

Bartosz CERAN*

Charakterystyki eksploatacyjne stosu ogniw paliwowych typu PEMFC

STRESZCZENIE. W artykule omówiono zasadę działania ogniwa paliwowego typu PEMFC (ang. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Scharakteryzowano różne typy ogniw paliwowych. Przedstawiono charakterystykę zewnętrzną ogniwa paliwowego typu PEMFC oraz krzywą mocy. Opisano trzy obszary występujące w charakterystyce zewnętrznej związane ze stratami występującymi w ogniwie paliwowym: stratami aktywacyjnymi, stratami omowymi, stratami transportu masy. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz doświadczalnych dla stosu ogniw paliwowych PEMFC. Dokonano analizy wpływu czynników, takich jak temperatura pracy ogniwa, przepłukiwanie anody (*purching*), ilość powietrza dostarczanego do katody na parametry pracy stosu ogniw PEMFC. Omówiono zarejestrowaną dynamikę pracy stosu ogniw PEMFC oraz oszacowano sprawność elektryczną badanego systemu ogniw paliwowych.

SŁOWA KLUCZOWE: ogniwa paliwowe, charakterystyka zewnętrzna stosu, sprawność

Wprowadzenie

Ogniwa paliwowe są uznawane za jedną z najbardziej obiecujących i perspektywicznych technologii wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Przewiduje się ich zastosowanie dla małych źródeł rozproszonych, jak i elektrowni dużych mocy. Ogniwa paliwowe mogą być eksploatowane w szerokim zakresie zmienności obciążeń elektrycznych, przy zachowaniu

* Mgr inż. – Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Poznań.

wysokiej sprawności przetwarzania energii pierwotnej na użyteczną. Technologie ogniw paliwowych otwierają nowe perspektywy rozwoju rozproszonych źródeł skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej.

Przykładem systemu kogeneracyjnego zbudowanego na bazie ogniw paliwowych jest produkt firmy Panasonic o nazwie *Ene Farm* (www.fuelcelltoday.com). Jest to mała przydomowa elektrociepłownia. System charakteryzuje się wysoką energooszczędnością, wysoką sprawnością wytwarzania energii elektrycznej – 40% i ciepła – 50% oraz niewielką przestrzenią instalacyjną. W wyniku trzęsienia Ziemi, które nawiedziło Japonię w 2011 roku i spowodowało katastrofę elektrowni jądrowej Fukushima, nastąpił szybki wzrost sprzedaży systemu *Ene Farm* na terenie tego kraju. Japończycy chcieli odciążyć system elektroenergetyczny. Obecnie w Japonii zainstalowanych jest ponad 20 tysięcy takich jednostek.

Koszty pracy ogniw typu PEMFC (ang. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* – ogniwo zasilane wodorem, w którym elektrolit został zastąpiony membraną polimerową) są związane z kosztami produkcji paliwa, jakim jest wodór oraz z kosztami materiałów przeznaczonych do budowy ogniwa, głównie platynowego katalizatora. Wprowadzanie technologii ogniw paliwowych do energetyki rozproszonej wymaga pokonania wielu barier technologicznych, takich jak rozwój technologii wytwarzania wodoru porównywalnej ekonomicznie z wykorzystywaniem paliw kopalnych. Bardzo ważnym aspektem jest także rozwój technologii magazynowania i bezpiecznego przesyłania wodoru oraz wykorzystanie wodoru po produkcji energii elektrycznej w ogniwie paliwowym. Kluczową drogą do rozwiązania problemu jest rozwój zagadnień materiałowych mających na celu poprawę technologii np. przedłużenie żywotności danej jednostki i obniżenia kosztów eksploatacji. Należy pamiętać, że to właśnie rozwój technologii ogniw paliwowych będzie głównym motorem napędowym rozwoju sektora energetyki wodorowej (Molenda 2008). Istotne znaczenie będzie także miała edukacja społeczeństwa, ponieważ obecnie wodór wielu ludziom kojarzy się wyłącznie z wybuchami („syndrom Hindenburga”).

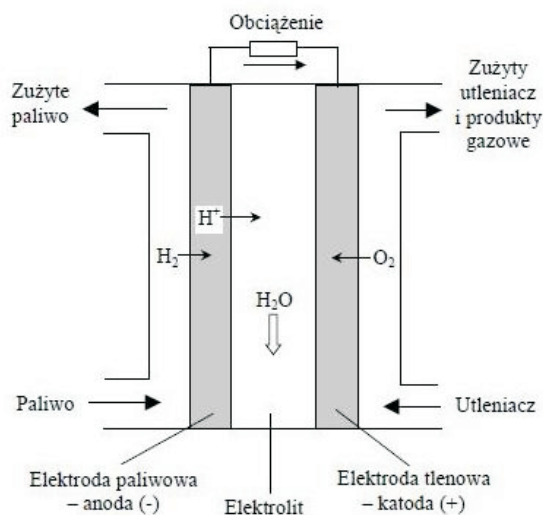
1. Ogniwa paliwowe

Ogniwo paliwowe jest elektrochemicznym urządzeniem, które przetwarza energię chemiczną bezpośrednio w energię elektryczną. Brak pośrednich przemian prowadzących do powstania energii mechanicznej pozwala na uzyskanie wysokiej sprawności wytwarzania energii elektrycznej. Zasada działania ogniwa paliwowego typu z jonowymienną membraną polimerową została zilustrowana na rysunku 1 (Paska 2010).

Paliwo (wodór) doprowadzane jest w sposób ciągły do anody, a utleniacz dostarczany jest do katody. Elektrolitem w ogniwie paliwowym PEM jest membrana polimerowa przewodząca protony. Anoda pokryta jest katalizatorem, dzięki któremu zachodzi dysocjacja wodoru na protony (jony H^+) i elektrony:

✧ reakcja na anodzie: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$.

Jony H^+ przechodzą przez membranę polimerową przewodzącą protony, która jest izolatorem dla elektronów. Elektrony przepływają przez zewnętrzny obwód, tworząc prąd zew-



Rys. 1. Zasada działania ogniwa paliwowego typu PEMFC

Fig. 1. The rule of working of a PEM fuel cell

nętrzny ogniwa. Na katodzie protony i elektrony reagują z tlenem dając wodę, która jest jedynym produktem ubocznym ogniwa paliwowego PEM.

✧ reakcja na katodzie: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$.

Zatem w ogniwie następuje łączenie wodoru i tlenu w wodę z wydzieleniem się energii, czyli jedynym produktem ubocznym pracy ogniwa jest czysta woda.

✧ reakcja sumaryczna: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{energia}$.

Do zalet ogniw paliwowych należą: wysoka sprawność w szerokim zakresie obciążeń, bardzo mała emisja gazów cieplarnianych, niski poziom hałasu, modułowa budowa, możliwość pracy z niskimi obciążeniami (Tomczyk 2009), możliwość pracy rewersyjnej, bardzo dobre możliwości regulacji. Główną wadą są wysokie nakłady inwestycyjne pojedynczych ogniw paliwowych, których elektrody muszą być pokrywane platyną oraz degradacja właściwości ogniwa w miarę jego eksploatacji (Paska 2010). Pojedyncze ogniwo ma napięcie poniżej 1 V, co jest nieużyteczne dla większości odbiorników energii elektrycznej. Moc elektryczna pojedynczego ogniwa nie przekracza 1 W, dlatego łączy się je w moduły od kilku do kilkudziesięciu ogniw, z których buduje się tzw. stos ogniw paliwowych.

Głównym kryterium technologicznym podziału ogniw paliwowych wodorowo-tlenowych jest rodzaj zastosowanego elektrolitu. Zastosowany elektrolit określa nie tylko temperaturę pracy ogniwa, a także, pośrednio i bezpośrednio, skład i budowę elektrodowych materiałów katalitycznych. Ze względu na to kryterium wyróżnia się pięć zasadniczych rodzajów ogniw paliwowych wodorowo-tlenowych (Wójcik, red. 2005).

Najczęściej stosowanym paliwem dla ogniw paliwowych jest wodór, niemniej jednak istnieją ogniwa paliwowe, które nie muszą być zasilane wodorem bezpośrednio. Do grupy ogniw paliwowych zasilanych paliwem innym niż wodór należą ogniwa z bezpośrednim utlenianiem metanolu DMFC (ang. *Direct Methanol Fuel Cell*). Na świecie są również pro-

TABELA 1. Rodzaje ogniw paliwowych (Paska 2010)

TABLE 1. Different types of fuel cells

Wyszczególnienie	AFC	PAFC	PEFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	roztwór wodorotlenku potasu KOH	stężony kwas fosforowy H_3PO_4	membrana polimerowa	mieszanina węglanów alkalicznych (Li, K, Na)	nieporowaty stały tlenek metalu, najczęściej cyrkonu (ZrO_2), stabilizowany tlenkiem itru (Y_2O_3)
Temperatura pracy [°C]	80–120	ok. 200	80–140	650	800–1000
Nośnik ładunku	jony OH	jony wodoru	jony wodoru	jony węglanu	jony tlenu
Paliwo	wodór, metan, hydrazyna N_2H_4	wodór, gaz ziemny, metanol, biogaz;	wodór	gaz ziemny, metanol, biogaz; paliwo poddane reformingowi wewnętrznemu i zewnętrznemu	gaz ziemny, biogaz, paliwo poddane reformingowi wewnętrznemu i zewnętrznemu
Utleniacz	tlen	tlen	tlen	tlen dwutlenek węgla	tlen
η [%]	40–50	40–50	40–50	>60	>60
Zakres mocy	100 W–200 kW	200 kW–10 MW	100 W–10 MW	>100 MW	>10 MW
Zastosowanie	badania kosmosu	źródła rozproszone	napęd, źródła rozproszone	źródła scentralizowane	źródła scentralizowane

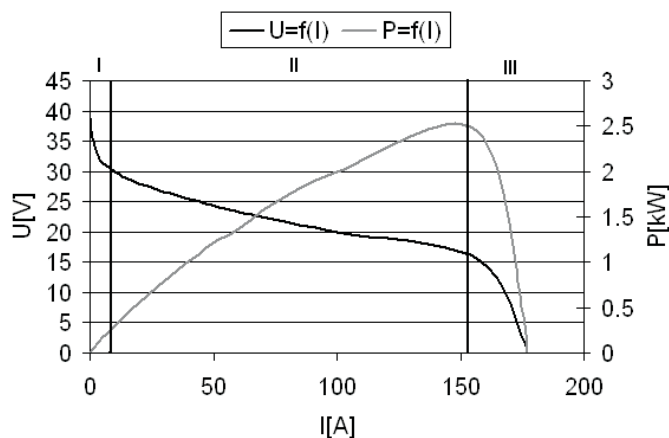
*AFC (ang. *Alkaline Fuel Cell*) – ogniwa paliwowe z elektrolitem zasadowym, PAFC – (ang. *Phosphoric Acid Fuel Cell*) – ogniwa paliwowe z kwasem fosforowym, PEMFC (ang. *Proton exchange membrane Fuel Cell*) – ogniwa paliwowe z jonowymienną membraną polimerową, MCFC (ang. *Molten Carbonate Fuel Cell*) – ogniwa paliwowe z elektrolitem ze stopionych węglanów, SOFC (ang. *Solid Oxide Fuel Cell*) – ogniwa paliwowe z elektrolitem ze stałych tlenków.

wadzone badania nad węglowym ogniem paliwowym DCFC (ang. *Direct Carbon Fuel Cell*), które jest zasilane bezpośrednio paliwami bogatymi w pierwiastek C. Ogniwo węglowe jest szczególnym przypadkiem ogniwa średnotemperaturowego z alkalicznym elektrolitem (Kobyłecki i Bis 2008).

2. Charakterystyka zewnętrzna ogniwa paliwowego typu PEM

Ze strony eksploatacyjnej ogniw paliwowych bardzo istotna jest charakterystyka zewnętrzna ogniwa paliwowego i odpowiadająca jej krzywa mocy. Na rysunku 2 przedstawiono przy-

kładową charakterystykę stosu ogniwi paliwowych o mocy znamionowej 1,2 kW i mocy maksymalnej 2,5 kW. Charakterystyka została opracowana na podstawie gotowego modelu ogniwa paliwowego typu PEMFC o mocy 1,26 kW zamieszczonego w bibliotece *simpowersystem* środowiska Matlab/Simulink.



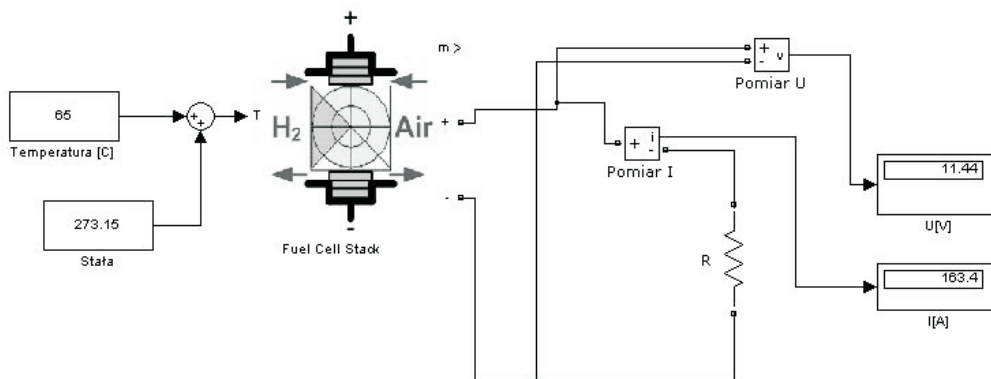
Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna i krzywa mocy ogniwa paliwowego

Fig. 2. The external characteristics and power curve of a fuel cell

Przedstawiony na rysunku 2 wykres został podzielony na trzy obszary. W ogniwie wyróżnia się 3 rodzaje strat: straty aktywacyjne, straty związane ze spadkiem napięcia wywołane rezystancją wewnętrzną ogniwa – straty omowe oraz straty masowe. Spadek napięcia w obszarze I spowodowany jest stratami aktywacyjnymi, związanymi z powolnością procesów zachodzących na elektrodach ogniwa. W obszarze II napięcie spada liniowo ze wzrostem natężenia prądu. Spowodowane jest to rezystancją wewnętrzną ogniwa tj. rezystancją elektrod i elektrolitu. Aby nie dochodziło do dużych strat mocy, rezystancja elektrolitu powinna być możliwie mała. Obszar III, przy najwyższych wartościach natężenia prądu, nosi nazwę obszaru strat transportu masy. Straty te pojawiają się, gdy gazy w kontakcie z katalizatorem i elektrodą są zużywane szybciej niż mogą do nich dotrzeć, tzn. przy obciążeniu elektrycznym ogniwa przekraczającym jego znamionowe wartości. Konsekwencją tego zjawiska jest nagły spadek napięcia.

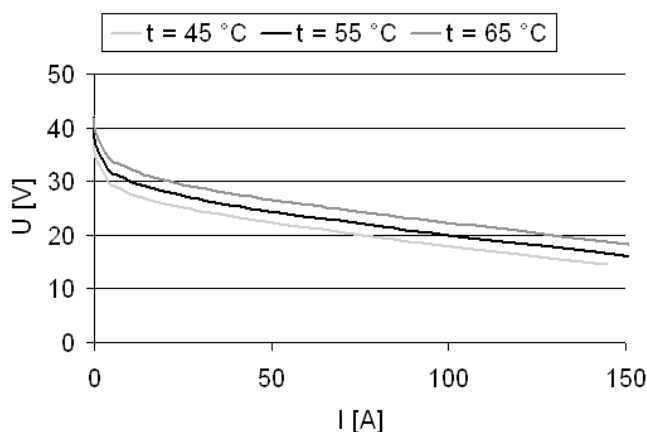
Zmiana temperatury pracy wpływa na charakterystykę zewnętrzną ogniwa (rys. 4). Na podstawie modelu ogniwa paliwowego typu PEMFC o mocy 1,26 kW zamieszczonego w bibliotece *simpowersystem* środowiska Matlab/Simulink opracowano i porównano charakterystyki zewnętrzne dla trzech wartości temperatury pracy 45°C, 55°C i 65°C. Zamodelowany układ pomiarowy zaprezentowano na rysunku 3a wyniki badań symulacyjnych na rysunku 4.

Przy obniżonej temperaturze pracy zwiększają się straty aktywacyjne. Charakterystyka napięciowo prądowa jest przesunięta w dół, względem charakterystyki przy nominalnej wartości temperatury 55 °C. Z kolei podniesiona temperatura pracy ogniwa wpływa na zmniejszenie polaryzacji aktywacyjnej. Charakterystyka przesunęta w górę względem charakterystyki dla temperatury znamionowej. Należy pamiętać, że zbyt wysoka temperatura spowoduje wy-



Rys. 3. Model ogniwa paliwego PEMFC i układu pomiarowego w środowisku Matlab/Simulink

Fig. 3. Implementation of a PEM fuel cell model and measuring circuit in Matlab/Simulink environment



Rys. 4. Wpływ temperatury pracy ogniwa na charakterystykę zewnętrzną

Fig. 4. The effect of temperature on external characteristics

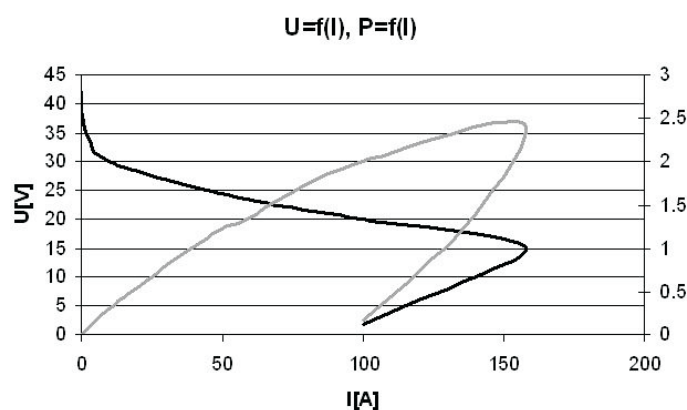
schnięcie membrany, czego konsekwencją będzie zanik przewodnictwa jonowego. Poza tym przy zwiększonej temperaturze pracy wzrośnie ciśnienie pary w materiale elektrolitu, a to może spowodować uszkodzenie mechaniczne ogniwa.

Aby poprawnie wyznaczyć charakterystykę zewnętrzną stosu ogniw paliwowych należy pamiętać o tym, że pomiary powinny być wykonywane w ustalonym stanie temperaturowym tzn. przy stałej wartości temperatury pracy stosu, dla której wyznaczana jest charakterystyka.

Systemy ogniw paliwowych typu PEM oparte na reformingu paliwa wymagają dwóch godzin do podgrzania reformatora, aby osiągnąć nominalną temperaturę pracy, natomiast systemy zasilane bezpośrednio czystym wodorem wymagają kilku minut od uruchomienia, ale nie powinny pracować przy pełnym obciążeniu, aż do uzyskania znamionowej wartości temperatury pracy tj. 50–70°C w przypadku ogniw paliwowych typu PEMFC. Ciepło wytwarzane podczas pracy stosu jest wystarczające do utrzymania temperatury pracy, a jego nadmiar jest

usuwany lub wykorzystywany do celów grzewczych, w takim stopniu, aby temperatura pracy systemu była stabilna.

Istotne znaczenie podczas wyznaczania charakterystyki zewnętrznej stosu ogniw paliwowych ma zastosowanie układu „przepłukiwania” anody w czasie pracy, tzw. *purching*, który ma na celu oczyszczenie anody z wszelkich zabrudzeń. Celem stosowania „przepłukiwania” jest utrzymanie przewodności jonowej stosu, a w konsekwencji utrzymanie wymaganej wartości generowanego prądu. W praktyce przepłukiwanie realizuje się za pomocą elektrozaworu zainstalowanego na wylocie wodoru z systemu ogniw paliwowych, który otwiera się, co pewien czas powodując zasanie wodoru, który czyści kanały anodowe. Przeprowadzanie pomiarów bez „przepłukiwania” anody, może spowodować utratę przewodności jonowej w czasie pracy, co będzie skutkowało spadkiem wartości natężenia generowanego prądu, a to spowoduje zniekształcenie charakterystyki zewnętrznej stosu i uzyskanie fałszywych rezultatów (rys. 5).



Rys. 5. Utrata przewodności jonowej podczas pracy stosu

Fig. 5. Loss of ionic conductivity during operation fuel cell stack

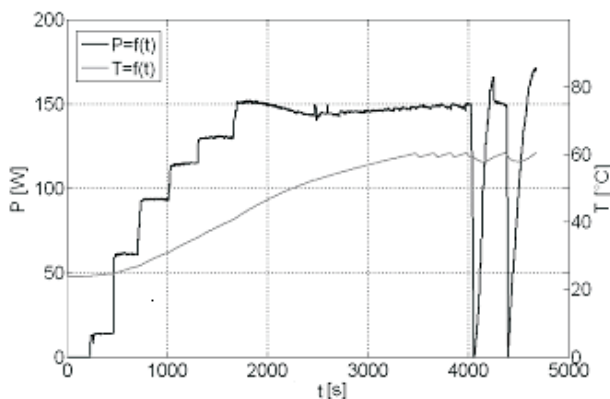
3. Badanie stosu ogniw paliwowych typu PEM

W rozdziale zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych na stosie ogniw paliwowych typu PEMFC firmy Inhouse Engineering o następujących parametrach: moc znamionowa 300 W, napięcie jałowe pojedynczego ogniwa 0,9 V, nominalna temperatura pracy 60°C, liczba ogniw – 5. Obciążeniem stosu w czasie pomiarów było urządzenie elektroniczne DC-LOAD pozwalające płynnie regulować prąd obciążenia w zakresie od 0 do 60 amperów. Ze względu na lata eksploatacji badany stos osiągał połowę mocy znamionowej 150 W.

Jak opisano w rozdziale 2 pomiary mające na celu wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej stosu ogniw paliwowych należy przeprowadzić przy stałej wartości temperatury pracy stosu oraz stosować „przepłukiwanie”, aby nie utracić przewodności jonowej.

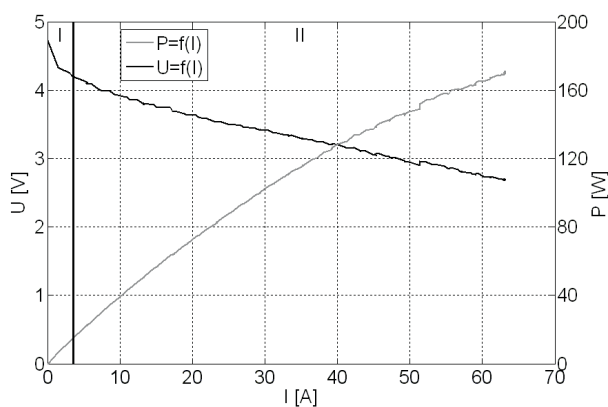
Na wykresie 6 pokazano przebieg wartości temperatury pracy ogniwa. Pomiary wykonano po osiągnięciu przez stos nominalnej temperatury pracy równej 60°C. Na rysunku 7 przed-

stawiono wyznaczoną charakterystykę zewnętrzną i odpowiadającą krzywą mocy wyznaczone dla nominalnej temperatury pracy stosu. Zaznaczono dwa obszary, obszar strat aktywacji I i obszar strat omowych II. W obszarze trzecim nie wykonywano pomiarów, ponieważ obciążanie stosu największymi prądami nie jest zalecane gdyż skraca żywotność stosu.



Rys. 6. Przebiegi generowanej mocy i wartości temperatury pracy stosu

Fig. 6. Waveforms of generated power and operating temperatures of the stack

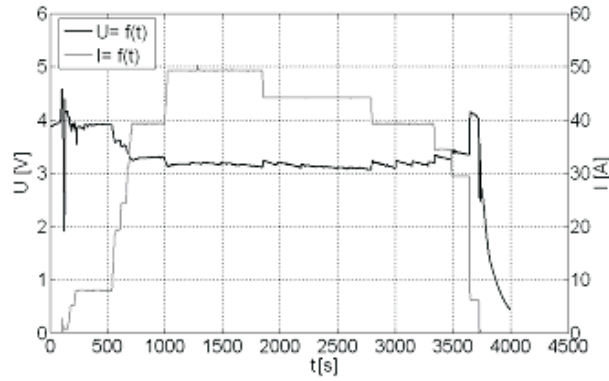


Rys. 7. Charakterystyka zewnętrzna i krzywa mocy stosu

Fig. 7. External characteristics and the power curve of the stack

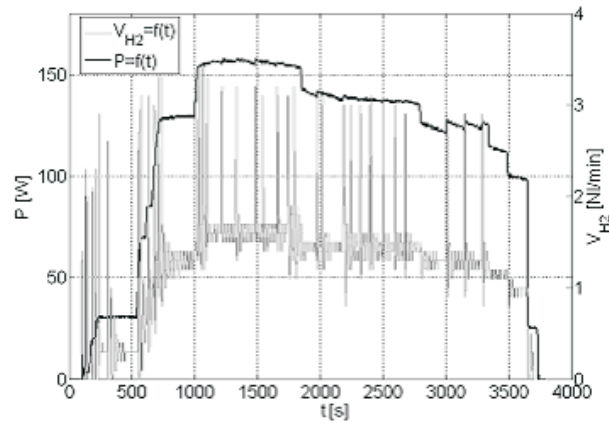
Kolejne pomiary, mające na celu zbadanie dynamiki pracy stosu i wyznaczenie jego sprawności wytwarzania energii elektrycznej w stanie ustalonym, przeprowadzono w różnych punktach odcinka prostego charakterystyki zewnętrznej $U=f(I)$ tzn. w obszarze strat omowych stosu ogniwi paliwowych. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przebiegi mierzonego napięcia i prądu.

Rejestrowane napięcie jest sumą algebraiczną napięć wszystkich pięciu pojedynczych ogniwi. Stos ogniwi paliwowych szybko dostosowuje się do zmiany obciążenia, odpowiedź stosu



Rys. 8. Przebiegi mierzonego napięcia i natężenia prądu

Fig. 8. Waveforms of the measured voltage and intensity of current



Rys. 9. Przebiegi generowanej mocy i zużywanego wodoru

Fig. 9. Waveforms of generated power and consumed hydrogen

na zmianę obciążenia zachodzi praktycznie natychmiastowo. Proporcjonalnie do wzrostu obciążenia zwiększa się zużycie paliwa – wodoru (rys. 9). Widoczne „piki” na zarejestrowanym przebiegu zużytego wodoru są efektem automatyki systemu ogniw PEM, która co pewien czas wykonuje wspomniane „przeplukiwanie” anody.

Zużycie wodoru przez stos ogniw można wyznaczyć z zależności.

$$V_{H2} = 22,42 \frac{I \cdot n_{ogniw}}{2 \cdot F} \left[\frac{\text{Ndm}^3}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

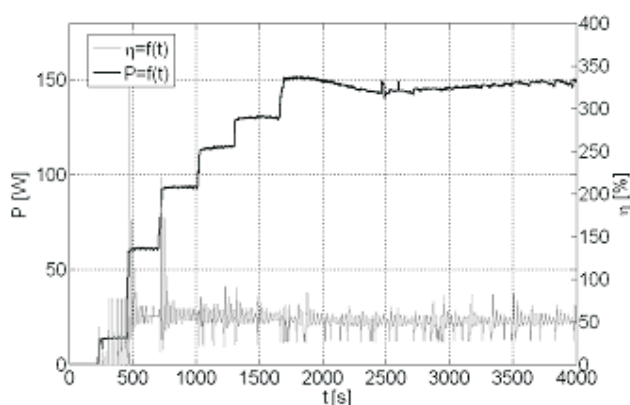
gdzie: V_{H2} – przepływ dostarczanego wodoru do anody [Ndm^3/s],
 I – natężenie prądu [A],

- n – liczba pojedynczych ogniw w stosie,
- z – ładunek jonu,
- F – stała Faradaya [C/mol].

Sprawność wytwarzania mocy elektrycznej badanego stosu odniesioną do energii chemicznej paliwa można obliczyć z zależności:

$$\eta_{el} = \frac{P_{sr_el}}{V_{sr_H2} \cdot Q_{wH2}} 100 \quad [\%] \quad (2)$$

- gdzie: η_{el} – sprawność elektryczna stosu,
 P – moc elektryczna [W],
 V_{H2} – przepływ zużywanego wodoru [Ndm³/s],
 Q_{wH2} – wartość opałowa wodoru [MJ/ Ndm³]



Rys. 10. Przebiegi generowanej mocy i sprawności elektrycznej stosu

Fig. 10. Waveforms of generated power and electrical efficiency of the stack

Sprawność przetwarzania energii chemicznej zawartej w wodorze na energię elektryczną w ustalonym stanie pracy stosu wynosi około 50%.

Przebadano także wpływ ilości powietrza dostarczanego do katody na parametry pracy stosu (tab. 2). Powietrze do kanału katody dostarczane jest przez kompresor, który pozwala na regulację współczynnika nadmiaru powietrza λ . Ilość dostarczanego powietrza można obliczyć ze wzoru.

$$V_{pow} = \frac{22,42}{0,21} \cdot \lambda \cdot \frac{I \cdot n_{ogniw}}{4 \cdot F} \quad \left[\frac{\text{Ndm}^3}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

- gdzie: V_{pow} – przepływ dostarczanego powietrza do katody [Ndm³/s],

- I – natężenie prądu [A],
- n – liczba pojedynczych ogniw w stosie,
- z – ładunek jonu,
- F – stała Faradaya [C/mol],
- λ – współczynnik nadmiaru powietrza doprowadzanego do stosu.

TABELA 2. Wyniki pomiarów

TABLE 2. The results of the measurements

Temperatura pracy [°C]	Współczynnik λ	Moc elektryczna [W]
60	3,2	162,95
60	3,7	166,38
60	4,2	169,65
60	4,7	171,26

Ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza λ rośnie moc generowana stosu, jednak należy pamiętać, że kompresor jest urządzeniem potrzebującym własnych, które pobiera najwięcej mocy i pomimo wyższej wartości sprawności samego ogniwa (sprawność brutto), sprawność netto systemu może być mniejsza.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne i doświadczalne dla stosu ogniw paliwowych PEMFC pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- ✧ charakterystykę zewnętrzną stosu PEMFC należy wyznaczać przy stałej wartości temperatury pracy stosu, ponieważ zmiana wartości temperatury pracy wpływa na przebieg charakterystyki,
- ✧ przeprowadzanie pomiarów bez „przepłukiwania” anody, może spowodować utratę przewodności jonowej w czasie pracy, co będzie skutkowało spadkiem wartości natężenia generowanego prądu,
- ✧ stos ogniw paliwowych typu PEMFC wytwarza energię elektryczną ze sprawnością około 50%,
- ✧ ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza λ rośnie moc generowana przez stos PEMFC.

Literatura

- [1] KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2008. Węglowe ogniwo paliwowe – wyso- kosprawne źródło czystej energii elektrycznej. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 11, z. 1, s. 219–226.
- [2] MOLENDĄ, J. 2008. Energetyka Wodorowa – Technologie i Perspektywy. Raport Ekspertów Sektora OZE.
- [3] PASKA, J. 2010. *Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [4] TOMCZYK, P. 2009. Szanse i bariery rozwoju energetyki wodorowej. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 12, z. 2/2, s. 593–606.
- [5] WÓJCIK, W. (red.) 2005. *Nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii*. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin.
- [6] <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2013/january/tokyo-gas-and-panasonic-launch-smaller,-more-efficient-and-cheaper-ene-farm-residential-fuel-cell>

Bartosz CERAN

Operational characteristics of PEM fuel cells

Abstract

This paper presents the results of tests on a fuel cell system with a proton exchange polymer membrane (PEM), describing the principle of operation of the PEM fuel cell. The advantages and disadvantages of fuel cells are also described, along with a presentation of the various types of fuel cells. The paper presents an external characteristic of a fuel cell as well as the curve of power utilization has been presented. Three loss areas result from the external characteristics as follows: activation losses, ohm losses, and mass transport losses. Further, it is necessary to consider the influence of the temperature of a working cell. The external characteristic of a fuel cell stack were determined by measurements. The paper further examines the effect of purging the anode on the functioning of the stack, the dynamics of that functioning, the electrical efficiency of the stack, and the impact of the coefficient of excess air on the working of the stack.

KEY WORDS: fuel cells, the external characteristics of the stack, electric efficiency