

Piotr SZYMAK^{a)}, Rafał JANUSZKO^{b)}

^{a)}Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia

^{b)}3 Flotyła Okrętów, Dywizjon Okrętów Podwodnych, ul. Rondo Bitwy pod Oliwą, 81-103 Gdynia

Wykorzystanie ogniwa paliwowego z membraną polimerową do zasilania pojazdu nawodnego

Streszczenie: Niestabilne ceny ropy naftowej, czy też aspekty ekologiczne związane z redukcją emisji dwutlenku węgla do atmosfery przyczyniły się do poszukiwań nowych źródeł energii. Jedną z technologii nowych źródeł energii elektrycznej, gwałtownie rozwijających się w ostatnim czasie są ogniwa paliwowe, m.in. z membraną polimerową, charakteryzujące się wysoką gęstością energetyczną oraz sprawnością w porównaniu do klasycznych źródeł energii elektrycznej, czyli akumulatorów. Z uwagi na ekologiczną, efektywną i cichą pracę technologia ta znajduje zastosowanie w wielu różnych urządzeniach.

W niniejszym artykule zajęto się problemem zastosowania technologii ogniw paliwowych z membraną polimerową PEMFC (ang. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) do zasilania elektrycznego bezzałogowego pojazdu nawodnego BPN w zastosowaniach militarnych. W ramach zrealizowanej pracy opracowano scenariusze misji rozpoznawczej dla BPN, opracowano symulator systemu zasilania BPN, bazujący na ogniwach paliwowych oraz przeprowadzono testy numeryczne.

Słowa kluczowe: bezzałogowy pojazd nawodny, ogniwo paliwowe PEM.

USING FUEL CELL WITH POLYMER MEMBRANE TO POWER SUPPLY OF SURFACE VEHICLE

Abstract: Unstable oil prices, or ecological aspects associated with the reduction of carbon dioxide emissions to the atmosphere, have contributed to the search for new sources of energy. One of the technologies of new sources of electricity, rapidly developing in recent years are fuel cells, among others with a polymer membrane, characterized by high energy density and efficiency compared to conventional sources of electricity, i.e. batteries. Due to its ecological, efficient and quiet operation, this technology is used in many different devices.

This article deals with the use of the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) fuel cell technology for the electrical supply of unmanned surface vehicle USV in military applications. As part of the work carried out, scenarios of reconnaissance missions were developed for USV, USV fuel cell simulator was developed, and numerical tests were performed.

Keywords: unmanned surface vehicle, PEM fuel cell.

1. WPROWADZENIE

W przypadku zastosowania BPN w misjach militarnych istotna jest minimalizacja generowanych pól fizycznych, w tym również generowanego hałasu. Jednym z sposobów minimalizacji hałasu generowanego przez BPN jest zastąpienie silnika spalinowego silnikiem elektrycznym. W tym przypadku istotny staje się problem magazynowania energii elektrycznej. Rozwiązaniem proponowanym w niniejszym artykule jest wykorzy-

stanie systemu wodorowego ogniwa paliwowego z membraną polimerową, charakteryzującego się masową gęstością energetyczną 3-4 razy większą niż oferują najnowsze baterie polimerowe.

Bezzałogowy pojazd nawodny może być wykorzystywany w różnych misjach. W niniejszym artykule rozpatruje się misję rozpoznawczą. Natomiast jako obiekt badań przyjmuje się BPN Edredon (Rys. 1), zrealizowany przez konsorcjum naukowo-przemysłowe, którego liderem była Akademia Marynarki Wojennej [4].



Rys. 1. BPNEdredon [4]

Fig. 1. USV Edredon [4]

Bazując na danych zawartych na stronie producenta napędów elektrycznych dla jednostek pływających [1] można stwierdzić, że do napędzania jednostki o zbliżonej ładowności i wymiarach do BPN Edredon, do jego poruszania się z prędkością nie większą niż 15 węzłów wystarczający będzie silnik elektryczny o mocy 25kW. W tym przypadku należy mieć na uwadze, iż z powodu odmiennej charakterystyki pracy silnika elektrycznego, również pędnik współpracujący z silnikiem musi mieć inną charakterystykę oraz kształty niż stosowany w przypadku napędu spalinowego. Bazując na wynikach raportu [5], proponuje się zastosowanie do zasilania bezzałogowego pojazdu nawodnego systemu zasilania, opartego na ogniwie paliwowym LT PEM (ang. Low Temperature Proton Exchange Membrane).

W zależności od rodzaju misji, BPN porusza się z różnymi prędkościami, nieprzekraczającymi 15 węzłów. Do wygenerowania wymaganej

mocy wykorzystano głównie ogniwa paliwowe LT PEM – 2 stopy o mocy 6kW, oraz połączone równolegle do nich akumulatory litowo-polimerowe o pojemności 7,5kWh, wykorzystywane w przypadku chwilowego zapotrzebowania na moc większą niż jest w stanie wygenerować system ogniwa paliwowego [3]. Przy zastosowaniu ogniw paliwowych, czas pracy systemu zależy głównie od pojemności zbiorników z paliwem (wodorem) potrzebnym do wytwarzania energii, a nie od pojemności baterii, jak ma to miejsce w przypadku akumulatorów. Pobór mocy zależy od intensywności wykorzystania poszczególnych odbiorników elektrycznych wykorzystanych w danej misji, z czego najbardziej energochłonny jest napęd.

W kolejnym rozdziale przedstawiono zapotrzebowanie energetyczne systemu napędowego BPN oraz sensorów i urządzeń zamontowanych na jego pokładzie w trakcie realizacji misji rozpoznawczej. Następnie zaprezentowano symulator

hybrydowego systemu zasilania BPN zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink. W dalszej części artykułu zaprezentowano wybrane wyniki badań numerycznych systemu zasilania BPN podczas realizacji misji rozpoznawczej. W podsumowaniu artykułu przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań oraz zawarto plan przyszłych badań.

2. ZAPOTRZEBOWANIE ENERGETYCZNE W TRAKCIE MISJI ROZPOZNAWCZEJ

W bezałogowym pojeździe nawodnym podzespoły elektryczne można podzielić na pięć grup:

1. system napędowy,
2. system nawigacyjny wraz ze zdalnym sterowaniem,
3. system śledzenia i zobrazowania pozycji pojazdu na akwenu wodnym,
4. system obserwacji,
5. system łączności.

W skład systemu napędowego wchodzi urządzenie pozwalające przemieszczać się jednostce. W tym przypadku do poruszania się BPN zastosowano silnik elektryczny o maksymalnej mocy 25kW, który jest głównym odbiornikiem energii wytwarzanej przez ogniwa paliwowe. Ponadto, dla potrzeb precyzyjnego pozycjonowania w czasie prowadzenia misji przeciwinnowej dodano ster strumieniowy Lewmar 110 TT o mocy 1,5kW, umiejscowiony w dziobowej części pojazdu. Należy podkreślić, iż aktualna wersja BPN Edredon napędzana jest silnikiem spalinowym i nie posiada steru strumieniowego.

Pozostałe odbiorniki energii elektrycznej zamontowane na pokładzie BPN to: odbiornik GPS, transponder AIS, kompas elektroniczny, autopilot, ploter, log, mapa elektroniczna, sonda, radar (z ARPA), system śledzenia i zobrazowania pozycji, system zdalnego sterowania, kamery sprzężone z laserowym miernikiem odległości, kamery termowizyjnej FLIR, trzech kamer dziennych oraz panoramiczna kamera do obserwacji okrężnej [4].



Rys. 2. Trasa misji rozpoznawczej BPN

Fig. 2. Route of reconnaissance mission USV

Misja rozpoznawcza (Rys. 2) bezzałogowego pojazdu nawodnego będzie realizowana w następujących 3 fazach: dojście do obiektu, rejestracja zadanych sygnałów, powrót do bazy. Pierwsza faza tej misji poprzedzona będzie krótkim, trwającym pięć minut przygotowaniem BPN do misji, uruchomieniem oraz sprawdzeniem systemów znajdujących się na pokładzie jednostki. Pierwsza faza misji rozpoznania polegała będzie na możliwie jak najszybszym podejściu do obiektu wyznaczonego w misji. Przyjęto, że pierwsza faza misji zaczyna się w porcie wojennym w Gdyni (punkt „A”) i trwa do określonego miejsca na półwyspie helskim (punkt „B”), gdzie misja zmieni swój charakter na bardziej skryty. Pojazd będzie poruszał się ze średnią prędkością 15 węzłów na odległości 14 Mm, co powinno mu zająć 55 minut. Druga faza będzie polegała przede wszystkim na skrytym podejściu do obiektu, lub rejonu rozpoznania, znajdującym się na półwyspie

helskim, między punktami oznaczonymi literami „B” i „C”. Głównym celem tej fazy misji jest zebranie niezbędnych danych i ich bieżące wysyłanie w celu analizy. Przewidywany czas trwania drugiej fazy misji to 1 godzina. Zakłada się, że w tym czasie pojazd porusza się ze średnią prędkością 2 węzłów, co daje możliwość na uzupełnienie ubytków energii z uwagi na małe zapotrzebowanie energetyczne z układu napędowego. Po zebraniu i przesłaniu zadanych danych rozpoznawczych i, rozpoczyna się trzecia faza. W ostatniej fazie misji BPN Edredon ma za zadanie możliwie jak najszybciej oddalić się z miejsca wykonywania zadania („C” do „A”). Odległość do pokonania w tej fazie wynosi 18 Mm i pojazd poruszając się ze średnią prędkością 15 węzłów powinien pokonać tą odległość w czasie 1 godziny i 12 minut.

W tabeli 1 zobrazowano zużycie energii w poszczególnych fazach misji dla poszczególnych odbiorników energii elektrycznej.

Tabela 1. Zapotrzebowanie energetyczne BPN Edredon w misji rozpoznawczej
Table 1. Power requirement for BPN Edredon in reconnaissance mission

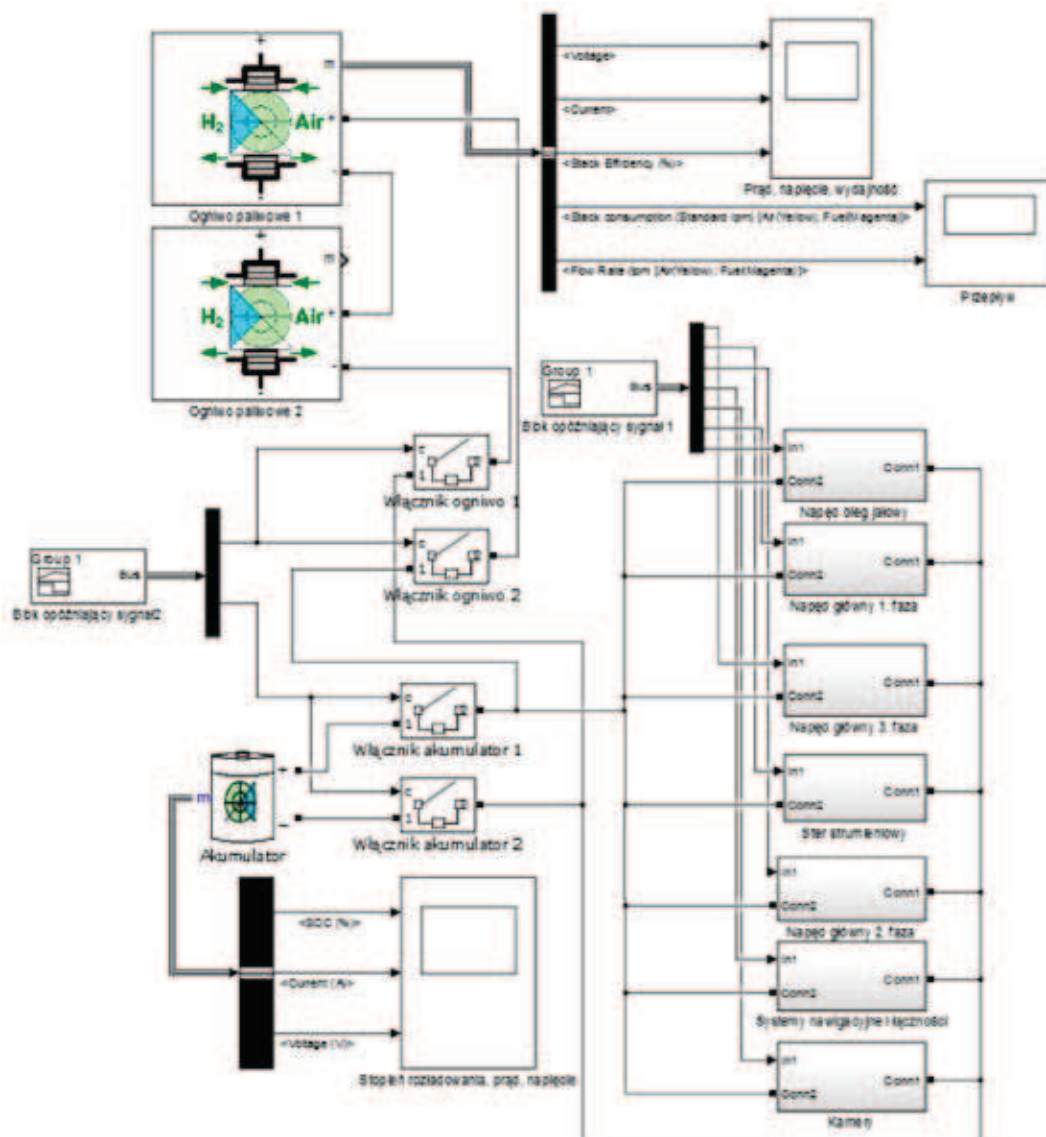
Lp.	Urządzenie	Pobór mocy w 1 fazie misji [W]	Pobór mocy w 2 fazie misji [W]	Pobór mocy w 3 fazie misji [W]
1.1.	Napęd główny	16000	2000	16000
1.2.	Ster strumieniowy Lewmar	0	1000	0
2.1.	Radar FR-8065	127,2	127,2	127,2
2.2..	Odbiornik GPS GP-150	10	10	10
2.3..	EchosondaNavNet 3D	35	35	35
3.1.	Transponder AIS FA-150	90	90	90
3.2.	Log Dopplerowski DS.-60	100	100	100
3.3.	Stacja pogodowa WS-150WX	0,5	0,5	0,5
4.1.	Kamera termowizyjna Flir	25	25	25
4.2.	3xkamera dzienna CAM100	6	6	6
5.1.	Radiostacja MF/HF SSB	120	120	120
5.2.	FM-4721 radiotelefon VHF	40	40	40
5.3.	Moduł łączn. satel. Hughes 9450	35	35	35
	Razem	16588,7	3588,7	16588,7

3. SYMULATOR SYSTEMU ZASILANIA BPN

Symulator systemu zasilania BPN został zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink [2]. Symulator zawiera badane źródła zasilania: polimerowe ogniwo paliwowe i baterię akumulatorów oraz odbiorniki energii zainstalowane na BPN Edredon (Rys. 3). W celu zasymulowania zakładanego zasięgu dla BPN Edredon połączono ze sobą równolegle dwa stopy ogniwa paliwowego o mocy 6 kW każde oraz akumulatory o pojemności 7,5 kWh.

Dla potrzeb badań, układ wyposażono w wirtualne przyrządy rejestrujące odpowiednie parametry elektryczne i fizyczne takie, jak: poziom rozładowania akumulatora, przepływ i zużycie gazów reakcyjnych.

Symulator umożliwia testowanie pracy hybrydowego systemu zasilania BPN, opartego na ogniwach paliwowych oraz akumulatorach w różnych misjach. Dzięki niemu istnieje możliwość zasilania odbiorników, korzystając jedynie z akumulatorów lub z ogniwa paliwowego, jak również z pracujących równolegle akumulatorów i ogniw paliwowych.



Rys. 3. Symulator systemu zasilania BPN zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink
Fig. 3. Simulator of USV power supply system implemented in Matlab/Simulink

4. BADANIA SYMULACYJNE

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg sygnałów sterujących pracą poszczególnych odbiorników energii w różnych etapach misji rozpoznawczej. Wszystkie urządzenia zainstalowane na BPN poza napędem głównym i sterem strumieniowym działają w sposób ciągły i pobierają stałą wartość energii przez cały okres wykonywania misji. Napęd główny i ster strumieniowy pracują według zaprogramowanego wcześniej algorytmu przedstawionego na poniższym rysunku.

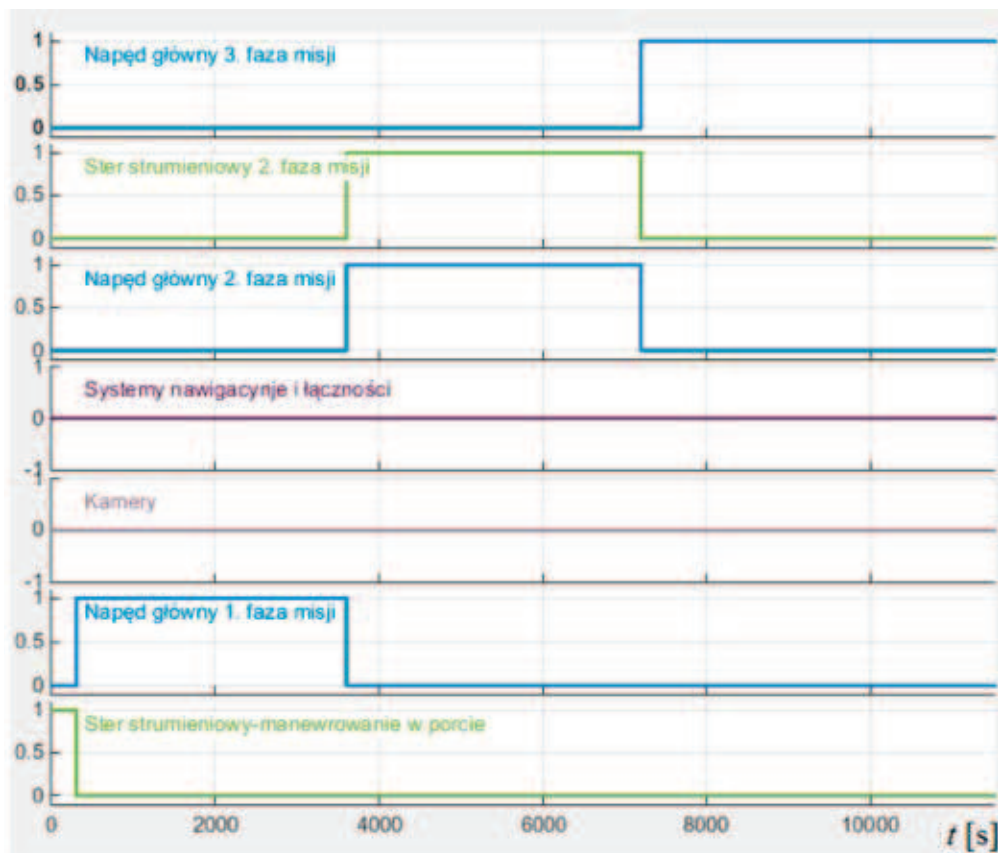
Symulację można podzielić na cztery etapy. Na rysunku 5 zilustrowano pracę akumulatora, natomiast na rysunku 6 pracę ogniwa paliwowego w trakcie całej misji rozpoznawczej.

W pierwszym etapie symulacji następuje rozruch BPN, w tym uruchamianie mikroprocesorowego systemu sterowania BPN Edredon,

diagnozowanie napędu głównego, steru strumieniowego, systemów znajdujących się na jednostce oraz manewr odcumowywania jednostki od nabrzeża. Etap pierwszy trwa 300 s i w tym czasie pojazd pracuje ze średnim obciążeniem ok. 1000 W, pobierając w tym czasie energię jedynie z akumulatorów. Ogniwa paliwowe zostają włączone automatycznie po pięciu minutach i pozostają uruchomione do końca misji.

W przypadku zastosowania BPN w misjach militarnych istotna jest minimalizacja generowanych pól fizycznych, w tym również generowanego hałasu.

Drugi etap rozpoczyna się w momencie uruchomienia systemu ogniwo paliwowych współpracujących z akumulatorami. Dla ułatwienia przyjęto, że po upływie 300 s koniecznych na sprawdzenie systemu i odcumowanie jednostki, zapotrzebowanie pojazdu na energię jest stałe



Rys. 4. Sygnały sterujące pracą poszczególnych odbiorników energii w różnych etapach misji rozpoznawczej

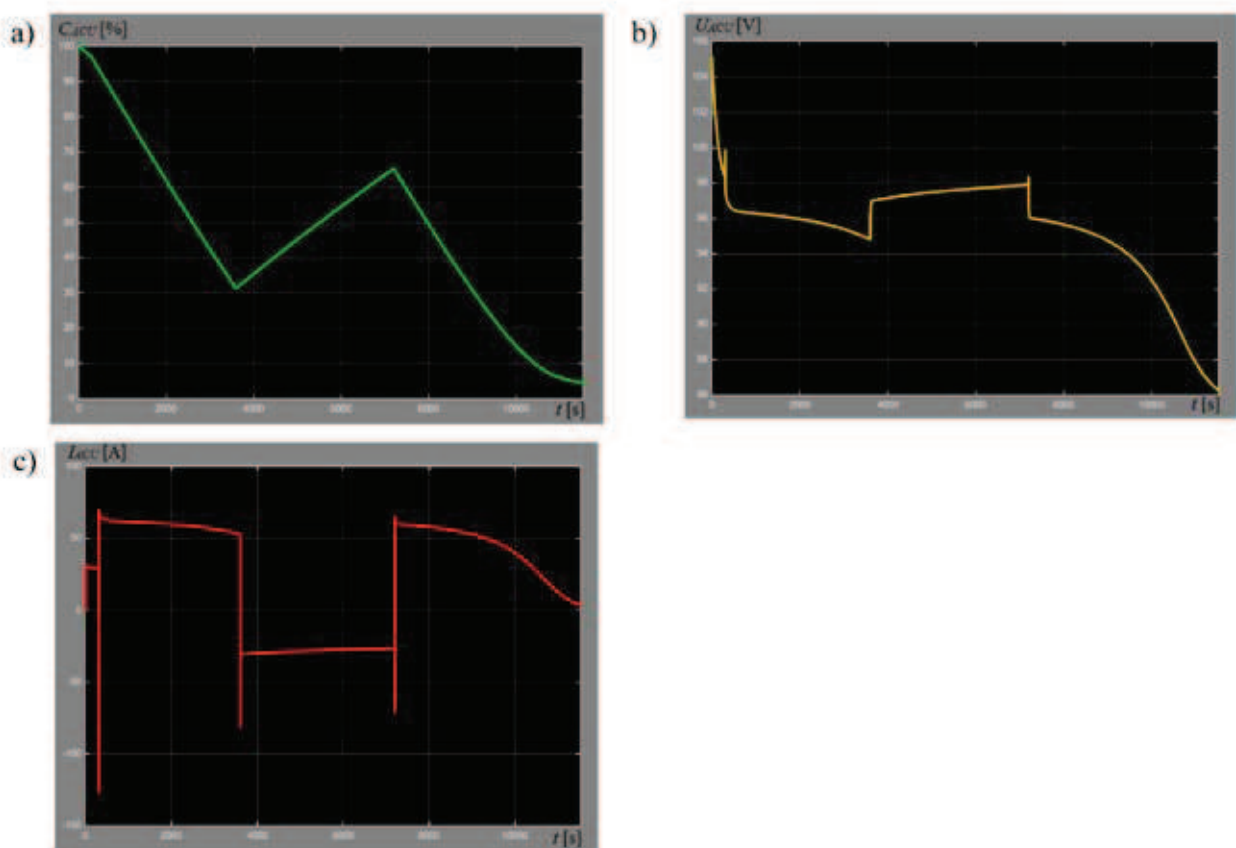
Fig. 4. Signals controlling the work of individual electric loads in different phases of reconnaissance mission

dla danego etapu misji. Z rysunku 5 wynika, że od 300 s do ok. 3800 s misji system zarządzania energią BPN sterował tak, aby pobór prądu następował zarówno z akumulatorów, jak i ogniw paliwowych, pracujących równolegle. W tym okresie widoczny jest spadek poziomu naładowania akumulatorów, przedstawiony na rysunku. 5a oraz stopniowy spadek natężenia prądu i napięcia przedstawiony na rysunkach 5b i c. W tym samym czasie system ogniwa paliwowego pracuje z wydajnością 59 %, podając prąd jedynie na odbiorniki zainstalowane na BPN.

W trzecim etapie, po spadku poziomu naładowania akumulatorów do wartości 30 %, system sterowania zwiększa wydajność systemu ogniw paliwowych (Rys. 6a), zwiększając generowaną przez nie moc, w celu doładowania akumulatoro-

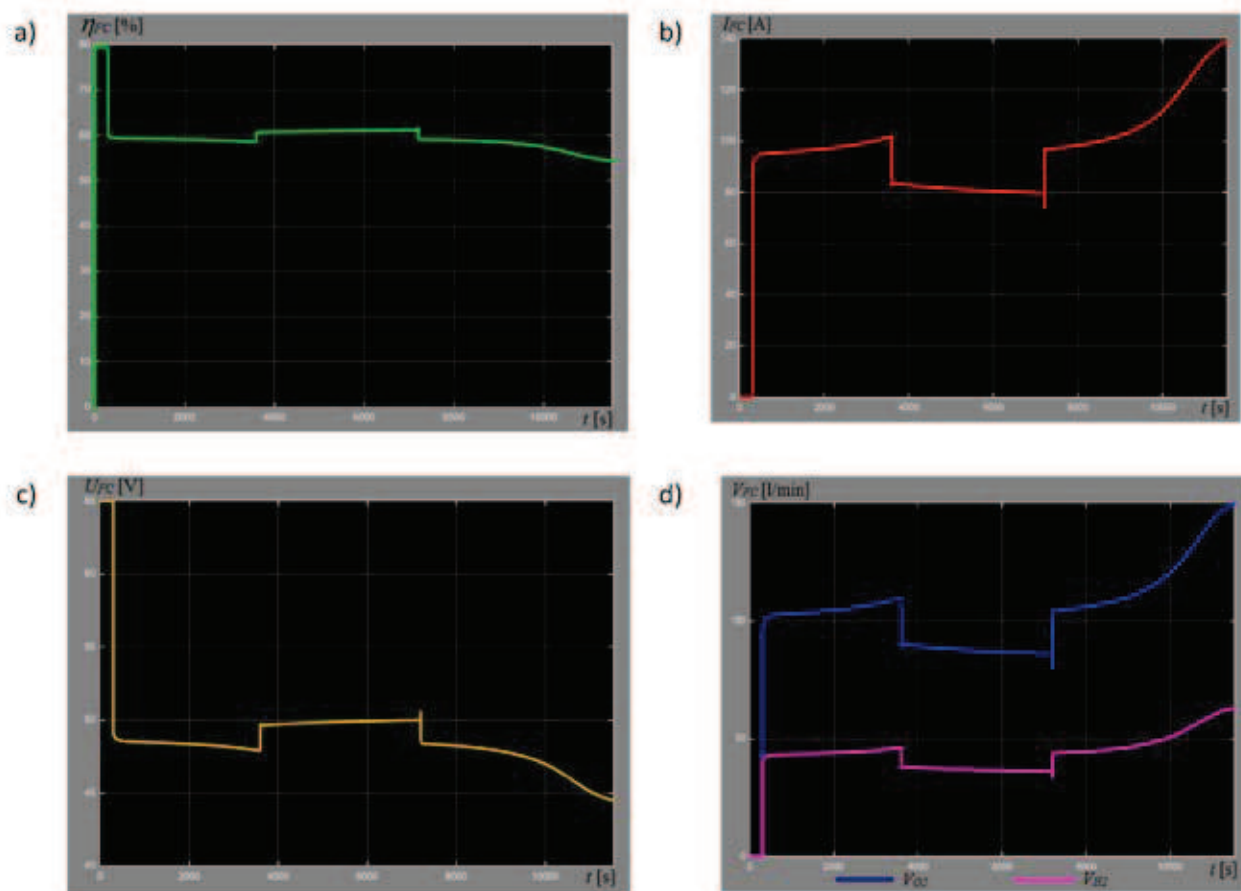
rów i osiągnięcia potrzebnej energii do zasilanie urządzeń BPN. Z charakterystyk akumulatorów (Rys. 6b i c) wynika, że jest on ładowany do ok. 7300 s misji, gdyż napięcie w stosunku do poprzedniego etapu znacznie wzrosło, a prąd jest ujemny. Po osiągnięciu poziomu naładowania akumulatora 65 % kończy się proces ładowania i rozpoczyna czwarty etap pracy systemu.

W czwartym etapie symulacji, trwającym od 7200 s rozpoczyna się 3 faza misji. Poziom naładowania akumulatorów osiągnął na początku tego etapu wartość 65 % (Rys. 6a). System zasilania BPN w ostatnim etapie symulacji wykorzystuje do zasilania urządzeń BPN zarówno system ogniwa paliwowego, jak i akumulatory z powodu maksymalnego zapotrzebowania na energię elektryczną.



Rys. 5. Przebieg zmian parametrów pracy akumulatora podczas realizacji misji rozpoznawczej:
a) stopień naładowania C_{ACU} b) napięcie U_{ACU} c) prąd I_{ACU}

Fig. 5. Changes of parameters of batteries operation during reconnaissance mission:
a) charge level C_{ACU} b) voltage U_{ACU} c) current I_{ACU}



Rys. 6. Przebieg zmian parametrów pracy systemu ogniwa paliwowego podczas realizacji misji rozpoznawczej: a) sprawność η_{FC} b) prąd I_{FC} c) napięcie U_{FC} d) natężenie przepływu wodoru (fioletowy) i tlenu (niebieski) V_{FC}

Fig. 6. Changes of parameters of fuel cell system operation during reconnaissance mission:

a) efficiency η_{FC} b) current I_{FC} c) voltage U_{FC} d) flow rate of hydrogen (violet) and oxygen (blue) V_{FC}

PODSUMOWANIE

Zaprezentowane wyniki badań systemu zasilania pokazują przepływ energii pomiędzy źródłami zasilania (stosami ogniw paliwowych i bateriami akumulatorów), a odbiornikami energii elektrycznej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

1) Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają wystarczalność energetyczną opracowanego systemu zasilania BPN do wykonania postawionego zadania (misja rozpoznawcza),

2) Uzyskane wyniki mogą być zastosowane przy budowie systemu zarządzania energią elektryczną, pozwalającego na automatyczną pracę całości systemu zasilania,

3) W przypadku potrzeby przeprowadzenia dłuższej misji i/lub o innym charakterze, czyli zużyciem innych urządzeń, opracowany symulator może posłużyć do doboru niezbędnej mocy systemu ogniwa paliwowego oraz pojemności akumulatorów.

W przyszłości istnieje możliwość przeprowadzenia kilku innych badań numerycznych mających na celu przetestowanie innych typów misji, czy też wykorzystania dodatkowych źródeł zasilania.

lania, np. fotoogniw, jak też zastosowania innych odbiorników energii elektrycznej, np. napędu głównego o większej mocy.

BIBLIOGRAFIA

1. Ballin C.: *Specyfikacja napędów torqeedo*, <http://www.torqeedo.com/uk/downloads-en/catalogue> (15.05.2015)
2. Grzeczka G., Polak A.: *Analiza możliwości zastosowania ogniw paliwowych w autonomicznych platformach podwodnych*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Logistyka, Nr 3/2011
3. Januszko R.: *Badania systemu zasilania bezzałogowego pojazdu nawodnego opartego na ogniwie paliwowym PEM*, niepublikowana praca magisterska, Akademia Marynarki Wojennej, 2015
4. Kitowski, Z., *Specyfikacja bezzałogowego pojazdu podwodnego edredon*, <http://www.usvedredon.pl/informacje-specyfikacja.html> (15.05.2015).
5. Szymak P., Grzeczka G., Polak A., inni: *Unmanned Vehicles w Report on Fuel Cells and Other Emerging Manportable Power Technologies for the NATO Warfighter*, Science and Technology Organization, Paris, 2013
6. Szymak P.: *Course Control of Unmanned Surface Vehicle*, Trans Tech Publication, Solid State Phenomena Vol. 196 (2013), str. 117-123, 2013

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 18-12-2018

Data akceptacji publikacji do druku: 19-02-2018