

Piotr SZYMAK\*, Tomasz PRACZYK\*\*

\* Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, e-mail: p.szymak@amw.gdynia.pl

\*\* Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Informatyki i Uzbrojenia Okrętowego, e-mail: t.praczyk@amw.gdynia.pl

## Dobór parametrów pracy ogniwa paliwowego z membraną polimerową

**Streszczenie.** Jednym z częściej stosowanych ogniw paliwowych do zasilania platform mobilnych są ogniwa z membraną polimerową PEMFC (ang. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). Jednym z ważniejszych problemów badawczych przy budowie systemów zasilania opartych o ogniwa PEMFC jest dobór parametrów ich pracy. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych mających na celu dobór parametrów pracy ogniwa paliwowego PEMFC o mocy 6 kW. Dla realizacji tego celu wykorzystano symulator systemu ogniwa paliwowego zweryfikowany na podstawie charakterystyk polaryzacji rzeczywistego stosu ogniwa paliwowego.

### SELECTION OF OPERATION PARAMETERS OF FUEL CELL WITH POLYMERE MEMBRANE

**Summary.** One of the most frequently used fuel cells to power supply of mobile platforms are fuel cells with polymer membrane PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). One of the major problems of research in the construction of the power systems based on the PEMFC is the selection of the parameters of their operation.

This article presents selected results of simulation studies aimed at selecting the operating parameters of the PEMFC with power of 6 kW. To achieve this purpose a fuel cell system simulator, verified on the basis of polarization characteristics of the real fuel cell stack was used.

### 1. WPROWADZENIE

Ogólna zasada działania polimerowego ogniwa paliwowego jest podobna do zasady działania typowego ogniwa elektrochemicznego. Ogólnie rzecz ujmując, wodór zasilający anodę ogniwa w obecności katalizatora ulega utlenieniu zgodnie z następującym równaniem:



W wyniku utlenienia jednej cząstki gazowego wodoru powstają dwa protony oraz dwa elektrony. Opisana reakcja zachodzi w tzw. punkcie potrójnego styku katalizatora: membrany jonoprzewodzącej oraz elektrod wykonanych z materiału o mieszanym przewodnictwie jonowo-elektronowym.

W przypadku ogniw polimerowych niezwykle istotne jest ich zasilanie przy użyciu gazów reakcyjnych o dużej czystości, ponieważ zanieczyszczenia mogą powodować zatrucie katalizatora oraz degradację membrany. Dobrej jakości elektrolit powinien charakteryzować się dużą rezystancją elektronową, aby uniemożliwić przepływ elektronów i zmusić je do przemieszczenia na stronę katody poprzez zewnętrzny obwód elektryczny (w wyniku czego wykonują one użyteczną pracę elektryczną). Jednocześnie membrana elektrolityczna musi charakteryzować się dużą przewodnością jonową, aby umożliwić przepływ powstałych na anodzie jonów wodoru. Po przejściu elektronów przez zewnętrzny obwód elektryczny trafiają one do katody, gdzie przy udziale katalizatora biorą udział w reakcji z tlenem i jonami wodoru zgodnie z zależnością:



czyli w wyniku reakcji powstaje cząsteczka wody i uzyskuje się energię elektryczną. Dodatkowo uzyskuje się energię cieplną, ponieważ omawiana reakcja jest egzotermiczna.

Katoda może być zasilana czystym tlenem lub tlenem zawartym w powietrzu. W pierwszym przypadku uzys-

kuje się większą gęstość generowanego prądu, natomiast w drugim przepływające powietrze oprócz dostarczania tlenu spełnia dodatkową rolę czynnika chłodzącego ogniwo paliwowe.

Pojedyncza cела ogniwa paliwowego zbudowana jest z następujących elementów [1]:

- 1) płytek bipolarnych (zw. często płytkami przepływowymi) – umożliwiających doprowadzenie gazów reakcyjnych do elektrod,
- 2) elektrod gazodifuzyjnych, składających się z sprasowanych pod wysokim ciśnieniem warstw gazodifuzyjnych i warstw katalizatora,
- 3) polimerowej membrany elektrolitycznej – przewodzącej jony wodoru.

Zestaw sprasowanych elektrod wraz z membraną określany jest mianem MEA (ang. Membrane Electrode Assembly).

### 2. MODEL MATEMATYCZNY OGNIWA PEMFC

Przedstawione w dalszej części wyniki badań symulacyjnych uzyskano przy użyciu zorientowanego na sterowanie, analitycznego, izotermicznego modelu matematycznego ogniwa paliwowego PEMFC w stanie ustalonym [2, 3]. Działanie tego modelu jest opisywane przy zastosowaniu parametrów zebranych w tabeli 1. Ogniwo paliwowe może być poddane oddziaływaniu środowiska lub innych stałych warunków pracy (np. ciśnieniu otoczenia), interakcji z użytkownikiem (np. prąd ogniwa paliwowego) albo zmieniane przez pomocnicze systemy (np. natężenie przepływu zasilającego ogniwo wodoru).

Szczegółowy opis matematyczny modelu matematycznego systemu ogniwa paliwowego zawarty jest w [4, 5]. Poszczególne parametry i stałe modelu zostały dobrane na podstawie danych literaturowych, obliczone z wykorzystaniem przedstawionych równań lub dobrane doświadczalnie dla przyjętego typu ogniwa paliwowego.

Wartości parametrów zostały zweryfikowane i ewentualnie dostrójone w trakcie badań eksperymentalnych ognia paliwowego PEM z firmy Nedstack.

Tab. 1. Parametry modelu ognia paliwowego

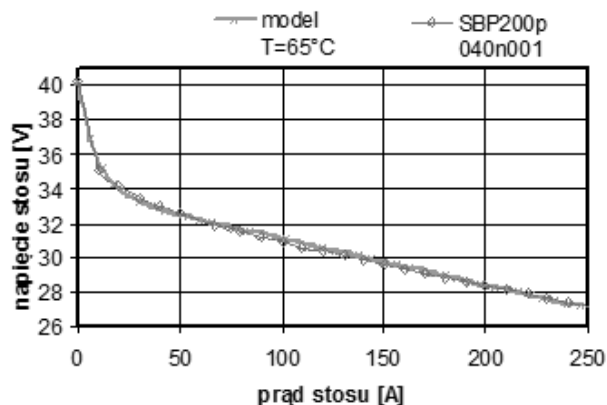
Symbol	Parametr pracy	Jednostka
$I_{el}$	Prąd ognia paliwowego	[A]
$p_{O_2}$	Ciśnienie tlenu na wlocie	[Pa]
$p_{H_2}$	Ciśnienie wodoru na wlocie	[Pa]
$p_{amb}$	Ciśnienie otoczenia	[Pa]
$\dot{m}_{O_2}$	Natężenie przepływu tlenu wlotowego	[kg/s]
$\dot{m}_{H_2}$	Natężenie przepływu wodoru wlotowego	[kg/s]
$\psi_{O_2}$	Wilgotność tlenu wlotowego	[-]
$\psi_{H_2}$	Wilgotność wodoru wlotowego	[-]
$T_{stack}$	Temperatura stosu	[K]

Model matematyczny został zaimplementowany i dostrójony w środowisku Matlab/Simulink. Do regulacji i wizualizacji parametrów pracy stosu ognia paliwowego zaprojektowano okno GUI (ang. *Graphical User Interface*), pokazane na rysunku 1. Opracowany symulator ognia paliwowego umożliwia wykreślenie wielu różnych charakterystyk pracy m.in. zależności napięcia (tzw.

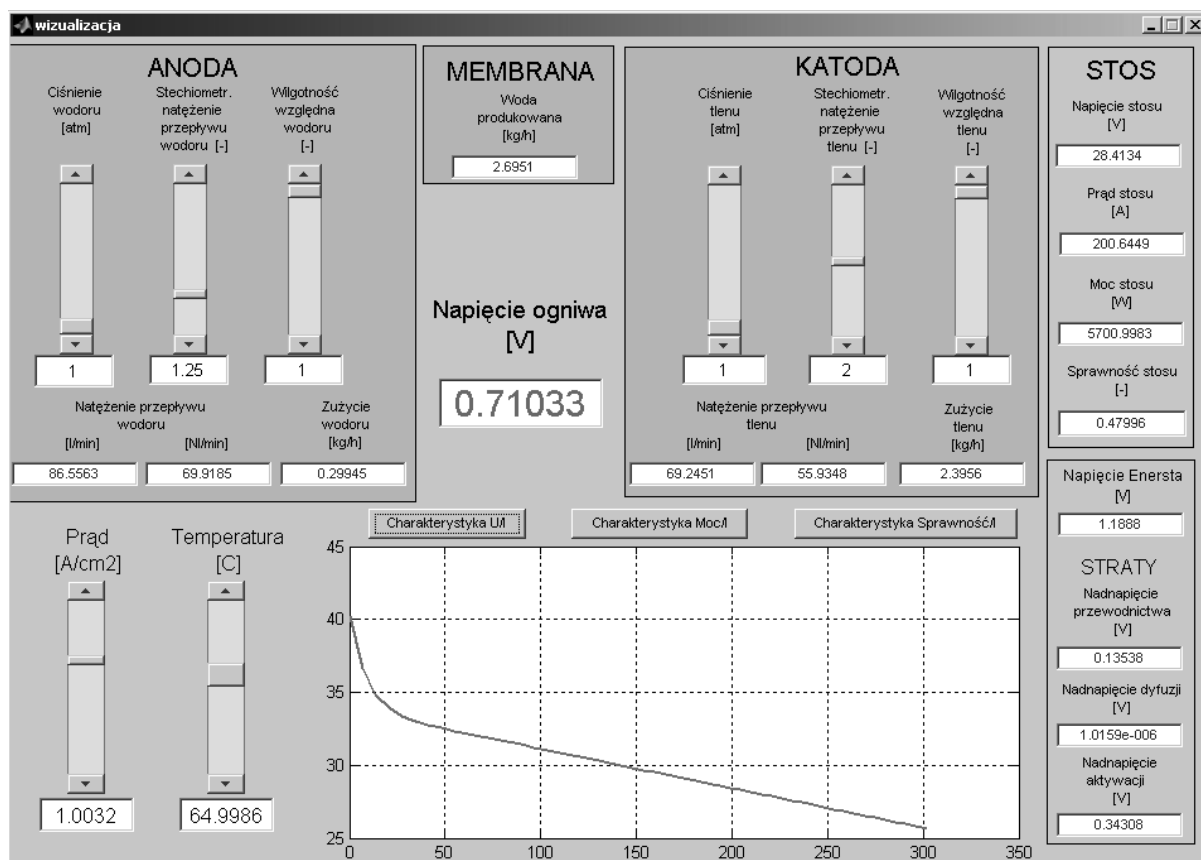
krzywa polaryzacji), mocy i sprawności stosu ognia od generowanego prądu.

### 3. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

Zaimplementowany w środowisku Matlab model matematyczny ognia paliwowego został zweryfikowany na podstawie pracy rzeczywistego stosu ognia.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk polaryzacji dla opracowanego modelu ognia w temperaturze 65°C i stosu ognia paliwowego firmy Nedstack o nr SBP200p040n001



Rys. 1. Wizualizacja parametrów pracy stosu ognia paliwowego

Na rysunku 2 zaprezentowano porównanie charakterystyk polaryzacji opracowanego modelu ogniwa paliwowego pracującego w temperaturze 65°C i eksploatacyjnego stosu ogniwa paliwowego firmy Nedstack o nr SBP200p040n001. Wspomniany stos ogniwa paliwowego firmy Nedstack posiada nominalną moc 5 kW przy zasilaniu powietrzem. Przy zasilaniu czystym tlenem uzyskuje się moc stosu równą 6,8 kW [5].

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE

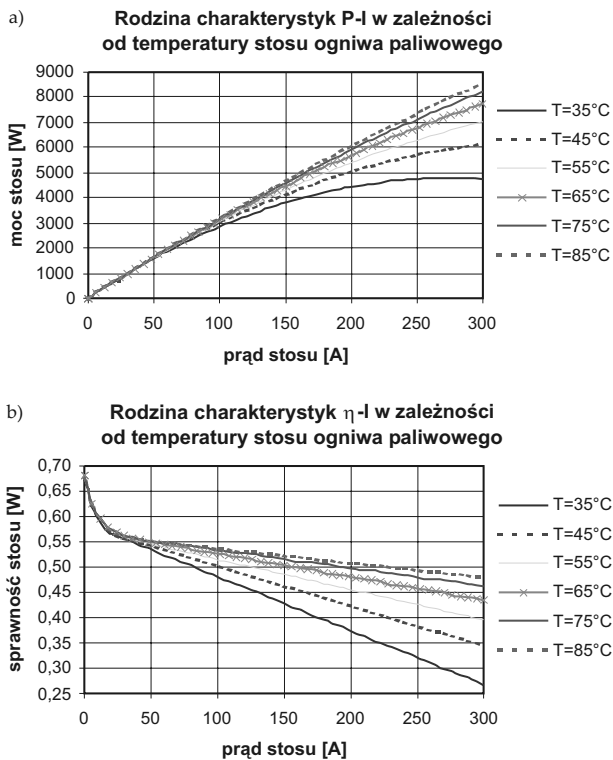
W trakcie przeprowadzonych badań symulacyjnych przebadano wpływ następujących parametrów na moc i/lub sprawność stosu ogniwa paliwowego:

- 1) temperatura stosu ogniwa,
- 2) wilgotność względna gazów reakcyjnych,
- 3) ciśnienie podawanych gazów.

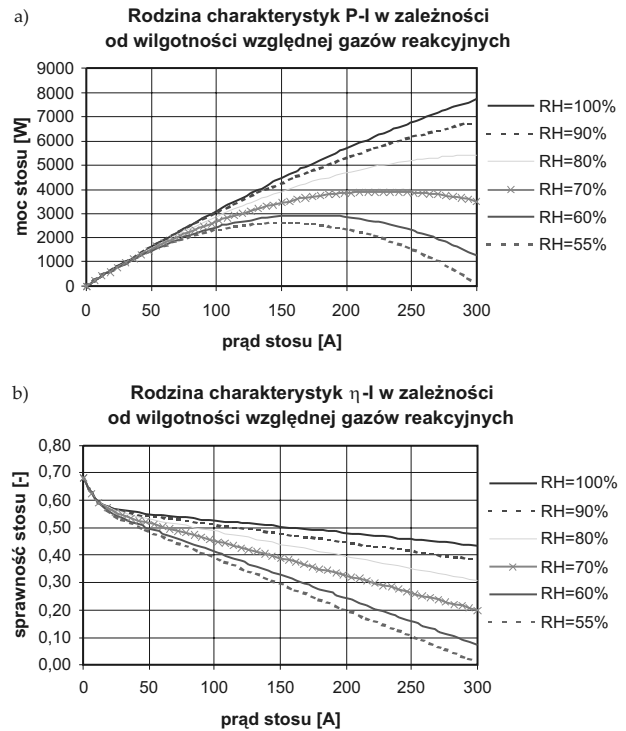
Na rysunku 3 zaprezentowano rodzinę charakterystyk zależności mocy i sprawności od prądu stosu w zależności od temperatury pracy stosu ogniwa paliwowego.

Na podstawie przedstawionych charakterystyk (Rys. 3) można stwierdzić, że zarówno moc, jak i sprawność stosu ogniwa rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Optymalne warunki pracy otrzymuje się dla zakresu temperatur 65-85°C.

Praca ogniwa w prezentowanym zakresie temperatur wpływa głównie na zmniejszenie strat związanych z przewodnictwem (rysunek poniżej), w szczególności



Rys. 3. Charakterystyki zależności a) mocy i b) sprawności od prądu stosu w zależności od temperatury pracy stosu ogniwa paliwowego



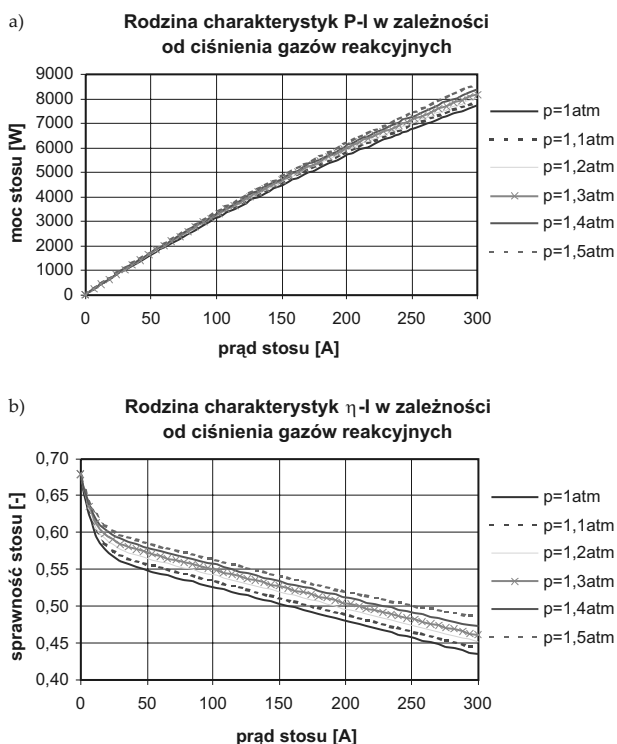
Rys. 4. Charakterystyki zależności a) mocy i b) sprawności od prądu stosu w zależności od wilgotności względnej gazów reakcyjnych

przewodnictwem jonowym, które jest ściśle związane z temperaturą oraz zawartością wody w membranie [4].

Ponadto w miarę wzrostu temperatury stosu obserwuje się zmniejszenie energii aktywacji procesów reakcyjnych i stąd też strat aktywacyjnych. Z drugiej strony zbyt wysoka temperatura powoduje wysychanie membrany i zanik przewodnictwa jonowego. Dlatego też producent zamodelowanego stosu ogniwa paliwowego określił temperaturę jego pracy na 65°C.

Na rys. 4 zaprezentowano wpływ wilgotności względnej gazów reakcyjnych na pracę stosu ogniwa. Na podstawie przedstawionych poniżej rodzin charakterystyk zauważa się, że wraz ze zmniejszeniem wilgotności względnej gazów reakcyjnych maleje zarówno moc, jak i sprawność stosu ogniwa paliwowego. Jest to związane z tym, że przewodzenie jonów wodoru przez membranę jest ściśle związane z obecnością wody, która tworzy tzw. „ścieżkę protonoprzewodzącą” w elektrolicie [2]. Mechanizm transportu protonu w membranie bywa porównywany do przemieszczania się tego jonu w wodzie. Dlatego też zapewnienie odpowiedniego nawilżenia gazów reakcyjnych, a przez to elektrolitu polimerowego jest istotne dla zapewnienia efektywnej i stabilnej pracy ogniwa paliwowego [3].

Z drugiej strony nadmiar wody w ogniwie paliwowym może powodować zatykanie warstw gazodifuzyjnych, co z kolei przyczynia się do utrudniania dostępu gazów reakcyjnych do warstwy katalizatora. Dodatkowo należy mieć na uwadze, że gromadzenie się wody w kanałach przepływowych powoduje częściowe ich zatyka-



Rys. 5. Charakterystyki zależności a) mocy i b) sprawności od prądu stosu w zależności od ciśnienia gazów reakcyjnych

nie, co prowadzi do zwiększenia różnicy ciśnień gazów wlotowych i wylotowych.

Na podstawie zaprezentowanych charakterystyk wpływu ciśnienia na pracę ogniwa paliwowego (Rys. 5) zauważa się, że zwiększanie ciśnienia gazów reakcyjnych wpływa korzystanie na moc i w mniejszym stopniu na sprawność stosu ogniwa paliwowego.

Ogólnie rzecz ujmując, zwiększone ciśnienie zmniejsza straty powodowane transportem masy w ogniwie paliwowym. Ponadto przy wzroście ciśnienia obserwuje się zwiększenia napięcia Nernsta, które bezpośrednio jest uzależnione od ciśnień parcyjnych substratów reakcji [4].

## 5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- 1) zaimplementowany symulator poprawnie odwzorowuje zachowanie się modelowanego stosu ogniwa paliwowego dla stanu ustalonego, co potwierdzają zaprezentowane charakterystyki symulacyjne porównane z charakterystykami uzyskanymi eksperymentalnie,
- 2) niezwykle istotne jest utrzymywanie wilgotności względnej gazów reakcyjnych na poziomie bliskim 100%,
- 3) równie istotna jest prawidłowa temperatura pracy stosu ogniwa paliwowego w zakresie 65-85°C, w szczególności dla obszaru dużych prądów, gdzie straty przewodzenia są znaczne,
- 4) wzrost ciśnienia gazów reakcyjnych daje wzrost mocy stosu ogniwa paliwowego.

## LITERATURA

- [1] Bujło P.: *Polimerowe, superjonowe membrany dla ogniwa paliwowych typu PEMFC*; rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2006.
- [2] Gasser F.: *An analytical, control-oriented state space model for a PEM fuel cell system*; rozprawa doktorska, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne 2006.
- [3] Nguyen P.T.: *A Three-Dimensional Computational Model of PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Channels*; University of Western Ontario, 2001.
- [4] 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.
- [5] Szymak P.: *Model matematyczny stosu ogniwa paliwowego PEM zasilanego czystym tlenem i wodorem*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Logistyka, Nr 3/2009, str. 78-79.

Data przyjęcia publikacji do druku: 08-02-2016.