

# Modelowanie właściwości ogniw paliwowych typu PEM z wykorzystaniem środowiska Matlab/Simulink

Bartosz Ceran

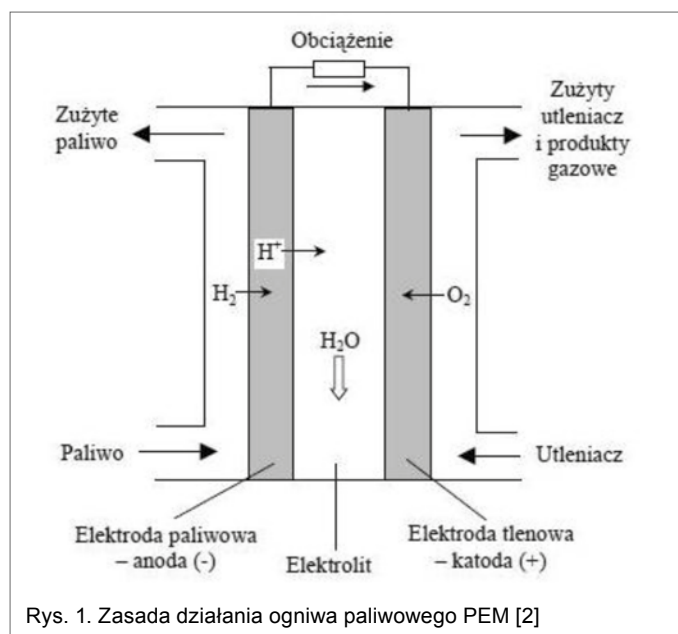
Ogniwa paliwowe są elektrochemicznymi urządzeniami, w których zachodzi bezpośrednia przemiana energii chemicznej w energię elektryczną. Sposób przetwarzania jednej formy energii w drugą jest istotną zaletą ogniw paliwowych, gdyż daje on możliwość osiągnięcia wysokiej sprawności procesu konwersji energii, która nie jest ograniczona sprawnością obiegu Carnota. Do zalet ogniw paliwowych należą: wysoka sprawność, bardzo mała emisja gazów cieplarnianych, niski poziom hałasu, modułowa budowa, możliwość pracy z niskimi obciążeniami, możliwość pracy rewersyjnej, bardzo dobre możliwości regulacji. Główną wadą są wysokie koszty pojedynczych ogniw paliwowych, których elektrody muszą być pokrywane platyną, aby mogły spełniać funkcję produkcji energii elektrycznej.

Duże nakłady inwestycyjne przeznaczane na badania i rozwój ogniw na całym świecie pozwalają sądzić, że w przyszłości źródła te będą powszechnie stosowane w generacji rozproszonej [1].

## Zasada działania na przykładzie ogniwa PEM<sup>2</sup>

Na rys. 1 przedstawiono zasadę działania ogniwa paliwowego typu PEM.

Paliwo doprowadzane jest w sposób ciągły do anody, a utleniacz dostarczany jest do katody. Elektrolitem w ogniwie paliwowym PEM jest membrana polimerowa przewodząca protony. Anoda jest katalizatorem dla dysocjacji wodoru na protony (jony  $H^+$ ) i elektrony. Jony  $H^+$  przechodzą przez membranę po-



**Streszczenie:** W artykule przedstawiono model ogniwa paliwowego (ang. *Fuel Cell*) zaimplementowanego w środowisku Matlab/Simulink. Omówiono zasadę działania ogniwa paliwowego PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*). Przedstawiono charakterystykę napięciowo-prądową ogniwa oraz krzywą mocy. Zbadano wpływ temperatury pracy oraz ciśnienia wodoru na parametry elektryczne ogniwa.

**Abstract:** In this article the model of a fuel cell implemented in the Matlab/Simulink environment has been presented. The principle of operating of a proton exchange membrane fuel cell has been described here. A voltage – current characteristic of a cell and curve of power has been presented. The influence of temperature of a working cell on has been studied.

limerową przewodzącą protony, która jest izolatorem dla elektronów. Elektrony przepływają przez zewnętrzny obwód, tworząc prąd zewnętrzny ogniwa. Na katodzie protony i elektrony reagują z tlenem, dając wodę, która jest jedynym produktem ubocznym ogniwa paliwowego PEM.

Poniżej przedstawiono reakcje chemiczne zachodzące na anodzie i katodzie oraz reakcję sumaryczną:

- reakcja na anodzie:  $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ ,
- reakcja na katodzie:  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ ,
- reakcja sumaryczna:  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ .

Pojedyncze ogniwo ma napięcie poniżej 1 V, dlatego łączy się wiele pojedynczych ogniw w tzw. stosy. Stos składa się z pojedynczych elementów, z których każdy zawiera anodę, katodę i matrycę elektrolitową.

## Zastosowanie ogniw paliwowych

Ogniwa paliwowe znajdują zastosowanie w następujących dziedzinach przemysłu:

- układy napędowe, środki transportu, komunikacja. Ogniwa stosowane w pojazdach muszą cechować się stabilną pracą przy zmiennym obciążeniu, krótkim czasem rozruchu oraz nie mogą generować zbyt wysokiej temperatury. Te wymagania najlepiej spełniają ogniwa paliwowe typu PEM. Produkują je bezzałogowe samoloty, motory oraz wózki inwalidzkie zasilane ogniwami;
- źródła energii dla urządzeń przenośnych (telefony komórkowe, laptopy, kamery cyfrowe, przenośne urządzenia wojskowe). Ze względu na niską temperaturę pracy do tego typu rozwiązań wykorzystuje się ogniwa typu DMFC<sup>3</sup> i ogniwa typu PEM;

Tabela 1. Porównanie ogniw paliwowych różnych typów [2, s. 122]

	AFC	PAFC	PEFC	MCFC	SOFC
elektrolit	roztwór wodorotlenku potasu KOH	stężony kwas fosforowy $H_3PO_4$	membrana polimerowa	mieszanka 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 (powietrze)	tlen (powietrze)	tlen (powietrze)	tlen (powietrze), dwutlenek węgla	tlen (powietrze)
katalizator	platyna	platyna	platyna	nikiel	metatynian wapnia
sprawność [%]	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
stan opracowania	działające	działające	działające	prototypowe	prototypowe

- systemy stacjonarne – generacja rozproszona. W układach tych, ze względu na wysoką temperaturę pracy, wykorzystuje się najczęściej ogniwa wysokotemperaturowe MCFC<sup>4</sup> i SOFC<sup>5</sup>;
- robotyka – ogniwa paliwowe znajdują zastosowanie jako źródła energii elektrycznej dla robotów [5].

### Implementacja modelu ogniwa paliwowego w środowisku Matlab/Simulink

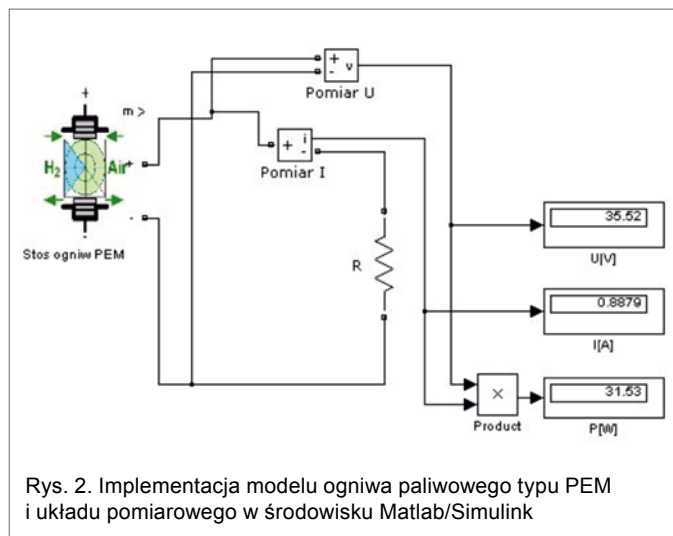
Ze względu na wysokie koszty ogniw paliwowych wiele badań wykonuje się za pomocą programów komputerowych, które pozwalają symulować pracę ogniwa. Modelowanie pozwala nie tylko zaoszczędzić czas, ale również wykonać badania trudne do zrealizowania na stanowisku badawczym. Ze względu na takie cechy ogniw paliwowych typu PEM, jak niska temperatura pracy, szybki start, brak emisji zanieczyszczeń i hałasu oraz stała postać elektrolitu (membrana), autor zajął się przeprowadzeniem symulacji tego typu ogniwa.

Biblioteka SimPowerSystems programu Matlab/Simulink pozwala na budowanie modeli ogniw paliwowych, dzięki którym można badać podstawowe ich właściwości.

W środowisku tym zasymulowano stos ogniw paliwowych typu PEM o następujących parametrach:

- moc znamionowa 1,26 kW;
- napięcie jałowe stosu ogniw 42 V;
- liczba ogniw 42;
- sprawność znamionowa 46%;
- znamionowa temperatura pracy 55°C;
- ciśnienie wodoru 1,5 bara.

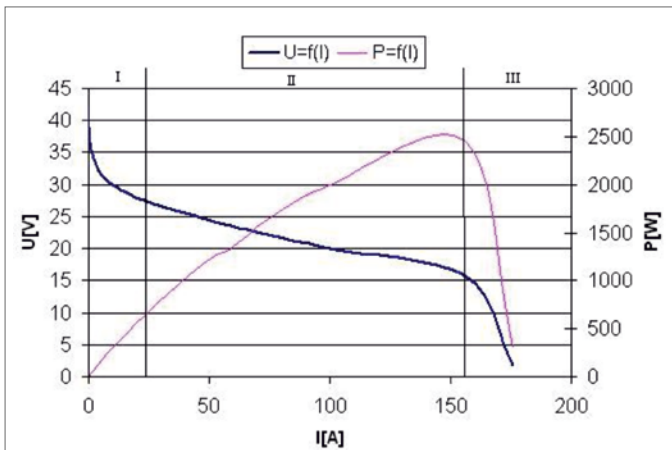
Poznanie charakterystyki napięciowo-prądowej pomaga w optymalizacji punktu pracy ogniwa i doborze pozostałych komponentów do budowy systemu generowania mocy.



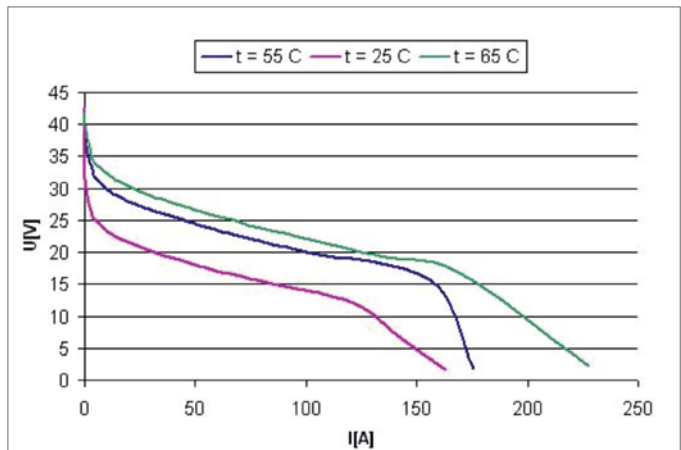
Rys. 2. Implementacja modelu ogniwa paliwowego typu PEM i układu pomiarowego w środowisku Matlab/Simulink

W środowisku Matlab/Simulink za pomocą biblioteki SimPowerSystem zasymulowano układ pomiarowy ogniwa paliwowego, który służy do wyznaczania charakterystyki napięciowo-prądowej ogniwa oraz krzywej mocy. Zbadano wpływ temperatury pracy ogniwa oraz wpływ ciśnienia wodoru na charakterystykę napięciowo-prądową  $U = f(I)$ .

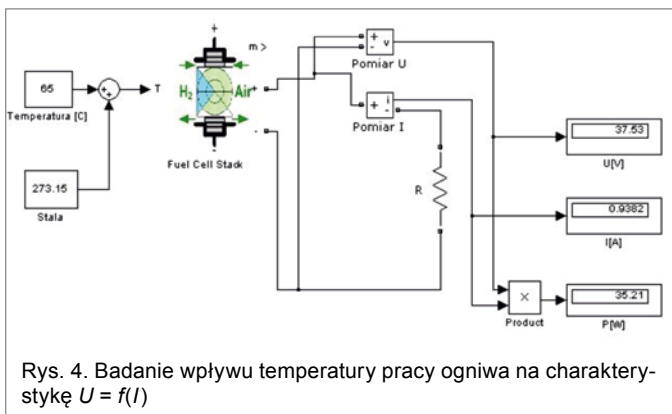
Przedstawiony na rys. 3 wykres został podzielony na trzy obszary. W ogniwie wyróżnia się trzy rodzaje strat: straty aktywacji, straty związane ze spadkiem napięcia wywołane rezystancją wewnętrzną ogniwa oraz straty masowe. Spadek napięcia („W elektrotechnice teoretycznej pojęcie strat napięcia dotyczy jedynie prądu przemiennego. W teorii ogniw paliwowych za straty uważa się spadki napięcia wywołujące zmniejszenie siły elektromotorycznej podczas przepływu prądu stałego” [6]) w obszarze I jest skutkiem tzw. strat aktywacji. Są



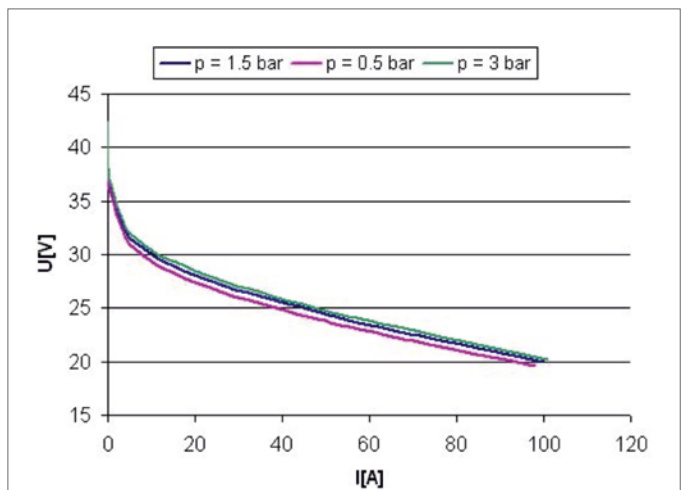
Rys. 3. Charakterystyka napięciowo-prądowa oraz krzywa mocy symulowanego ogniwa



Rys. 5. Wpływ temperatury pracy ogniwa na charakterystykę napięciowo-prądową



Rys. 4. Badanie wpływu temperatury pracy ogniwa na charakterystykę  $U = f(I)$



Rys. 6. Wpływ ciśnienia wodoru na charakterystykę napięciowo-prądową

to straty energii potrzebnej do tego, aby ładunek mógł pokonać warstwę elektryczną powstałą na granicy elektrody i elektrolitu.

W obszarze II napięcie spada liniowo ze wzrostem natężenia prądu. Jest to obszar strat omowych, spowodowanych 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. Konsekwencją tego zjawiska jest nagły spadek napięcia [2].

### Badanie wpływu temperatury pracy ogniwa na charakterystykę napięciowo-prądową $U = f(I)$

W kolejnym etapie symulacji badano wpływ temperatury pracy ogniwa na przebieg charakterystyki  $U = f(I)$ . Symulację przeprowadzono dla temperatury znamionowej 55°C oraz dla temperatur 25°C i 65°C. Na poniższych rysunkach przedstawiono układ pomiarowy (rys. 4) oraz wyniki przeprowadzonej symulacji (rys. 5).

Zmiana temperatury pracy wpływa na moc ogniwa. Przy obniżonej temperaturze pracy zwiększają się straty aktywacyjne. Charakterystyka napięciowo-prądowa jest przesunięta w dół względem charakterystyki przy nominalnej warto-

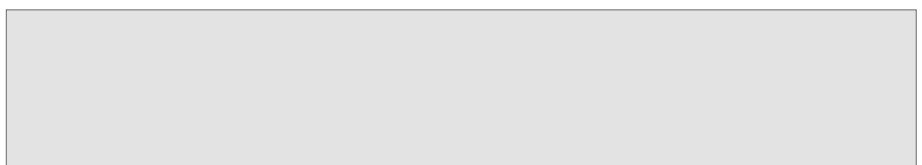
ści temperatury 55°C. Przy niskich wartościach natężenia prądu elektrycznego występuje znaczny spadek napięcia (ok. 20 V).

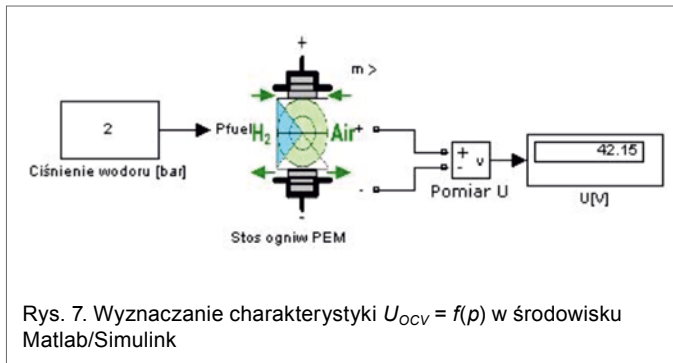
Podniesiona temperatura pracy ogniwa wpływa na zmniejszenie energii aktywacji, a więc niższe są straty aktywacyjne. Należy pamiętać, że zbyt wysoka temperatura spowoduje wyschnięcie membrany, czego konsekwencją będzie zanik przewodnictwa jonowego. Po za tym przy zwiększonej temperaturze pracy zwiększy się ciśnienie pary w materiale elektrolitu, a to może spowodować uszkodzenie mechaniczne ogniwa.

### Badanie wpływu ciśnienia wodoru na charakterystykę napięciowo-prądową

Wpływ ciśnienia wodoru na charakterystykę napięciowo-prądową ogniwa paliwowego pokazano na rysunku 6. Przeprowadzono symulację dla ciśnienia znamionowego 1,5 bara, oraz

reklama

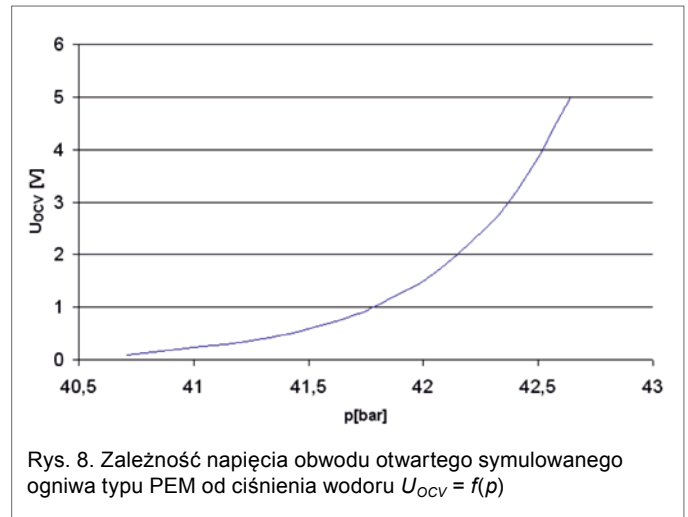




Rys. 7. Wyznaczanie charakterystyki  $U_{OCV} = f(p)$  w środowisku Matlab/Simulink

dla ciśnienia 0,5 bara i 3 barów. Przy zwiększonym ciśnieniu charakterystyka  $U = f(I)$  przesuwają się w górę. Zwiększanie ciśnienia wodoru pozwala uzyskać większe wartości prądu, ponieważ zmniejszają się straty transportu masy [3].

Na rys. 7 przedstawiono model ogniw paliwowych PEM i układu pomiarowego do wyznaczenia zależności napięcia obwodu otwartego ogniw od ciśnienia wodoru. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność napięcia obwodu otwartego symulowanego ogniw typu PEM od ciśnienia wodoru  $U_{OCV} = f(p)$

### Wnioski

Badania symulacyjne przeprowadzone w środowisku Matlab/Simulink pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- przy obniżonej temperaturze pracy ogniw zwiększają się straty aktywacyjne, charakterystyka napięciowo-prądowa ogniw przesuwają się w dół względem charakterystyki dla temperatury znamionowej;
- podniesiona temperatura pracy ogniw wpływa na zmniejszenie energii aktywacji, charakterystyka zewnętrzna ogniw przesuwają się w górę względem charakterystyki dla temperatury znamionowej, jednak zbyt wysoka temperatura spowoduje wyschnięcie membrany, czego konsekwencją będzie zanik przewodnictwa jonowego;
- zwiększanie ciśnienia wodoru pozwala uzyskać większe wartości prądu, zmniejszają się straty transportu masy.

### Literatura

- [1] KOWALSKA A., WILCZYŃSKI A.: *Źródła rozproszone w systemie elektroenergetycznym*. Wydawnictwo „Karpint”. Lublin 2007, s. 27.
- [2] PASKA J.: *Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*. Oficyna Wydawnicza PW, 2010, s 110–124.
- [3] BUJŁO P.: *Polimerowe, superjonowe membrany dla ogniw paliwowych typu PEMFC*. Rozprawa doktorska, Wrocław 2006, s. 47.

- [4] ZEŃCZAK W.: *Model matematyczny ogniw paliwowych w stacjach ustalonych*. Politechnika Szczecińska, XXVII Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO 2006.
- [5] <http://www.ogniwa-paliwowe.com/>
- [6] Matlab/Simulink: Help – Fuel Cell Stack.

### Przypisy

1. Generacja rozproszona – małe (50–150 MW) jednostki lub obiekty wytwórcze, przyłączone bezpośrednio do sieci rozdzielczych lub zlokalizowane w sieci elektroenergetycznej odbiorcy.
2. PEM – ang. *Proton Exchange Membrane* – ogniwo z jonowymi membraną polimerową.
3. DMFC – ang. *Direct Metanol Fuel Cell* – ogniwo zasilane bezpośrednio metanolem.
4. MCFC – ang. *Molten Carbonate Fuel Cell* – wysokotemperaturowe ogniwo węglanowe.
5. SOFC – ang. *Solid Oxide Fuel Cell* – wysokotemperaturowe ogniwo paliwowe z elektrolitem stałym tlenkowym.



mgr inż. Bartosz Ceran ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej na kierunku Elektrotechnika, specjalność Elektroenergetyka. Od 2009 r. pracuje w Instytucie Elektroenergetyki na stanowisku asystenta. Jego zainteresowania dotyczą rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła; e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl

artykuł recenzowany