

dr inż. Piotr Szymak
Akademia Marynarki Wojennej

MONITOROWANIE PRACY SYSTEMU OGNIWA PALIWOWEGO PEM O MOCY 6 kW

W Instytucie Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej w Akademii Marynarki Wojennej zaprojektowano i zbudowano demonstrator technologii systemu zasilania elektrycznego oparty na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW. W artykule opisano strukturę tego systemu, oprogramowanie do monitorowania jego pracy oraz wybrane wyniki przeprowadzanych testów.

MONITORING THE OPERATION OF PEM FUEL CELL SYSTEM WITH POWER 6 kW

In the Institute of Electrical Engineering and Automatics in the Polish Naval Academy, a technology demonstrator of an electric supply system based on PEM fuel cell with power 6 kW was designed and built. In the paper, a structure of the system, a software for monitoring its operation and selected results of carried out tests were presented.

1. WPROWADZENIE

Zaprojektowany i zbudowany w Instytucie Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej Akademii Marynarki Wojennej demonstrator technologii systemu zasilania elektrycznego oparty na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW (rys. 1) przeznaczony jest do pracy w warunkach bez dostępu powietrza, czyli np. w warunkach podwodnych [1]. Podstawowym elementem tego systemu jest stos ogniwa paliwowego P8 firmy Nedstack (Arnhem, Holandia). System zasilany jest czystym wodorem (recykulowanym w zamkniętej pętli) oraz czystym tlenem (podawanym w obwodzie otwartym) [7].



Rys. 1. Demonstrator technologii systemu zasilania elektrycznego oparty na ogniwie paliwowym PEM o mocy 6 kW w Laboratorium napędów elektrycznych Instytutu Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej AMW

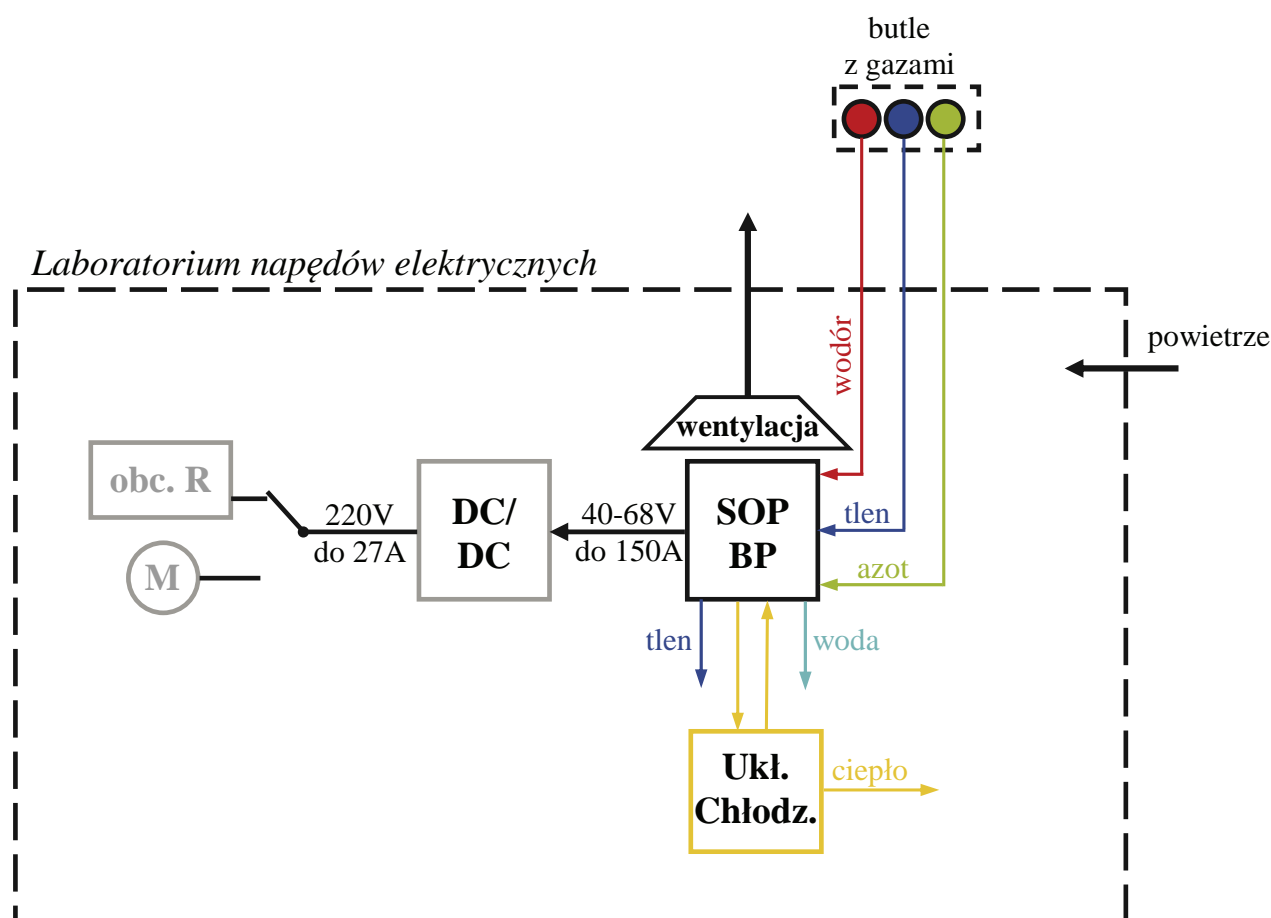
Demonstrator technologii jest efektem drugiego etapu badań nad systemem rezerwowego zasilania elektrycznego okrętu podwodnego [3]. W pierwszym etapie badań nad tym systemem opracowano

i zaimplementowano w środowisku Matlab symulator systemu ogniwa paliwowego do pracy w warunkach bez dostępu powietrza [6], bazujący na modelu matematycznym zawartym w literaturze [2]. Opracowany symulator został pozytywnie zweryfikowany podczas wcześniejszych badań numerycznych i eksperymentalnych [4].

W niniejszym artykule, w kolejnym drugim rozdziale zawarto opis architektury systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*) o mocy 6 kW. Następnie, w trzecim rozdziale przedstawiono oprogramowanie do wizualizacji i monitorowania opracowanego systemu ogniwa paliwowego, a w rozdziale czwartym zaprezentowano wybrane wyniki działania systemu przy zmiennym obciążeniu.

2. ARCHITEKTURA SYSTEMU OGNIWA PALIWOWEGO

Architektura demonstratora technologii SRZEOP została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2 Widok elementów składowych demonstratora technologii systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym PEM o mocy 6 kW

Głównym elementem składowym demonstratora technologii jest SOPBP (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 ogniwa paliwowego przetwarza energię gazów reakcyjnych – tlenu i wodoru – w energię elektryczną, wytwarzając przy tym jako produkty uboczne wodę oraz ciepło. Podłączony do systemu dodatkowy gaz – azot – jest potrzebny do wstępnego nawilżenia membrany polimerowej stosu podczas rozruchu oraz oczyszczania stosu i instalacji z wodoru podczas zatrzymywania.

Kolejny element składowy demonstratora 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 SOPBP 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 W.

Reakcja zachodząca w stosie ogniwa paliwowego jest reakcją egzotermiczną. Wymaga to dołączenia do stosu układu chłodzenia. Zrealizowano wodny układ chłodzenia składający się z obiegu pierwotnego zlokalizowanego w szafie systemu ogniwa paliwowego oraz obiegu wtórnego chłodzenia usytuowanego na zewnątrz szafy. W efekcie końcowym ciepło ze stosu rozpraszane jest w atmosferze laboratorium poprzez wymiennik ciepła typu cieczer-powietrze.

Podstawowym elementem systemu monitorowania niebezpiecznych gazów jest detektor wodoru HydroKnowz firmy Neodyme zamontowany w najwyższym punkcie szafy systemu ogniwa paliwowego. Dodatkowo w Laboratorium napędów elektrycznych zamontowano detektory wodoru DrägerSensor H₂ – 685 oraz tlenu DrägerSensor O₂ – 720 firmy Draeger Safety Inc.

3. OPROGRAMOWANIE SYSTEMU OGNIWA PALIWOWEGO

Oprogramowanie systemu ogniwa paliwowego składa się z trzech aplikacji (rys. 3) [5]:

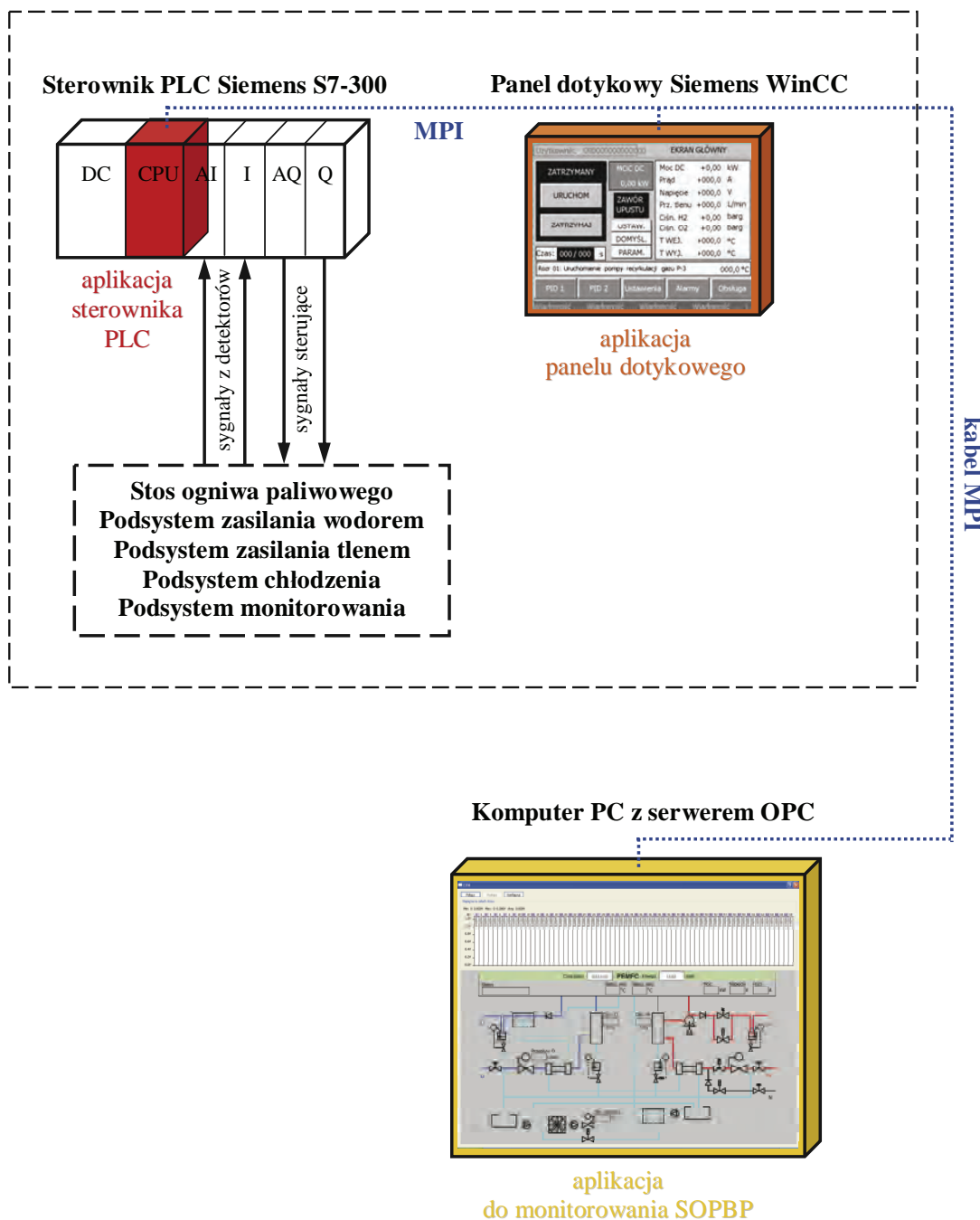
- 1) pierwsza, najważniejsza aplikacja zawiera algorytmy działania sterownika PLC firmy Siemens, SIMATIC S7-300, który steruje bezpośrednio elementami wykonawczymi i podsystemami SOPBP,
- 2) kolejna aplikacja panelu dotykowego to interfejs użytkownika z SOPBP (daje użytkownikowi dostęp do aplikacji sterownika PLC, a przez to możliwość uruchamiania i zatrzymywania systemu, zmianę parametrów pracy stosu ogniwa, zmianę nastaw regulatorów PID itp.),
- 3) ostatnia aplikacja do monitorowania SOPBP daje możliwości wizualizacji i archiwizacji pracy systemu.

Sterownik PLC SIMATIC S7-300 jest bezpośrednio połączony z czujnikami (np. temperatury, ciśnienia) i elementami wykonawczymi (np. regulator przepływu, zawór elektromagnetyczny) systemu ogniwa paliwowego. Połączenie to realizowane jest poprzez moduły wejść analogowych i dyskretnych oraz wyjść analogowych i dyskretnych. SIMATIC S7-300 steruje procesami zachodzącymi w SOPBP zgodnie z zaimplementowanymi algorytmami. Ogólnie rzecz ujmując, program sterownika PLC steruje jego pracą podczas:

- 1) rozruchu systemu,
- 2) pracy systemu (podłączone obciążenie elektryczne),
- 3) zatrzymywania systemu,
- 4) sytuacji alarmowej i/lub awaryjnej.

Podczas pracy systemu, sterownik PLC reguluje ciśnienie wodoru w zamkniętej pętli zasilania do zadanego poziomu oraz steruje natężeniem przepływu tlenu w zależności od mocy pobieranej przez obciążenie. Dodatkowo steruje stopniem otwarcia zaworu elektromagnetycznego we wtórnym obiegu chłodzenia, co pozwala na regulowanie odbioru ciepła z obiegu pierwotnego tak, aby utrzymywać zadaną temperaturę pracy stosu ogniwa paliwowego.

System Ognia Paliwowego Bez dostępu Powietrza SOPBP

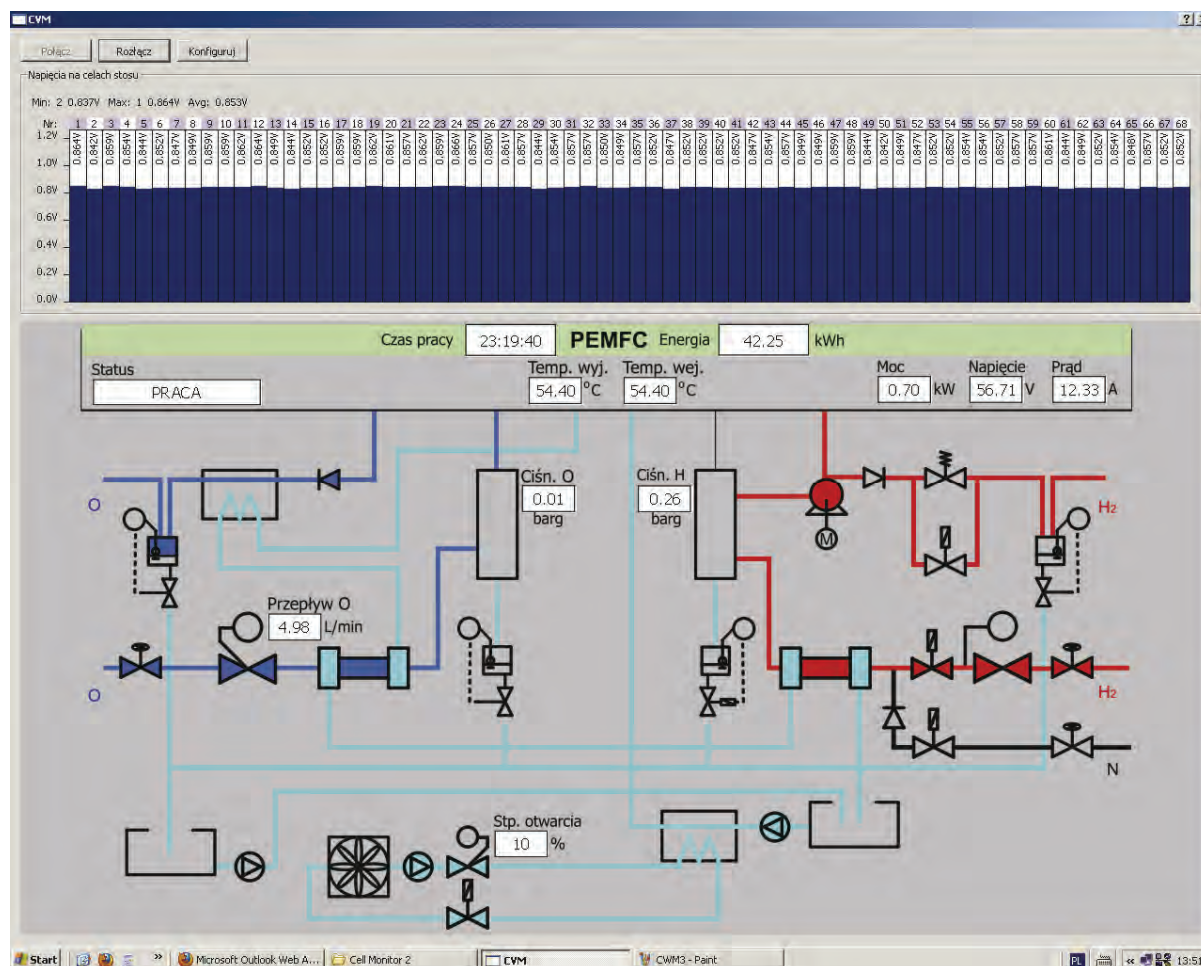


Rys. 3. Zobrazowanie struktury oprogramowania SOPBP

Panel dotykowy Siemens WinCC jest podstawowym interfejsem użytkownika z SOPBP. Oprogramowanie panelu dotykowego umożliwia:

- 1) uruchamianie i zatrzymywanie systemu,
- 2) monitorowanie podstawowych parametrów systemu ogniwa paliwowego,
- 3) informowanie o aktualnym stanie pracy SOPBP oraz o aktualnej czynności wykonywanej przez sterownik podczas rozruchu, zatrzymywania lub alarmu,
- 4) zmianę nastaw regulatorów PID: przepływu tlenu i temperatury cieczy chłodzącej,

- 5) zmianę ustawień programu sterownika PLC, np. czasu trwania oczyszczania systemu azotem podczas rozruchu lub zatrzymywania, ustawienia zaworu cieczy chłodzącej itp.,
- 6) informowanie o aktualnym alarmie i historii alarmów oraz kasowanie alarmu,
- 7) zarządzanie użytkownikami systemu,
- 8) zmianę języka i/lub kontrastu panelu oraz kalibrację panelu dotykowego.



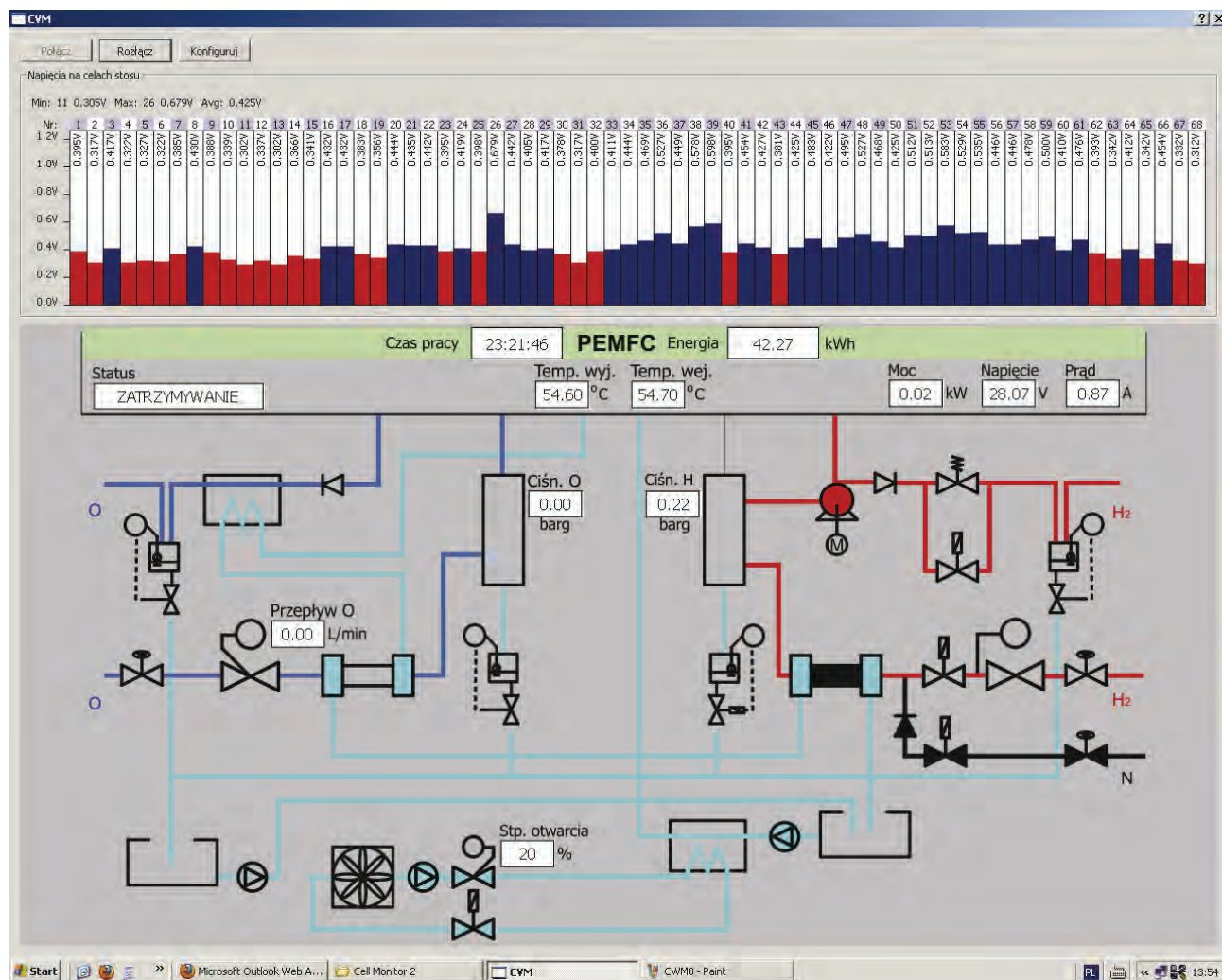
Rys. 4. Główne okno aplikacji do monitorowania pracy systemu CVM ogniwa paliwowego w czasie pracy systemu

Aplikacja do monitorowania SOPBP służy do wizualizacji w czasie rzeczywistym oraz archiwizacji parametrów pracy stosu ogniwa paliwowego oraz podsystemów dostarczających gazy reakcyjne: wodór i tlen, jak również podsystemu chłodzenia stosu i nawilżania gazów reakcyjnych (rys. 4). Aplikacja została napisana przez mgr. inż. Marcina Szulca.

Główne okno aplikacji zostało podzielone na następujące panele (rys. 5):

- 1) panel przycisków, umożliwiający połączenie lub rozłączenie aplikacji z sterownikiem PLC oraz wywołanie okna konfiguracyjnego,
- 2) panel napięć na poszczególnych celach ogniwa paliwowego, pokazujący wartości napięć w postaci wykresu słupkowego oraz minimalną, maksymalną i średnią wartość napięcia cel stosu ogniwa,

- 3) panel aktualnego stanu pracy systemu ogniwa paliwowego, pokazujący w czasie rzeczywistym stan pracy poszczególnych elementów systemu na jego schemacie wraz z wyświetlaniem podstawowych parametrów pracy systemu.

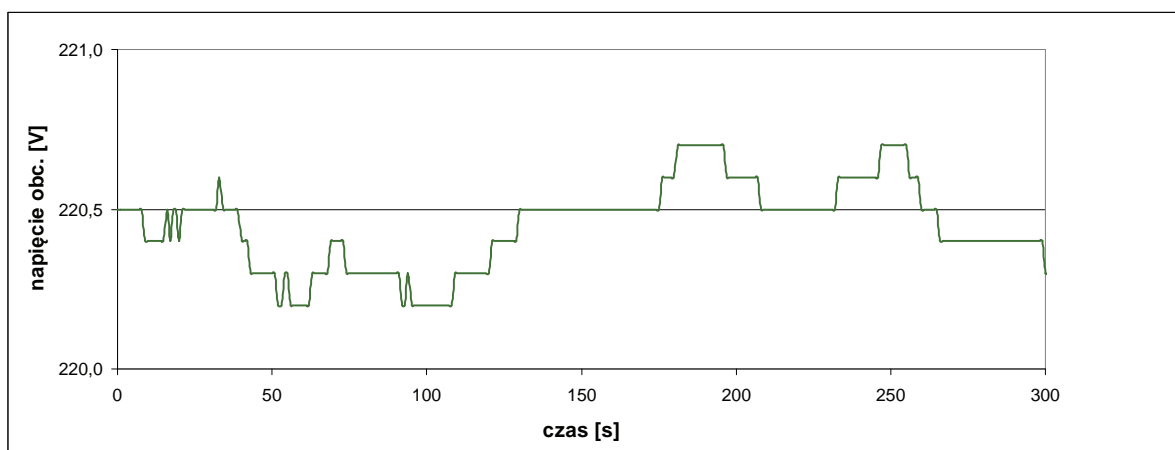


Rys. 5. Główne okno aplikacji do monitorowania pracy systemu CVM ogniwa paliwowego w czasie zatrzymywania systemu

Całość wizualizowanych parametrów jest archiwizowana w pliku tekstowym, co daje możliwość późniejszego analizowania pracy systemu off-line oraz przedstawienia pracy systemu w postaci przebiegów czasowych.

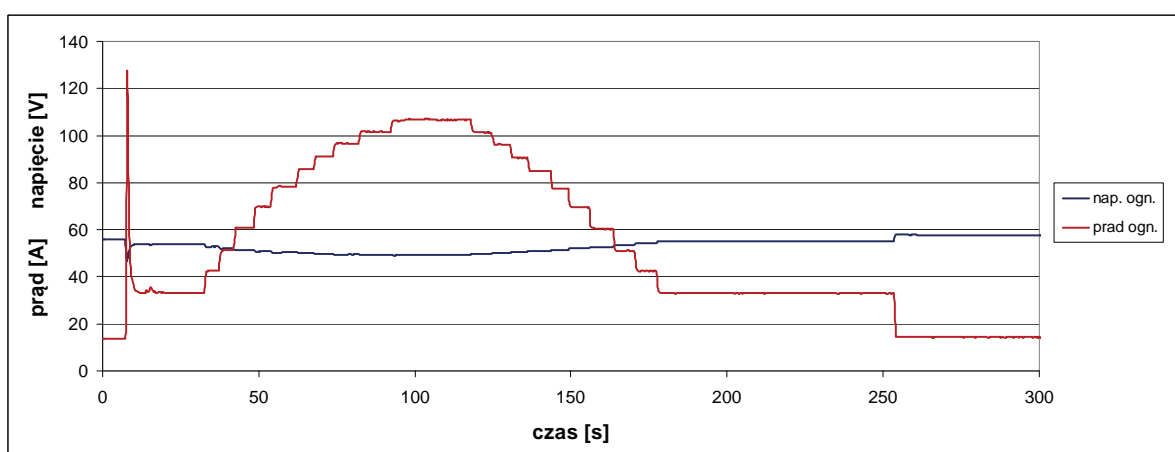
4. WYBRANE WYNIKI DZIAŁANIA SYSTEMU

Badania przeprowadzono dla „nagrzewającego się” stosu ogniwa paliwowego, tzn. przy temperaturze jego pracy wzrastającej od 30 °C do ok. 60 °C dla zmieniającego się w sposób ciągły obciążenia (przy zastosowaniu silnika elektrycznego sprzężonego wałem z prądnicą obciążaną rezystancyjnie) [3].

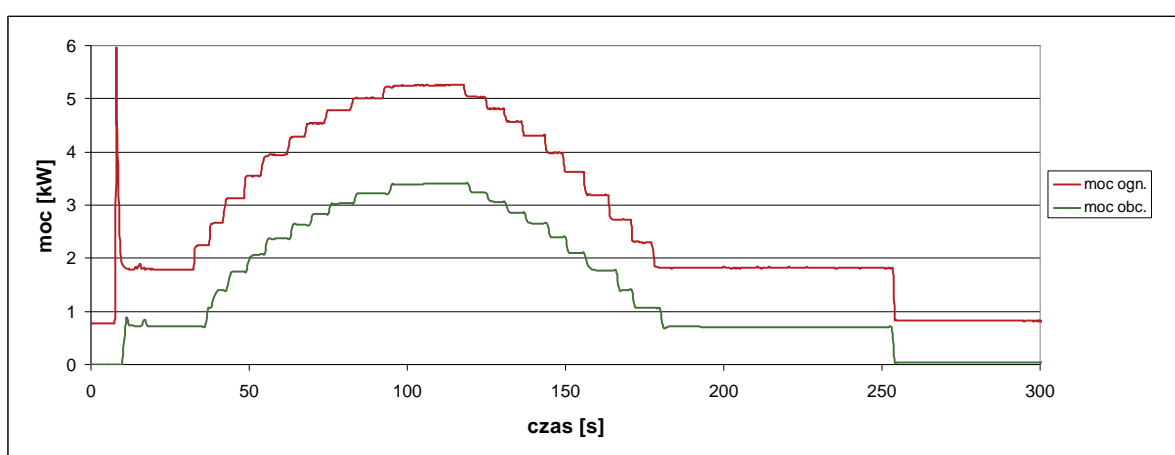


Rys. 6. Przebieg stabilizacji napięcia na obciążeniu

Jak można zauważyć (rys. 6), przetwornica DC/DC dobrze stabilizuje napięcie na obciążeniu (zmiany napięcia mieszczą się w zakresie $\pm 0,3$ V).



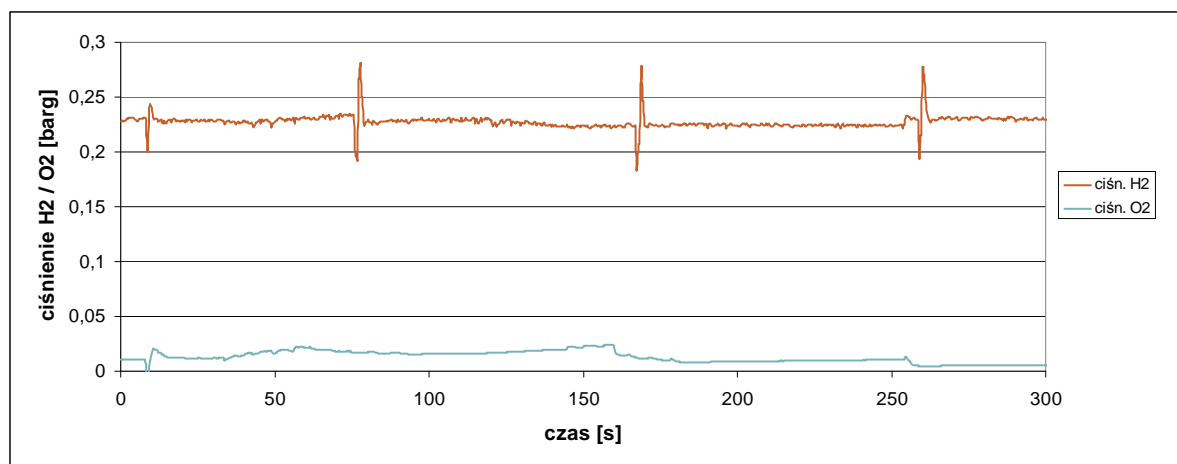
Rys. 7. Przebieg zmian napięcia i prądu stosu ogniwa paliwowego



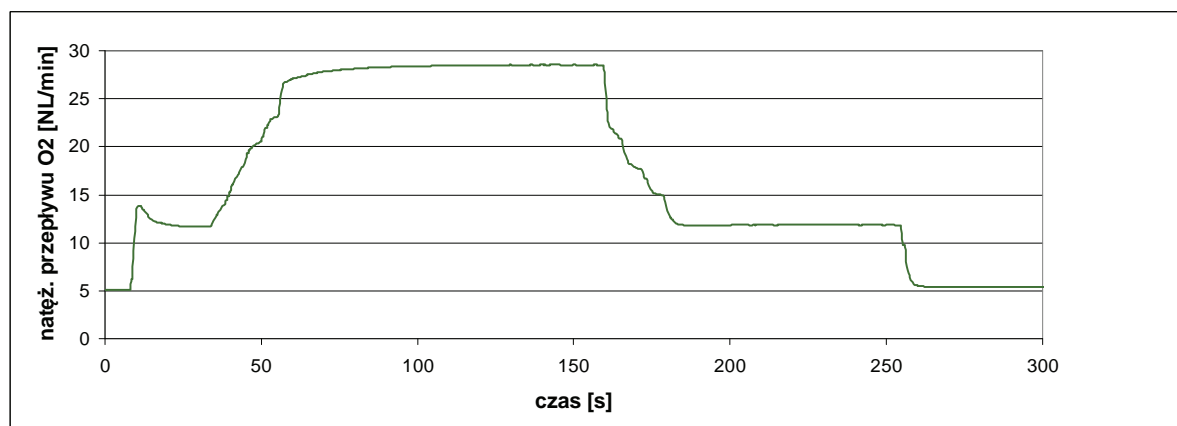
Rys. 8. Porównanie zmian mocy generowanej przez system ogniwa paliwowego oraz oddawanej do obciążenia

Zmiany obciążenia były realizowane w taki sposób, iż na początku obciążenie elektryczne było zwiększane (do 96 sekundy eksperymentu), a następnie zmniejszane. W chwili początkowej system

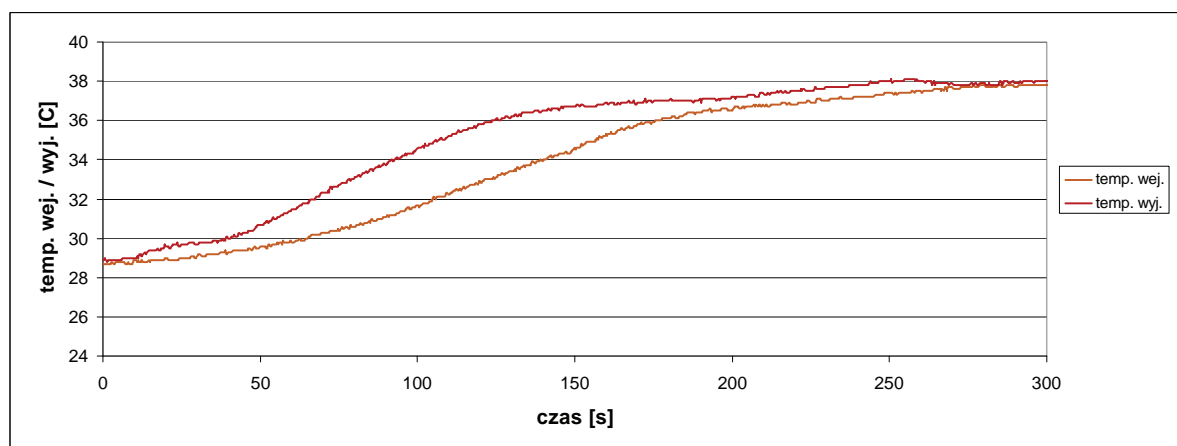
ogniwa paliwowego generuje moc równą 0,86 kW na potrzeby zasilania obwodów mocy przetwornicy DC/DC oraz własne (pompy, czujniki, sterownik PLC). W 11. sekundzie eksperymentu załączono silnik prądu stałego o mocy 5 kW sprzęgnięty wałem z prądnicą 3,5 kW. Natomiast od 36. do 96. sekundy eksperymentu następuje zwiększanie obciążenia prądnicy, a od 120 do 181 sekundy zmniejszanie tego obciążenia. Na podstawie rys. 8 widać, iż przetwornica DC/DC charakteryzuje się małą sprawnością (pobiera 5,25 kW mocy, a oddaje tylko 3,40 kW do obciążenia).



Rys. 9. Przebieg zmian ciśnienia wodoru i tlenu



Rys. 10. Przebieg zmiany natężenia przepływu tlenu



Rys. 11. Przebieg zmian temperatury cieczy chłodzącej na wejściu i wyjściu stosu ogniwa paliwowego

Opisywanym wcześniej zmianom obciążenia odpowiadają niewielkie zmiany ciśnienia wodoru i tlenu (rys. 9). Nieduże zmiany ciśnienia wodoru świadczą o poprawnie przyjętym sterowaniu ciśnieniem wodoru na wejściu stosu oraz pompą gazu w obwodzie recyrkulacji. Pojawiające się okresowo „piki” przebiegu ciśnienia wodoru wynikają z cyklicznie przeprowadzanego przedmuchu przedziału anody stosu, gdzie może gromadzić się woda. Natomiast przebieg ciśnienia tlenu jest ściśle powiązany z przebiegiem natężenia przepływu tlenu (rys. 10), który z kolei wynika z generowanej mocy na obciążeniu.

W trakcie badań temperatura stosu ogniwa paliwowego zwiększa się do wartości zadanej. W tym przypadku zawór regulujący dopływ cieczy chłodzącej w obiegu wtórnym do wymiennika ciepła praktycznie nie pracuje.

5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowany system zasilania elektrycznego oparty na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW pozwala na demonstrację zastosowania technologii ogniwa paliwowych PEM do generowania energii elektrycznej w warunkach bez dostępu powietrza (np. w warunkach podwodnych).

Przedstawiona aplikacja CVM do monitorowania systemu ogniwa paliwowego umożliwia zarówno wizualizację pracy systemu online jak i archiwizację rejestrowanych parametrów pracy systemu, co z kolei daje możliwość analizowania pracy systemu off-line. Zaprezentowane wybrane wyniki z przeprowadzonych testów potwierdzają użyteczność przyjętego sposobu monitorowania systemu oraz poprawność implementacji aplikacji CVM.

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. Gasser F.: „An analytical, control-oriented state space model for a PEM fuel cell system”, rozprawa doktorska, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne 2006.
3. Grzeczka G., Szymak P.: „Sprawozdanie merytoryczne – demonstrator technologii systemu rezerwowego zasilania elektrycznego okrętu podwodnego”, AMW, Gdynia 2010.
4. Małecki J., Szymak P., Grzeczka G.: „Validation of a mathematical model of 5 kW PEMFC stack supplied by pure oxygen and hydrogen”, Proceedings of the 3rd Hydrogen & Energy Symposium, Braunwald 2009, str. 81.
5. Szymak P.: „Opis oprogramowania demonstratora technologii ogniwo paliwowe”, 1001-DED/011, AMW, Gdynia 2010.
6. Szymak P.: „Model matematyczny stosu ogniwa paliwowego PEM zasilanego czystym tlenem i wodorem”, Logistyka nr 3/2009, str. 78–83.
7. Szymak P., Grzeczka G.: „Opis techniczny demonstratora technologii ogniwo paliwowe”, 1001-DKD/003, AMW, Gdynia 2010.