

Piotr SZYMAK¹
Grzegorz GRZECZKA²

SYSTEM ZASILANIA ELEKTRYCZNEGO OPARTY NA OGNIWIE PALIWOWYM PEM DO PRACY W WARUNKACH BEZ DOSTĘPU POWIETRZA

Coraz częściej w różnego rodzaju środkach transportu stosuje się napęd elektryczny oparty o niekonwencjonalne źródła energii. Jednym z przykładów takich źródeł jest ogniwo paliwowe typu PEM. Zazwyczaj ogniwa typu PEM są zasilane czystym wodorem zmagazynowanym na pokładzie środka transportu oraz tlenem pobieranym z otaczającego powietrza. W warunkach bez dostępu powietrza, np. środowiska podwodnego istnieje potrzeba dostarczania do ogniwa zarówno czystego wodoru jak i tlenu.

W niniejszym artykule przedstawiono architekturę systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW, przystosowanego do pracy w warunkach bez dostępu powietrza. Dodatkowo, w artykule zawarto wybrane wyniki badań eksperymentalnych zaprojektowanego i zbudowanego systemu zasilania.

SYSTEM OF ELECTRIC SUPPLY BASED ON PEM FUEL CELL TO WORK WITHOUT AIR ACCESS

More often, electric drives based on non-conventional sources of energy are used in different means of a transport. One of the example is PEM fuel cell. Usually PEM cells are supplied by clean hydrogen stored on board of the mean of transport and oxygen achieved from an ambient air. In the case of conditions without an air access e.g. an underwater environment, it is necessary to deliver to fuel cell both clean hydrogen and oxygen.

In the paper, an architecture of a system of electric supply based on PEM fuel cell with 6 kW power, adopted to work without air access, is presented. Moreover, selected results of experimental research of designed and built supply system are included.

¹ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69.
tel: + 48 58 626-28-81, Fax: + 48 58 626-25-67, e-mail: p.szymak@amw.gdynia.pl

² Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69.
tel: + 48 58 626-29-94, Fax: + 48 58 626-25-67, e-mail: g.grzeczka@amw.gdynia.pl

1. WSTĘP

Od dłuższego czasu poszukiwane i badane są alternatywne do paliw kopalnych źródła energii, w szczególności takie, które nie wpływają negatywnie na środowisko naturalne. Dlatego też dużym powodzeniem w zasilaniu obiektów stacjonarnych oraz urządzeń mobilnych cieszą niekonwencjonalne źródła energii. Jednym z urządzeń stanowiących przełom w dziedzinie niekonwencjonalnych źródeł energii jest ogniwo paliwowe, uzyskujące energię elektryczną i ciepło bezpośrednio z zachodzącej w nim reakcji chemicznej wodoru i tlenu [4]. Ogniwa charakteryzują się dużą czystością, sprawnością i gęstością energetyczną. Wodór, będący paliwem dla ogniw paliwowych, jest najpowszechniej występującym pierwiastkiem we Wszechświecie. Można go uzyskiwać z wody wykorzystując alternatywne źródła energii takie, jak energia słoneczna, czy energia wiatru oraz z szeregu innych substancji obecnych w przyrodzie, np. bakterie z rodzaju *Clostridium* uzyskują wodór z odpadów biologicznych.

Istnieje kilka różnych typów ogniw paliwowych. Jednym z najczęściej stosowanych dla mobilnych platform jest niskotemperaturowe ogniwo typu PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*), pracujące w zakresie temperatur od 50°C do 90°C. W przypadku stosowania technologii PEM w obiektach podwodnych, np. pojazdach podwodnych istotne jest zasilanie ogniwa paliwowego czystym wodorem i tlenem [1][2].

W kolejnym rozdziale przedstawiona zostanie architektura systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW, przystosowanego do pracy w warunkach bez dostępu powietrza [3]. Następnie przedstawione zostaną wybrane wyniki badań eksperymentalnych zaprojektowanego i zbudowanego systemu zasilania.

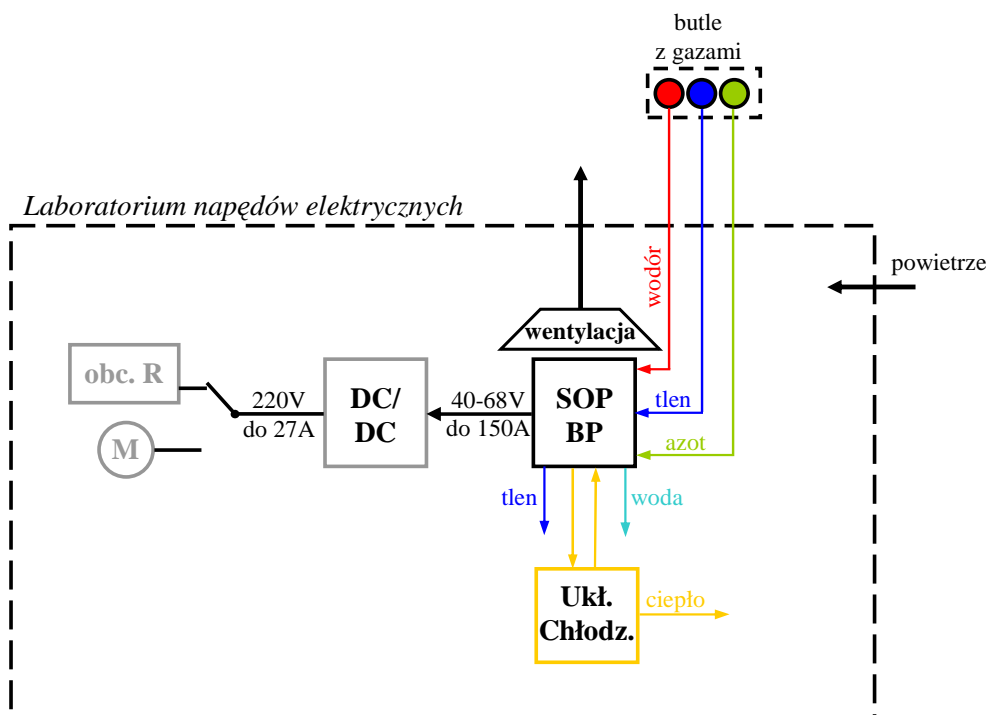
2. ARCHITEKTURA SYSTEMU ZASILANIA ELEKTRYCZNEGO PEM

Architektura zaprojektowanego i zbudowanego systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW, przystosowanego do pracy w warunkach bez dostępu powietrza została przedstawiona na rys. 1.

Głównym elementem systemu zasilania jest SOPBP, czyli system ogniwa paliwowego przystosowany do pracy w warunkach bez dostępu powietrza (czyli przy zasilaniu zarówno czystym wodorem jak i czystym tlenem). SOPBP oparty jest na stosie ogniwa paliwowego PEM typu P8 firmy Nedstack (Arnhem, Holandia). System ten przetwarza energię gazów reakcyjnych: tlenu i wodoru w energię elektryczną, wytwarzając przy tym jako produkty uboczne wodę oraz ciepło. SOPBP jest zasilany recyrkulowanym w systemie czystym wodorem oraz czystym tlenem w obwodzie otwartym, uzupełniającym w otaczającej atmosferze zużywany gaz. Natężenie przepływu wodoru podawanego do ogniwa paliwowego jest regulowane na podstawie ciśnienia wejściowego wodoru i recyrkulowane za pomocą pompy gazu, natomiast natężenie przepływu tlenu jest sterowane przy zastosowaniu regulatora przepływu F-201 firmy Bronkorst. Oba gazy są wstępnie nawilżane przy zastosowaniu nawilżaczy typu gaz-ciecz. Podłączony do systemu ogniwa paliwowego dodatkowy gaz, czyli azot jest potrzebny do wstępnego nawilżenia membrany polimerowej stosu podczas rozruchu oraz oczyszczania stosu i instalacji z wodoru podczas zatrzymywania. Algorytmy sterowania systemem ogniwa paliwowego zostały zaimplementowane w sterowniku PLC serii S7-300 firmy Siemens.

Zbudowany system ogniwa paliwowego posiada następujące parametry:

- energia elektryczna na wyjściu:
 - napięcie 40-68 V,
 - moc nominalna 6 kW,
- temperatura pracy stosu 55-65°C (maksymalnie 70°C),
- temperatura otoczenia 0-30°C,
- ciśnienie robocze stosu 200-300 mbarg,
- przepływ gazów zasilających stos 1-10 m³/h,
- pierwotny obieg chłodzenia:
 - objętość cieczy chłodzącej ok. 6 l,
 - woda demineralizowana o przewodności właściwej mniejszej od 17 S/m,
 - różnica ciśnień wywieranych na membranę stosu mniejsza od 0,5 bar,
- wymiary ok. 0,875x0,5x1,705 m,
- masa ok. 275 kg.



Rys. 1. Widok elementów składowych systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW umieszczonych w i na zewnątrz Laboratorium napędów elektrycznych w Akademii Marynarki Wojennej

Kolejny element składowy systemu zasilania to instalacje gazowe dostarczające do stosu ogniwa niezbędne do jego pracy gazy: wodór, tlen i azot. Gazy dostarczane są z butli sprężonych gazów pod odpowiednio zredukowanym ciśnieniem (2-5 bar). Butle

z gazami, ze względu na warunki bezpieczeństwa, zostały zainstalowane na zewnątrz laboratorium w odpowiednio zabezpieczonych szafach.

Energia elektryczna wytwarzana przez system zasilania elektrycznego w postaci prądu stałego jest oddawana do obciążenia rezystancyjnego lub rezystancyjno-indukcyjnego (silniki prądu stałego) poprzez przekształtnik elektroenergetyczny, dopasowujący parametry energii (stabilizacja napięcie do wartości 220 V) dla potrzeb obciążenia. Wykorzystano przetwornicę impulsową EPI 25/220/50 MS firmy APS-Energia. Przetwornica umożliwia przekształcanie energii o maksymalnej mocy 10 kW.

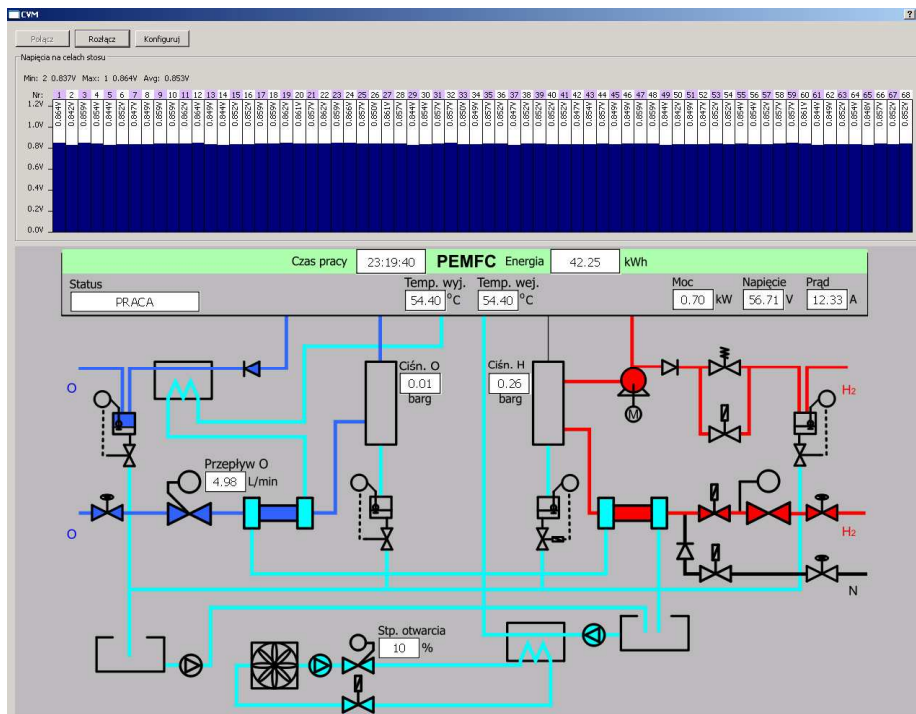
Do odbioru ciepła z SOPBP zaprojektowano i zbudowano wtórny układ chłodzenia, składający się z następujących elementów:

- 1) wymiennika ciepła typu ciecz-powietrze o mocy cieplnej ok. 10 kW z zamontowanym wentylatorem o regulowanej prędkości obrotowej,
- 2) pompy cieczy chłodzącej,
- 3) przewodów doprowadzających ciecz do wymiennika ciepła typu ciecz-ciecz zamontowanego w szafie SOPBP,
- 4) zaworu z regulowanym stopniem otwarcia, zamontowanego w szafie SOPBP, sterującego przepływem cieczy w układzie wtórnego chłodzenia, a przez to ilością przekazywanego ciepła z układu pierwotnego (odbierającego ciepło od stosu ogniwa) do układu wtórnego.

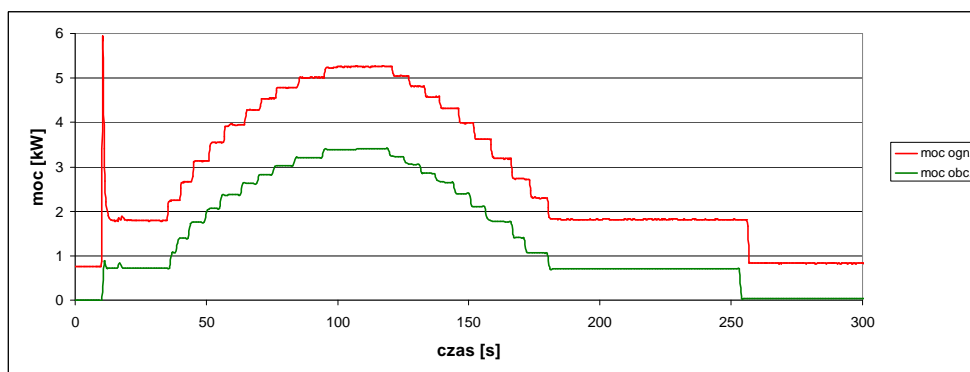
3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Parametry badanego systemu zasilania elektrycznego opartego o ogniwo paliwowe PEM zostały zarejestrowane przy zastosowaniu urządzenia pomiarowego firmy Fluke (napięcie i prąd na obciążeniu) oraz CWM - aplikacji do wizualizacji i archiwizacji pracy systemu ogniwa paliwowego (rys. 2).

System zasilania elektrycznego oparty na ogniwie paliwowym PEM został przetestowany dla zmiany prądu obciążenia. Początkowo obciążenia elektryczne było zwiększane (do 96 sekundy eksperymentu) a następnie zmniejszane (rys. 3). W chwili początkowej system ogniwa paliwowego generuje moc równą 0,86 kW na potrzeby zasilania obwodów mocy przetwornicy DC/DC oraz własne (pompy, czujniki, sterownik PLC). W 11 sekundzie eksperymentu załączono silnik prądu stałego o mocy 5 kW sprzęgnięty wałem z prądnicą 3,5 kW. Natomiast od 36 do 96 sekundy eksperymentu następuje zwiększanie obciążenia prądnicy, a od 120 do 181 sekundy zmniejszanie tego obciążenia. Na podstawie rys. 3 widać, iż przetwornica DC/DC charakteryzuje się małą sprawnością (pobiera 5,25 kW mocy, a oddaje tylko 3,40 kW do obciążenia).

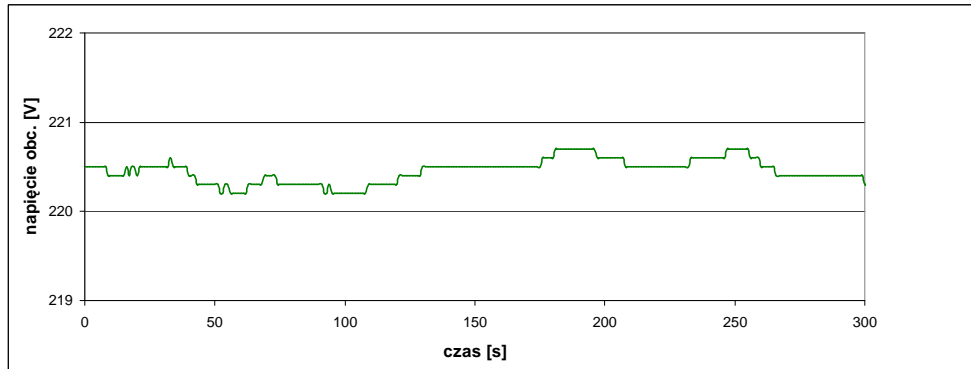


Rys. 2. Aplikacja do wizualizacji i archiwizacji pracy systemu ogniwa paliwowego napisana przez mgr inż. Marcina Szulca



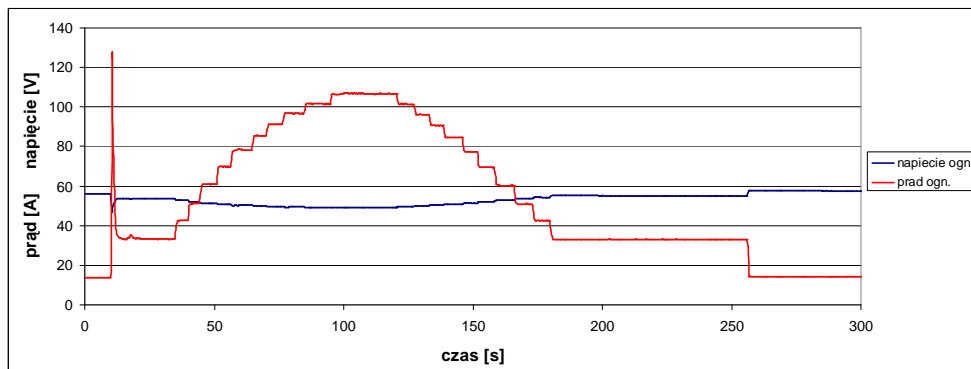
Rys. 3. Przebieg mocy na wyjściu systemu ogniwa paliwowego (moc ogn.) i na obciążeniu (moc obc.) dla zwiększania a następnie zmniejszania prądu obciążenia

Jak można zauważyć na podstawie rys. 4 przetwornica DC/DC dobrze stabilizuje napięcie (zmiany mieszczą się w zakresie $\pm 0,3$ V).



Rys. 4. Przebieg napięcia na wyjściu przetwornicy DC/DC dla zwiększania a następnie zmniejszania prądu obciążenia

Opisanym wcześniej zmianom prądu obciążenia badanego systemu zasilania elektrycznego odpowiadają porównywalne zmiany prądu i napięcia ogniwa paliwowego (rys. 5). Jedynie włączeniu silnika elektrycznego w 11 sekundzie eksperymentu odpowiada impulsowy wzrost prądu ogniwa, ale o krótkim czasie trwania, czemu odpowiada przepięcie o wartości ok. 10 V. Przy 68 celach stosu ogniwa paliwowego daje to średnio 0,14 V spadku napięcia na pojedynczej celi. Nie stwarza to zagrożenia uszkodzenia ogniwa paliwowego. Ponadto w trakcie całego eksperymentu (zwiększania i zmniejszania prądu obciążenia) wartość napięcia na wyjściu systemu ogniwa paliwowego zmienia się w zakresie ± 5 V.



Rys. 5. Przebieg prądu i napięcia na wyjściu systemu ogniwa paliwowego dla zwiększania a następnie zmniejszania prądu obciążenia

4. WNIOSKI

Opracowany system zasilania elektrycznego oparty o ogniwo paliwowe PEM, przystosowany do pracy w warunkach bez dostępu powietrza poprawnie reaguje na zmiany prądu obciążenia oraz dobrze stabilizuje napięcie zasilające odbiorniki energii elektrycznej.

Wadą prezentowanego systemu zasilania jest mała sprawność przetwornicy DC/DC, zmniejszającą się w miarę wzrostu przetwarzanej mocy. Wada ta może być skorygowana poprzez zastosowanie przetwornicy o lepszej sprawności lub zastosowanie stosu ogniwa paliwowego o większej liczbie cel wraz z równoległe podłączonym superkondensatorem stabilizującym napięcie zasilające odbiorniki energii elektrycznej.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Browning D.J., Lakeman J.B.: *The Role of Fuel Cells in the Supply of Silent Power for Operations in Littoral Waters*, Symposium on Novel Vehicle Concepts and Emerging Vehicle Technologies, 2003.
- [2] Grzeczka G., Szymak P.: *Analysis of Using Fuel Cell Technology for Autonomous Underwater Vehicle Power Supply*, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling and Simulation (ACMOS '09), WSEAS Press, Istambuł 2009, pp. 153-156.
- [3] Szymak P., Grzeczka G.: *Opracowanie technologii rezerwowego zasilania elektrycznego okrętu podwodnego z zastosowaniem wodorowego ogniwa paliwowego*, sprawozdanie z pracy badawczej, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2008.
- [4] Szymak P.: *Model matematyczny stosu ogniwa paliwowego PEM zasilanego czystym tlenem i wodorem*, Logistyka nr 3/2009, Instytut Logistyki i Magazynowania, Szczyrk, 2009, pp. 78-79.