu większego niż 20 % nominalnej pojemności. Na Rys. 3 przedstawiono charakterystyki pojedynczego ogniwa litowo-polimerowego o pojemności 3.3 Ah i napięciu znamionowym 3.7 V wyznaczone dla różnych prądów obciążenia.



Rys.3. Charakterystyki ogniwa litowo-polimerowego

3.2. Stos ogniw paliwowych

Założenia przyjęte do badania modułu ogniw paliwowych (OP) PEMFC o mocy znamionowej 10 kW są następujące:

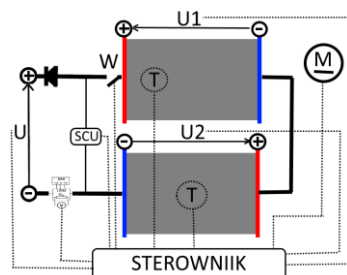
- 1) Maksymalne napięcie generatora energii elektrycznej z ogniwami PEMFC bez obciążenia, tj. 200÷240 V.
- 2) Punkt mocy maksymalnej modułu OP P_{max} znajduje się w zakresie napięć $U=100\div140$ V oraz natężenia prądu $I_{max}=100\div120$ A.
- 3) Budowa modułowa : szeregowe połączenie dwóch stosów PEMFC o mocy $P=5$ kW. Do budowy modułu zostaną użyte stosy OP PEMFC zbudowane w układzie otwartej katody (ang. open cathode polymer membrane fuel cell, PEMFC).
- 4) W celu umożliwienia współpracy stosów ogniw paliwowych w układzie źródła prądowego z pozostałymi elementami hybrydowego układu zasilania dla

elektrycznego silnika napędzającego motoszybowiec zdecydowano się na elektryczne połączenie szeregowe dwóch stosów OP. Podyktowane było to głównie wymaganiami przetwornicy DC/DC co do wartości wymaganego napięcia (powyżej 100 V) tak aby dławik wykorzystany do jej budowy miała jak najmniejszą masę. Konstrukcja modułu OP PEMFC będzie składała się z dwóch identycznych stosów PEMFC, zbudowany z 120 pojedynczych ogniw polimerowych PEMFC. W przypadku takiego rozwiązania możliwa jest łatwa detekcja uszkodzenia elementów stosu, i wymiana elementu w danym stosie PEMFC. W tabeli 1 zebrano parametry elektryczne stosów ogniw paliwowych o mocy 5kW użytych do budowy modułu ogniw PEMFC o mocy 10kW+ deklarowane przez producenta.

Tabela 1. Przewidywane parametry elektryczne stosu ogniw paliwowych

Parametr	Jednostka	Przewidywana wartość
Napięcie stosu ogniw przy otwartym obwodzie (OCV)	V	220÷240
Moc znamionowa	kW	10
Napięcie przy mocy znamionowej	V	144
Prąd przy mocy znamionowej	A	70

Konfigurację stosu ogniw pokazano na rysunku 4.



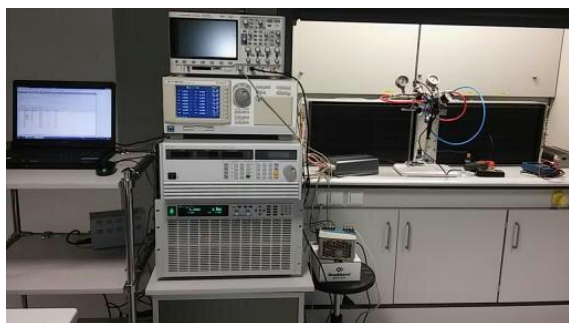
Rys.4. Konfiguracja elektryczna modułu ogniw paliwowych o mocy 10 kW

4. Badania laboratoryjne stosu ogniw paliwowych

4.1. Stanowisko pomiarowe

Do weryfikacji parametrów ogniw paliwowych w zakresie charakterystyk statycznych oraz

dynamicznych zostało zestawione stanowisko badawcze. Widok stanowiska badawczego pokazano na rysunku 5.

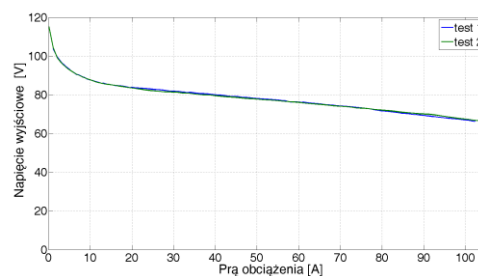


Rys.5. Stanowisko do badania ogniw paliwowych

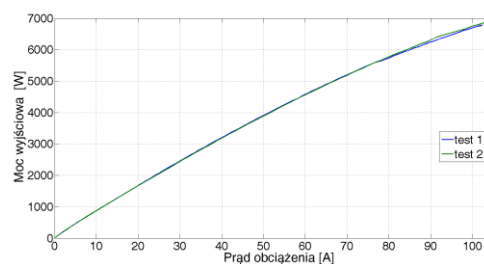
Do pomiaru parametrów elektrycznych badanych stosów ogniw paliwowych zastosowano analizator mocy WT1600. Przebiegi czasowe w stanach dynamicznych rejestrowano za pomocą czterokanałowego oscyloskopu cyfrowego. Do obciążenia ogniw paliwowych zostały wykorzystane dwa programowalne obciążenia elektroniczne połączone równolegle skonfigurowane do trybu pracy stałoprądowej.

4.2. Charakterystyki napięciowo-prądowe badanych stosów ogniw paliwowych

W układzie hybrydowego zasilania dla uzyskania wymaganej mocy zastosowano dwa identyczne stosy OP o mocy 5 kW. W warunkach laboratoryjnych zostały przeprowadzone testy obciążeniowe każdego ze stosów OP (oznaczonego jako A i B) osobno oraz przy połączeniu szeregowym przewidzianym do zastosowania w układzie hybrydowego zasilania. W trakcie każdego testu kilkakrotnie powtarzano zmienność obciążenia od 0 do około 130 % mocy znamionowej deklarowanej przez producenta. Na rysunkach 6 i 7 pokazano zależność napięcia wyjściowego U_{dc} (rys.6) oraz mocy wyjściowej P_{dc} (rys.7) w funkcji prądu wyjściowego I_{dc} stosu OP PEMFC „A” uzyskanych w trakcie dwóch testów.

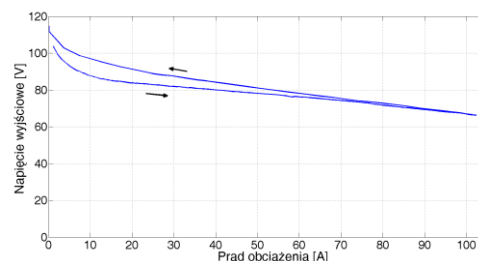


Rys.6. Zależność napięcia wyjściowego stosu OP PEMFC „A” w funkcji prądu obciążenia

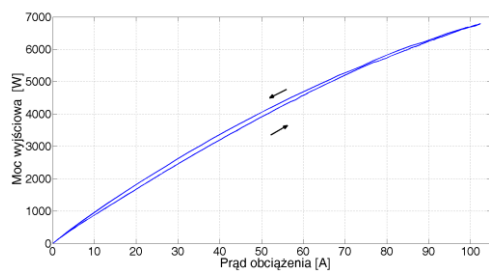


Rys.7. Zależność mocy wyjściowej stosu OP PEMFC „A” w funkcji prądu obciążenia

Przeprowadzone testy wykazały, że stos OP posiada powtarzalne parametry w zakresie pracy z mocą nie większą niż 5 kW. Przy pracy z mocą większą niż 5 kW zauważalne są niewielkie różnice. Stos OP w teście 2 w zakresie przeciążenia uzyskało nieznacznie większą moc wyjściową. Identyczne wyniki uzyskano dla Stosu OP oznaczonego jako „B”. Zmiana temperatury pracy stosu OP, stopnia nawilżenia membrany wpływa w pewnym stopniu na zmianę uzyskiwanych wartości mocy wyjściowej przy szybkich zmianach obciążenia. Na rysunkach 8-9 pokazano wyniki testu podczas którego stos OP został obciążony od 0 do mocy wyjściowej około 6.8 kW a następnie powoli zmniejszono obciążenie do 0.



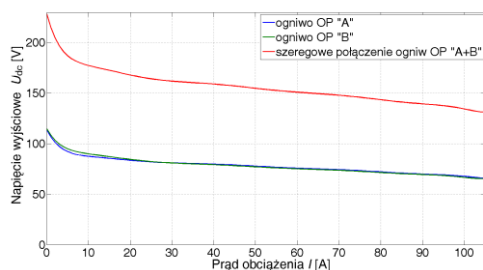
Rys.8. Zależność napięcia wyjściowego stosu OP „A” w funkcji prądu obciążenia wyznaczona podczas dociążenia i odciążenia stosu OP.



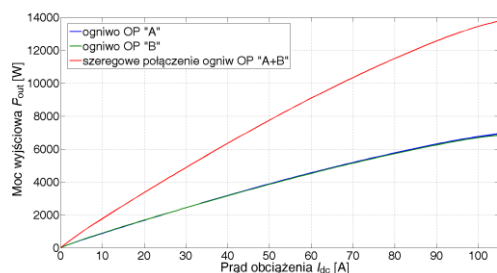
Rys.9. Zależność mocy wyjściowej stosu OP „A” w funkcji prądu obciążenia wyznaczona podczas dociążenia i odciążenia stosu OP.

Przy zmniejszaniu obciążenia (rys.8) zauważalna jest przy tej samej wartości prądu większa wartość napięcia wyjściowego badanego ogniwa. W konsekwencji uzyskuje się nieco większą moc wyjściową stosu OP przy zmniejszaniu obciążenia.

Po testach każdego ze stosów OP osobno zostały one skonfigurowane elektrycznie do pracy szeregowej. Przeprowadzono test obciążenia modułu dwóch stosów OP połączonych szeregowo dokonując pomiaru nie tylko napięcia wyjściowego sumarycznego, ale również na każdym ze stosów OP. Na rysunkach 10-11 pokazano uzyskane wyniki badań.



Rys.10. Zależność napięcia wyjściowego stosu OP „A”, „B” oraz „A+B” w funkcji prądu obciążenia

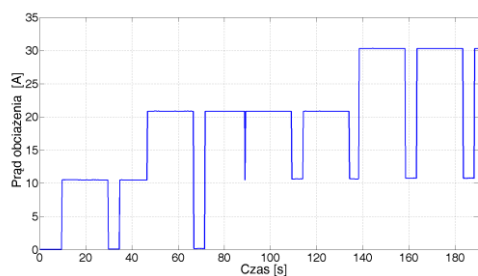


Rys.11. Zależność mocy wyjściowej stosu OP „A”, „B” oraz „A+B” w funkcji prądu obciążenia

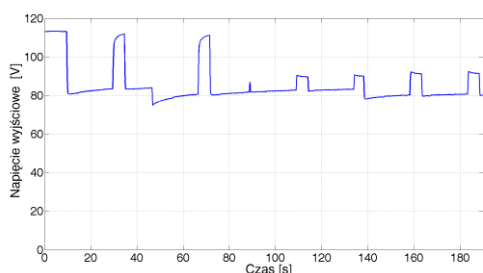
Napięcie modułu OP połączonych szeregowo bez obciążenia wynosi około 240V (rys. 10). Po obciążeniu pakietu wymaganą moc wynoszącą 10 kW napięcie zmniejsza się do wartości 148 V. Przy obciążeniu modułu OP mocą wynoszącą 13.4 kW napięcie zmniejsza się do wartości 134 V. W zakresie niewielkich obciążeń występuje niewielka dysproporcja w charakterystykach napięciowo-prądowych stosów OP pracujących w konfiguracji szeregowej. W układzie docelowym nie przewiduje się obciążania modułu OP mocą większą niż 12 kW. Należy jednak zauważyć, że do zapewnienia poprawnej pracy modułu OP wymagane jest zasilanie układu chłodzenia, sterowników oraz elektrozaworów instalacji wodorowej. Ze względów bezpieczeństwa wskazane jest zasilanie tych elementów z odrębnego źródła zasilania. Przy pracy stosów OPh połączonych szeregowo ważna jest precyzyjna kontrola ciśnienia wodoru w instalacji zasilającej. Spadek ciśnienia wodoru skutkuje zauważalnym spadkiem mocy wyjściowej mogącym doprowadzić do zatrzymania pracy ogniw paliwowych. W przypadku połączenia szeregowego zatrzymanie pracy jednego ze stosów OP powoduje automatyczne wyłączenie całego modułu OP.

4.3. Stany dynamiczne badanych stosów OP

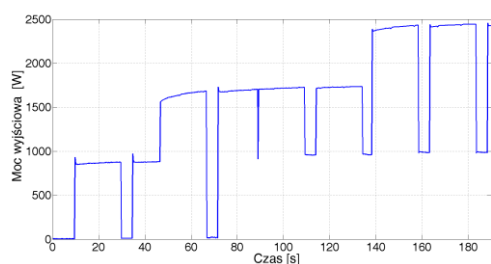
W przypadku lotu motoszybowca mogą występować sytuacje w których występuje gwałtowny wzrost zapotrzebowania na moc pobieraną ze źródła zasilającego wywołaną np. silnym podmuchem wiatru. W trakcie lotu na pułapie przelotowym głównym źródłem zasilania dla układu napędowego motoszybowca będzie moduł OP. W warunkach laboratoryjnych testowano zachowanie się stosu OP przy skokowej zmianie prądu obciążenia. Na rysunkach 12-14 pokazano przebiegi czasowe prądu obciążenia (rys.12), napięcia wyjściowego (rys.13) oraz mocy wyjściowej (rys.14) stosu OP. Testy dynamicznego obciążania przeprowadzono dla stosu OP oznaczonego „B”.



Rys. 12. Zależność prądu wyjściowego stosu OP „B” w funkcji czasu przy skokowej zmianie obciążenia



Rys. 13. Zależność napięcia wyjściowego stosu OP „B” w funkcji czasu przy skokowej zmianie obciążenia.



Rys. 14. Zależność mocy wyjściowej stosu OP „B” w funkcji czasu przy skokowej zmianie obciążenia

W stanach dynamicznej zmiany prądu obciążenia stosu OP zachowanie się ogniwa należy uznać za prawidłowe. Skokowej zmianie prądu obciążenia odpowiada spadek napięcia oraz wzrost mocy pobieranej ze stosu OP. Dodatkowo na rysunku 13 - 14 zauważalny jest wzrost odpowiednio napięcia i mocy wraz z kolejnymi impulsami obciążenia prądowego co zapewne wynika z samonawilżania się membrany polimerowej wodą będącą produktem reakcji elektrochemicznej zachodzącej w ogniwie paliwowym.

5. Wnioski

W publikacji analizowano koncepcję hybrydowego układu zasilania do napędu elektrycznego przeznaczonego do

motoszybowca. Jednym z istotniejszych elementów hybrydowego układów zasilania napędu elektrycznego jest moduł ogniwa paliwowych. W analizowanym przypadku przewidziano zastosowanie dwóch stosów ogniwa paliwowych połączonych szeregowo. Stosy ogniwa paliwowych mają zapewnić energię elektryczną wymaganą do realizowania misji motoszybowca na pułapie przelotowym. Badania laboratoryjne potwierdzają, że stosy OP mogą pracować długotrwale z mocą wyjściową wynoszącą 10 kW. Jednocześnie w warunkach laboratoryjnych uzyskano moc maksymalną modułu OP wynoszącą 13 kW. Możliwe jest zatem krótkotrwale ich przeciążenie. O czasie trwania przeciążenia decyduje dopuszczalny przyrost temperatury poszczególnych cel ogniwa paliwowych. Istotny jest zatem sposób chłodzenia stosów ogniwa paliwowych. Informacja o temperaturze stosu ogniwa paliwowego jest bardzo istotna dla sterownika. Wzrost temperatury stosu ogniwa do wartości dopuszczalnej (max, 65 °C) musi skutkować redukcją mocy wyjściowej. W krytycznej sytuacji może dojść do chwilowego wyłączenia stosu OP. W przypadku połączenia szeregowego ogniwa paliwowych spadek wydajności jednego z ogniwa lub też jego całkowite wyłączenie prowadzi do całkowitego zatrzymania pracy całego stosu ogniwa paliwowych. Do czasu ponownego uruchomienia stosu ogniwa paliwowych układ napędowy musi być zasilany z pakietu akumulatorów.

6. Literatura

- [1]. A. Ablamowicz, W. Nowakowski: „Podstawy Aerodynamiki i Mechaniki Lotu”, WKiŁ, Warszawa 1980.
- [2]. J. Jędrzejewski „Próby w locie samolotów lekkich”, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2001.
- [3]. M. Saarlans: “Aircraft Performance”, John Wiley & Sons, INC, Hoboken New Jersey USA, 2007;
- [4]. A. Khajepour, S. Fallah, A. Goodarzi: Electric and Hybrid Vehicles; John Wiley & Sons LTD, Chichester, West Sussex United Kingdom, 2014.
- [5]. www.enstroj.si/Electric-products/emrax-228-motorsgen.html
- [6]. A. K. Gautam; S. P. Singh; J. P. Pandey; T. N. Shukla, “Performance investigation of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) drive supplied from hybrid sources”, 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), pp.292-302, 2016 .

- [7]. J. Jia, Y. T. Cham, W. K. Au "A review of PEM Fuel Cells", World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2005), Singapore, 2005.
- [8]. J. Larminie, A. Dicks, "Fuel cell systems explained", 2nd ed. *John Wiley and Sons Ltd.*
- [9]. Jennifer Bauman, Mehrdad Kazerani, "A Comparative study of Fuel Cell Battery, Fuel Cell Ultra-capacitor, and Fuel Cell Battery Ultracapacitor vehicles," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 57, no 2, pp. 760-769, March 2008.
- [10]. A. Khaligh, A. M. Rahimi, Y. J. Lee, J. Cao, A. Emadi, S. D. Andrews, C. Robinson and C. Finnerty, "Digital control of an isolated active hybrid fuel cell/Li-ion battery power supply," *IEEE Transaction on Vehicular Technology* vol. 56, no. 6, pp. 3709-3721, 2007.
- [11]. P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 806-814, 2006.
- [12]. K. Xin, A. M. Khambadkone, "Dynamic modeling of fuel cell with power electronic current and performance analysis", *IEEE Trans. On Power Electronic and Drive System, PEDS-2003, The 5th International Conference*, vol. 1, 17-20 pp. 607-612, 2003.
- [13]. J. M. Lee, B. H. Cho, "A Dynamic Model of a PEM Fuel Cell System", *Applied Power Electronic Conference and Exposition, 24th Annual IEEE*, pp. 720-724, 2009
- [14]. A. Kirubakaran, Shailendra Jain, R. K. Nema, "The PEM Fuel Cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, No. 3, pp. 157-161, May 2009.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz^{*}, pbogu@prz.edu.pl
 dr hab. inż. Mariusz Korkosz^{*}, mkosz@prz.edu.pl
 dr inż. Piotr Wygonik^{**}, piowyg@prz.edu.pl
 dr hab. inż. Magdalena Dudek^{***}, potoczek@agh.edu.pl
 dr inż. Andrzej Raźniak^{***}, razniak@agh.edu.pl
 mgr inż. Bartłomiej Lis^{***}, blis@agh.edu.pl

^{*}Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
^{**}Politechnika Rzeszowska
 Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
 ul. Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
^{***}Akademia Górniczo-Hutnicza
 Wydział Energetyki i Paliw
 ul. A. Mickiewicza 30, 30-001 Kraków

Informacje dodatkowe

Badania finansowane z projektu badawczego „Napęd hybrydowy wykorzystujący ogniwa paliwowe lekkiego statku powietrznego, umowa NCBiR PBS3/A6/24/2015”. Część badań została wykonana w ramach infrastruktury Centrum Energetyki AGH