

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop, Piotr Wygonik
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

BADANIA LABORATORYJNE OGNIW ELEKTRYCZNYCH PRZEZNACZONYCH DO ZASTOSOWANIA W NAPĘDZIE HYBRYDOWYM BEZZAŁOGOWEGO APARATU LATAJĄCEGO

LABORATORY TESTS OF ELECTRIC CELLS FOR USE IN UNMANNED AERIAL VEHICLE HYBRID DRIVE

Abstract: The paper discusses the design and operation of a parallel hybrid drive designed for the use in unmanned aerial vehicles. An analysis of accumulator batteries selection designed for the drive was made. There were presented the tests results of the different types of accumulators carried out by the authors on a test stand. Based on the results obtained there was chosen the correct type of battery pack.

1. Wstęp

Napędy lotnicze, zarówno w przypadku dużych samolotów, jak i małych modeli latających, bazują głównie na silnikach spalinowych. W modelarstwie oraz w prototypowych małych samolotach bezzałogowych, stosowane są także napędy elektryczne, jako alternatywa dla silnika spalinowego. W ostatnich latach rozpoczęto badania nad możliwością zastosowania napędów hybrydowych, szczególnie w bezzałogowych modelach latających – BAL [1]. 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 maszyna spalinowa i elektryczna, lotniczy napęd hybrydowy można podzielić na: szeregowy, równoległy lub mieszany [2]. W układzie szeregowym silnik spalinowy napędza generator, który razem z baterią akumulatorów zasila silnik elektryczny napędzający śmigło. Rozwiązanie takie ma mniejszą sprawność niż układ 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 analiza doboru systemu zasilania elektrycznego dla równoległego napędu hybrydowego bezzałogowego aparatu latającego. W pracy przedstawiono:

- ogólną charakterystykę pracy równoległego napędu hybrydowego przeznaczonego do bezzałogowego aparatu latającego,
- analizę doboru baterii akumulatorów zasilających,
- wyniki testów różnych typów akumulatorów możliwych do zastosowania w BAL.

2. Napęd hybrydowy równoległy bezzałogowego aparatu latającego

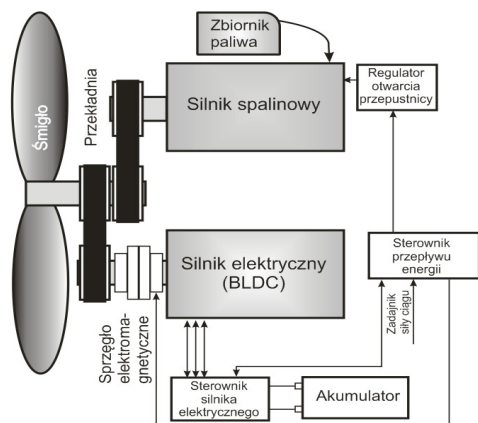
2.1. Struktura równoległego napędu hybrydowego

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy równoległego napędu hybrydowego przeznaczonego do bezzałogowego aparatu latającego. W napędzie tym na wale wyjściowym moce obu silników, spalinowego i elektrycznego się sumują. Pracę równoległego napędu hybrydowego w bezzałogowym aparacie latającym można podzielić na:

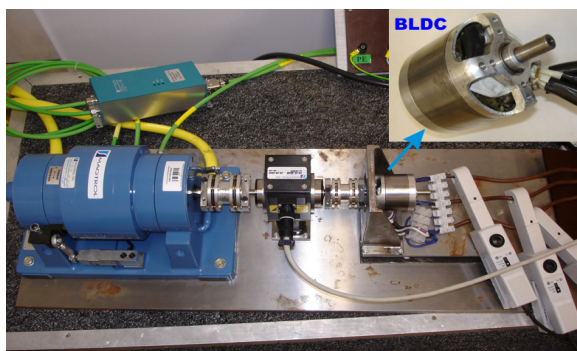
- fazę wznoszenia,
- fazę przelotu,
- fazę lądowania.

W fazie wznoszenia jednocześnie pracują z pełną mocą obydwie silniki, tj. spalinowy i elektryczny przekazując sumę mocy na wał śmigła. W fazie przelotu BAL przemieszcza się na ustalonej wysokości ze stałą prędkością. Wówczas silnik spalinowy pokrywa całe zapotrzebowanie na moc. Natomiast w fazie lądowania zapotrzebowanie na moc jest niewielkie, a tym samym prędkość obrotowa śmigła w zależności od potrzeby może być różna. Na rysunku 2 przedstawiono stanowisko badawcze dla silnika

BLDC zaprojektowanego i wykonanego dla bezzałogowego aparatu latającego [3].



Rys. 1. Schemat blokowy lotniczego układu hybrydowego



Rys. 2. Stanowisko badawcze skonstruowanego i wykonanego silnika BLDC

2.2. Założenia energetyczne pracy napędu

Celem odpowiedniego zbilansowania energii w rozpatrywanym bezzałogowym aparacie latającym przyjęto, że:

- silnik spalinowy dostarczy moc potrzebną do zapewnienia odpowiedniej prędkości przelotu BAL-a oraz doładowania akumulatorów,
- moc silnika elektrycznego będzie równa 80% mocy silnika spalinowego,
- napięciowy zakres pracy akumulatorów powinien mieścić się w granicach od 24V do 34V, przy maksymalnych prądach pobieranych odpowiednio od 24 do 42A,
- czas pracy w pełni obciążonej baterii akumulatorów powinien wystarczyć na około 4 minuty wznoszenia BAL-a,
- bateria akumulatorów nie powinna zostać rozładowana w stopniu większym niż 80% jej pojemności znamionowej, celem zapewnienia zasilania aparatury pokładowej i siłowników sterujących BAL-a.

W niniejszym napędzie przyjęto, że silnik spalinowy będzie osiągał moc ciągłą równą 1kW, a silnik elektryczny moc wyjściową równą 800W.

2.3. Algorytm pracy napędu

Dla pracy napędu w fazie wznoszenia założono, że zbiornik paliwa jest pełny i bateria akumulatorów jest w pełni naładowana. W celu ograniczenia wagi napędu, pojemność baterii akumulatorów powinna być tak dobrana, aby 80% energii w niej zgromadzonej wystarczyła na czas wznoszenia BAL-a. Pozostałe 20% jest zarezerwowane do zasilania awioniki. Podczas fazy wznoszenia silniki: spalinowy i elektryczny, mają pracować z pełną mocą. Suma mocy z obu silników ma być przekazywana na śmigło. W fazie przelotu, gdy ustalona jest wysokość lotu moc z silnika spalinowego będzie dostarczana na śmigło i do maszyny elektrycznej (pracującej jako prądnica). Energia wytwarzana przez maszynę elektryczną będzie magazynowana w akumulatorach. Zapewni to zasilanie awioniki w dłuższym okresie czasu, a także umożliwi dodatkowo (w razie potrzeby) zwiększenie pułapu lotu (z wykorzystaniem dwóch silników). Ponadto dociążenie silnika spalinowego generatorem elektrycznym ładującym baterie akumulatorów przesunie punkt pracy silnika spalinowego, tak aby pracował z maksymalną sprawnością. W celu poprawnego procesu ładowania akumulatorów wymagany jest układ stabilizacji prądu i napięcia ładowania akumulatora. Układ sterowania będzie miał możliwość przerywania procesu ładowania akumulatorów i w razie potrzeby przełączenie maszyny elektrycznej w stan pracy silnikowej.

W fazie lądowania ze względu na małe zapotrzebowanie na moc silnik elektryczny jest odłączony, a silnik spalinowy pracuje praktycznie na wolnych obrotach. Dlatego też w tym stanie pracy nie przewiduje się ładowania baterii akumulatorów.

2.4. Dobór pojemności akumulatorów

Po wstępnych badaniach zaprojektowanego napędu elektrycznego z silnikiem BLDC [3] określono, że moc pobierana ze źródła zasilania przez napęd pracujący w warunkach znamionowych wynosi 920W. Zakładając, że napięcie na baterii akumulatorów, może zmieniać się w granicach od 34V do 24V, to prądy pobierane

ze źródła przy założonej mocy, będą odpowiednio wynosić 27A i 38,3A.

Jeśli przyjąć, że napęd pobierałby maksymalny prąd 38,3A przez wymagane 4 minuty lotu, to pojemność akumulatora zasilającego powinna wynosić 2,56Ah. Uwzględniając dodatkowe zapotrzebowanie na energię zasilającą system nawigacji i sterowania zgodnie z założeniem wstępnym, należy doliczyć jeszcze 20% obliczonej pojemności. W efekcie minimalna pojemność akumulatora powinna być nie mniejsza niż 3,072Ah.

Najbliższą standardową pojemnością większości typów akumulatorów jest 3,3Ah.

Na podstawie przeglądu dostępnych na rynku baterii akumulatorów oraz analizy teoretycznej ich właściwości, proces projektowania systemu zasilania rozpoczęto od wyznaczenia rzeczywistych charakterystyk wybranych baterii akumulatorów na specjalnie opracowanym i zbudowanym do tego celu stanowisku pomiarowym.

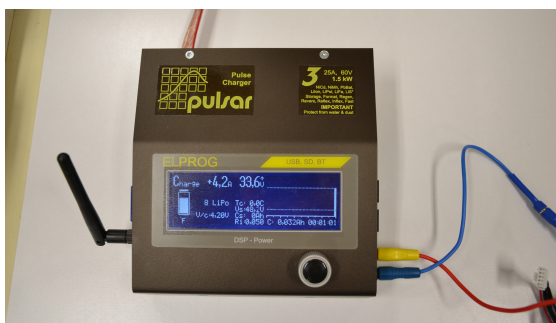
3. Badania akumulatorów

3.1. Stanowisko badawcze

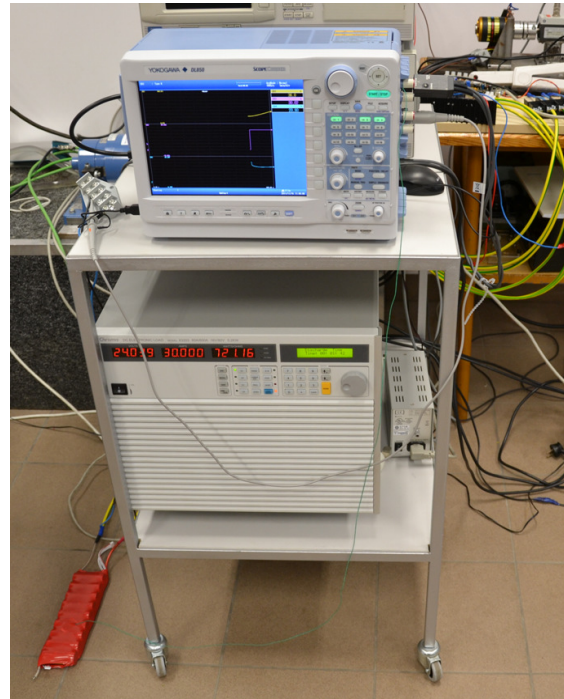
Do badań parametrów akumulatorów przeznaczonych do zastosowań w BAL zestawiono stanowisko badawcze składające się z:

- uniwersalnej ładowarki akumulatorów (rys.3),
- rejestratora oscyloskopowego (rys.4),
- programowalnego obciążenia prądu stałego (rys.4).

Rejestrator oscyloskopowy umożliwi rejestrację prądu, napięcia oraz temperatury badanych akumulatorów. Natomiast programowalne obciążenie umożliwia: obciążenie akumulatora stałym prądem, stałą mocą, stałą rezystancją, pracą ze stałym napięciem lub obciążenie wg zaprogramowanej charakterystyki. Widok stanowiska badawczego akumulatorów przedstawiono na rysunku 4.



Rys.3. Uniwersalna ładowarka akumulatorów



Rys.4. Stanowisko badawcze do rozładowywania akumulatorów

3.2. Wyniki badań

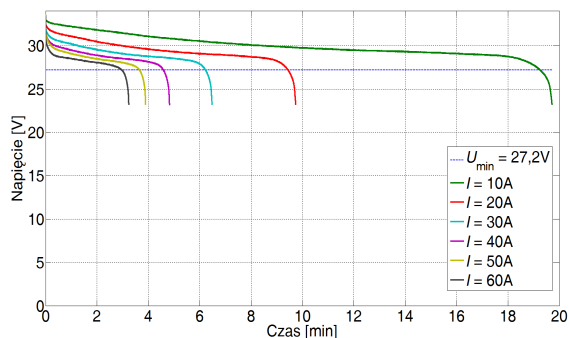
Do badań laboratoryjnych wytypowano trzy rodzaje baterii akumulatorów:

- litowo-polimerowe (LiPO),
- litowo-żelazowo-polimerowe (LiFePO4)
- niklowo-wodorkowe (NI-MH).

Ogniwa LiPO

Bateria akumulatorów litowo-polimerowych przeznaczona do badań, składała się z ośmiu szeregowo połączonych ogniw LiPO o napięciu znamionowym 3,7V i pojemności $C=3,3Ah$. Producent zaleca, aby prąd ładowania akumulatorów nie przekraczał 6C, a rozładowania 25C. Temperatura pracy nie powinna przekroczyć 60°C. Pakiet akumulatorów przeznaczonych do badań ważył 715g.

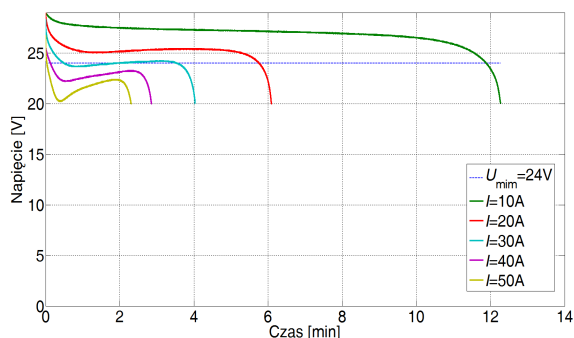
Badania przeprowadzono rozładowując akumulator stałą wartością prądu w zakresie od 10A do 60A z krokiem, co 10A. W wyniku badań otrzymano rodzinę charakterystyk wyjściowych w funkcji czasu (rys.5). Z rysunku 5 wynika, że przy obciążeniu akumulatora prądem 40A w sposób ciągły, badany akumulator może pracować przez około cztery i pół minuty. Linia przerywaną zaznaczono minimalną wartość napięcia baterii akumulatorów zalecaną przez producenta, tj. 27,2V.



Rys.5. Charakterystyki rozładowania ogniwa LiPO o pojemności znamionowej 3,3Ah w funkcji czasu

Ogniwa LiFePO4

Badana bateria akumulatorów LiFePO4 składała się z dziewięciu ogniw o napięciu znamionowym 3,3V i pojemności $C=2,3Ah$. Niestety dla tego typu ogniw trudno znaleźć pojemność 3,3Ah. Jednak ze względu na właściwości akumulatorów LiFePO4, autorzy zdecydowali się przebadaną baterię o pojemności 2,3 Ah. Producent ogniw dopuszcza, aby prąd szybkiego ładowania nie przekraczał wartości 10C, a ciąglego rozładowania 30C. Napięcie znamionowe całego pakietu wynosiło 29,7V. Waga pakietu wynosiła 707g. Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki przebiegu napięcia w funkcji czasu dla prądów obciążenia od 10 A do 50 A z krokiem, co 10 A.



Rys.6. Charakterystyki rozładowania ogniwa LiFePO4 o pojemności znamionowej 2,3Ah w funkcji czasu

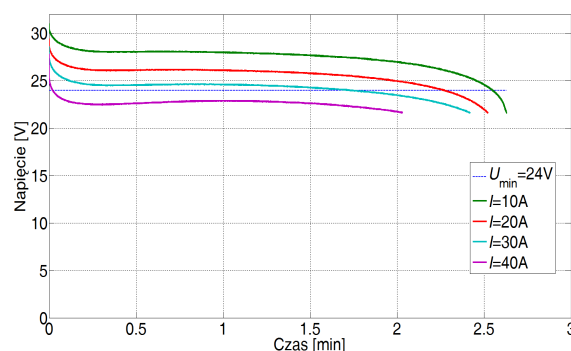
Z przedstawionych na rysunku 6 przebiegów napięcia rozładowania akumulatora wynika, że przy obciążeniu baterii prądem 40A, czas pracy akumulatora wynosi niecałe 3 minuty. Ponadto już przy prądzie obciążenia 30A napięcie oscyluje w granicach 24V. W porównaniu do badanych ogniw LiPO czas pracy ogniw LiFePO4 jest krótszy, co jest zjawiskiem zrozumiałym, gdyż pojemność ogniw LiFePO4 jest

około 1/3 razy mniejsza niż pojemność badanych LiPO. Drugim niekorzystnym zjawiskiem jest występowanie dużego spadku napięcia na rezystancji wewnętrznej akumulatora, co powoduje, że napięcie wyjściowe przy obciążeniu prądem 40A spada do wartości prawie 22V. Jest to niedopuszczalne, ponieważ silnik elektryczny nie będzie mógł przy takim prądzie (tj. 40A) i napięciu (22 V) osiągnąć żądanej wartości mocy (tj. 800W na wale silnika).

Ogniwa NiMH

Badana bateria akumulatorów NiMH składała się z 24 ogniw o pojemności 3,3Ah i napięciu znamionowym 1,2V (każde ogniwo). Napięcie znamionowe całego pakietu wynosiło 28,8V. Waga pakietu wynosiła 1367 g i była prawie dwukrotnie większa niż badanych akumulatorów LiPO, czy LiFePO4. Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki przebiegu napięcia akumulatora w funkcji czasu dla prądów obciążenia od 10 do 40 A z krokiem, co 10 A. Z przedstawionych na rysunku 7 charakterystyk można stwierdzić, że badane akumulatory NiMH wykazywały się znacznie mniejszą pojemnością niż znamionowa, a tym samym krótkim czasem pracy.

Ponadto akumulatory NiMH wraz ze zwiększeniem prądu obciążenia wykazywały się znaczącym spadkiem pojemności. Duża rezystancja wewnętrzna badanych akumulatorów powoduje, że napięcie wyjściowe przy obciążeniu prądem 40A jest prawie w całym zakresie pracy mniejsze od 24V.



Rys. 7. Charakterystyki rozładowania ogniwa NiMH o pojemności znamionowej 3,3Ah w funkcji czasu

4. Wnioski

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry badanych baterii akumulatorów.

Tabela 1. Porównanie badanych baterii

	C [Ah]	Liczba ogniw w pakiecie	U_N [V]	Masa pakietu [g]
LiPO	3,3	8	29,6	715
LiFePO4	2,3	9	29,7	707
NiMH	3,3	24	28,8	1367

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej wybranych rodzajów akumulatorów można stwierdzić, że:

- Najmniej odpowiednimi ogniwami dla zastosowań w BAL, są ogniwa ołowiowe, ze względu na ich duży ciężar, małą sprawność oraz stosunkowo niskie napięcie pracy. Wadą tego typu ogniw jest również silny spadek pojemności w zakresie ujemnych temperatur. Te cechy akumulatorów ołowiowych zadecydowały o rezygnacji z ich badań.

- Najlepszymi ogniwami dla zastosowań w BAL są ogniwa litowo-polimerowe, które charakteryzują się: najmniejszą (spośród rozpatrywanych) masą, najwyższym napięciem pracy oraz najmniejszą stratą pojemności w ujemnych temperaturach. Ponadto badane ogniwa cechowała mała rezystancja wewnętrzna, co powodowało, że nawet przy obciążeniu prądem 60A nie przekroczyły dopuszczalnej temperatury pracy.

- Ze względu na duże prądy ładowania i rozładowania oraz bezpieczeństwo w eksploatacji należy również rozważyć zastosowanie ogniw litowo-żelazowo-polimerowych. Jednak dostępna standardowa pojemność 2,3Ah była niewystarczająca do zastosowań w BAL.

- Zaletą akumulatorów niklowo-wodorkowych w porównaniu do akumulatorów litowych jest ich niska cena i „przyjazność” dla środowiska naturalnego. Jednak niskie napięcie pracy i mała gęstość energii powodują, że akumulatory tego typu nie nadają się do zastosowań w BAL. Ponadto badany pakiet akumulatorów NiMH charakteryzował się dużą rezystancją wewnętrzną i już przy prądzie obciążenia równym 30A nie spełniał wymaganych kryteriów.

5. Literatura

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

[3]. P. Bogusz, M. Korkosz, A. Mazurkiewicz, J. Prokop: *Badania symulacyjne silnika BLDC przeznaczonego do napędu hybrydowego bezzałogowego aparatu latającego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 93/2011, str. 32-35.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego NR10 0026 06.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania i aparatury zakupionych 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. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl *

dr inż. Piotr Wygonik piowyg@prz.edu.pl **

Politechnika Rzeszowska

ul. Powstańców Warszawy 12

35-959 Rzeszów

* Wydział Elektrotechniki i Informatyki

** Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa