



Stanowisko do badania ogniwa paliwowego Nexa™1,2 kW

LESZEK SZCZĘCH

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W referacie przedstawiono stanowisko do badań ogniwa paliwowego do napędu pojazdu o niewielkiej mocy. Przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyki prądowo-napięciowej oraz zużycia paliwa w ogniwie o mocy 1,2 kW.

Słowa kluczowe: napęd hybrydowy, ogniwo paliwowe, układ napędowy pojazdu

Symbole UKD: 629.1.02

1. Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć, że środki masowego przekazu coraz większą uwagę zwracają na zagadnienia związane z poszukiwaniem nowych, tanich źródeł energii. Jednym z rozwiązań zdobywających coraz większą popularność jest zastosowanie w motoryzacji ogniwa paliwowych wykorzystujących syntezę wodoru i tlenu do wytwarzania energii elektrycznej. Związane jest to z koncepcją napędu pojazdów silnikami elektrycznymi. Ponadto, ogniwa paliwowe uważane są nie tylko za element przyszłościowych układów napędowych. Mogą być stosowane także w budownictwie — do ogrzewania domów i zasilania ich w energię elektryczną przy wykorzystaniu wodoru pozyskiwanego z gazu ziemnego (rozwiązanie firmy Vaillant).

Wykorzystanie wodoru do zasilania układów napędowych pojazdów pozwoli na spełnienie coraz ostrzejszych norm ograniczających emisję związków toksycznych. Ciągłe dążenie do redukcji zanieczyszczeń emitowanych przez silniki spalinowe oraz do obniżenia zużycia paliw ropopochodnych nie wpływa istotnie na

zmniejszenie emisji dwutlenku węgla przy ciągłej tendencji do zwiększania mocy silników. Pojawienie się technologii wydajnych ogniwi paliwowych o większej sprawności niż silniki tłokowe pozwala na zastosowanie ich do napędu pojazdów oraz połączenie zalet czystego paliwa (wodoru lub metanolu, które są zamieniane na energię elektryczną w czystym i łatwo kontrolowanym procesie) z pozbawionym ubocznych efektów pracy silnikiem elektrycznym. Zastosowanie takiego napędu w pojazdach na masową skalę powinno w krótkim czasie spowodować radykalne zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do środowiska. Największą przeszkodą na drodze wprowadzenia tej technologii są koszty. Cena prototypowego samochodu Fiat Seicento z takim układem, prezentowanego w czerwcu 2004 roku, jest szacowana na ok. 500 tys. euro. Czynnikiem, który może przekonać ewentualnych odbiorców jest prognozowana sprawność układu napędowego z ogniwiem paliwowym, która jest szacowana na 50-60%.

Zwiększenie produkcji ogniwi paliwowych na potrzeby motoryzacji i innych dziedzin gospodarki powinno znacząco wpłynąć na obniżenie kosztów ich wytwarzania.

2. Własności ogniwi paliwowych

Ogniwo paliwowe zostało wynalezione w 1839 roku przez brytyjskiego prawnika i fizyka Williama Grove'a w oparciu o jego własne odkrycie, że elektroliza wody jest procesem odwracalnym. Po raz pierwszy ogniwa paliwowe wykorzystano w 1964 roku jako źródło energii i wody w kosmicznym programie Gemini. Odwracalność elektrolizy wody sprowadza się do tego, że gdy do anody ogniwa galwanicznego dostarczamy wodór (czysty lub w związkach z węglem i tlenem) i tlen lub powietrze do katody, to wewnątrz ogniwa zachodzi reakcja elektrochemiczna odwrotna do elektrolizy i w rezultacie otrzymujemy prąd elektryczny, wodę, ciepło i dwutlenek węgla (jeśli paliwem jest metan CH_4 lub metanol CH_3OH). Obecnie możliwe jest wykorzystanie sześciu rodzajów ogniwi paliwowych, które różnią się między sobą przede wszystkim rodzajem zastosowanego elektrolitu oddzielającego elektrody ogniwa i temperaturą, przy której zachodzi synteza wody z wodoru i tlenu. Są to ogniwa (tab. 1) z membraną protonoprzepuszczalną (PEMFC), alkaliczne (AFC), z kwasem fosforowym (PAFC), węglanowe (MCFC), tlenkowe (SOFC) i bezpośrednie, metanolowe (DMFC).

W ogniwie paliwowym typu PEMFC (Proton Emission Membrane Fuel Cell), pracującym na wodorce, paliwo jest dostarczane do anody, gdzie w obecności katalizatora (platyny) elektrony zostają oddzielone od atomów wodoru i trafiają do elektrody. Jony wodoru (protony) przechodzą przez membranę protonoprzepuszczalną. Elektrony są doprowadzane do katody przez obwód elektryczny i na powierzchni porowatej katody łączą się z atomami tlenu. Tak powstałe aniony przyłączają jony wodoru, które przeszły przez membranę. W ten sposób powstają cząsteczki wody.

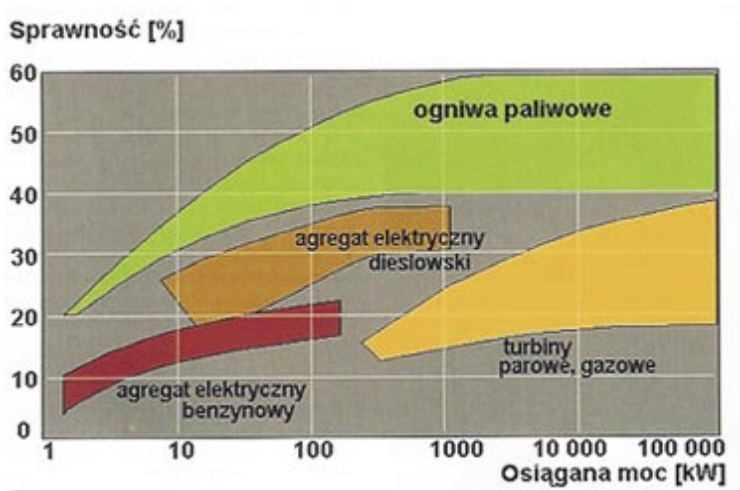
TABELA 1

Rodzaje ogniw paliwowych

| Ogniwo paliwowe (nazwa) | Elektrolit | Elektrody | Paliwo | Temperatura pracy i zastosowanie ogniwa |
|---|---|--|--|--|
| Ogniwo alkaliczne (zasadowe) AFC (Alkaline Fuel Cell) | Roztwór wodorotlenku potasu: stężony 85% (temp. pracy < 250°C), rozcieńczony 35-40% (temp. pracy < 120°C) | Zastosowanie różnych metali | Wodór H ₂ , hydrazyna N ₂ H ₄ , metan CH ₄ . Paliwo i utleniacz muszą być pozbawione CO ₂ | Temp. pracy: 100-200°C. Zastosowanie: technika kosmiczna i wojskowa (łódzie podwodne i pojazdy pancerne), transport |
| Ogniwo polimerowe (membranowe) PEMFC (Proton Emission Fuel Cell) | Jonowymienna membrana z polimeru sulfono-fluoro-węglowego | Platynowe | Wodór H ₂ , metanol CH ₃ OH. Paliwo musi być pozbawione CO | Temp. pracy: 70-80 °C. Zastosowanie: głównie transport, pojazdy kosmiczne i wojskowe |
| Ogniwa kwasu fosforowego PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) | Stężony kwas fosforowy (100%) | Platyna naniesiona na podłoże węglowe spajane teflonem | Wodór H ₂ , gaz ziemny, nafta, metanol CH ₃ OH, biogaz. Paliwo musi być odsiarczone i pozbawione CO | Temp. pracy: 150-200°C. Stosowane jako źródło energii elektrycznej i ciepłej w obiektach użyteczności publicznej (szpitale, biura, hotele, niewielkie osiedla mieszkaniowe) |
| Ogniwa węglanowe (stopionych węglanów) MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) | Mieszanka węglanów alkalicznych (Li, K, Na) | Anoda — porowaty nikiel z dodatkiem chromu. Katoda — porowaty tlenek niklu dotowany litem | Gaz ziemny, metanol CH ₃ OH, biogaz. Paliwo musi być konwertorowane na gaz zawierający wodór H ₂ w odrębnym urządzeniu — reforming zewnętrzny lub reforming wewnętrzny z wykorzystaniem ciepła reakcji elektrochemicznej. Utleniacz to powietrze z dodatkiem CO ₂ | Temp. pracy: 600-700°C. Wysokotemperaturowe ogniwa węglanowe umożliwiają wykorzystanie produkowanego ciepła do celów grzewczych i w procesach technologicznych |

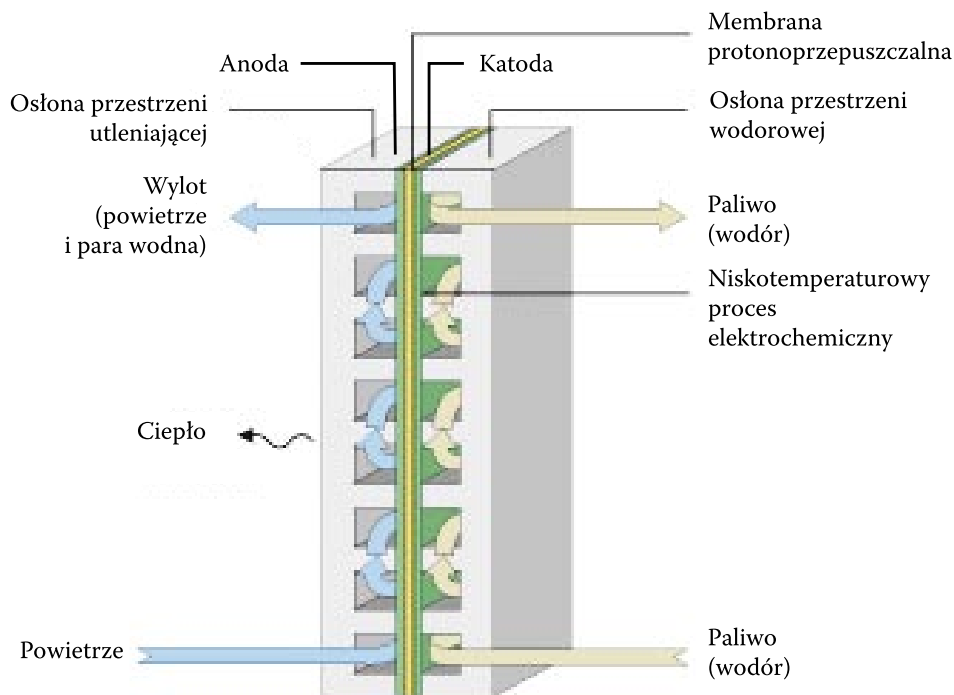
| | | | | |
|---|---|--|---|--|
| Ogniwa tlenkowe SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) | Nieporowaty stały tlenek metalu, najczęściej cyrkonu ZrO_2 , stabilizowany tlenkiem itru Y_2O_3 | | Gaz ziemny, biogaz. Paliwo musi być konwertorowane na gaz zawierający wodór H_2 w odrębnym urządzeniu — reforming zewnętrzny lub reforming wewnętrzny z wykorzystaniem ciepła reakcji elektrochemicznej | Temp. pracy: 900-1000°C. Ogniwa te znajdują się w fazie prac badawczych i ich zastosowanie w większej skali jest jeszcze odległe |
|---|---|--|---|--|

Ogniwo PEMFC pracuje w temperaturze do 80°C i uzyskuje sprawność 40-50% (rys. 1). Przy jego pomocy można uzyskać moc jednostkową ok. 1 W/cm². Bateria ogniw paliwowych, tzw. stos, składa się z wielu identycznych elementów, z których każdy zawiera anodę, katodę i matrycę elektrolitową. Elementy są przedzielone płytami bipolarnymi, wyposażonymi w kanały dopływu reagentów (rys. 2).



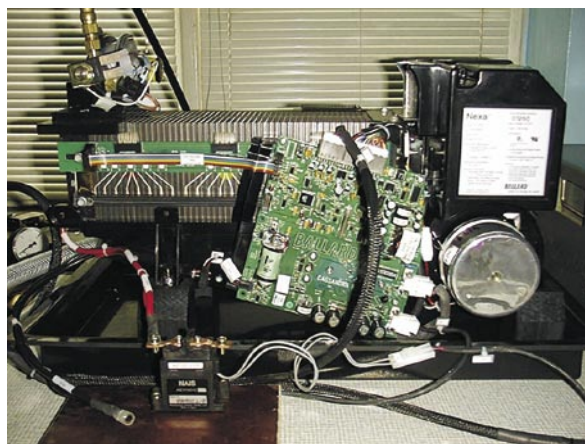
Rys. 1. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w różnych urządzeniach

Zakład Silników Pojazdów Mechanicznych posiada ogniwo paliwowe o nazwie handlowej Nexa™, mocy 1,2 kW i masie 13 kg. Jest to urządzenie produkowane przez kanadyjską firmę Ballard i oferowane jako zestaw dydaktyczny pozwalający na prowadzenie doświadczeń oraz prac badawczych nad wykorzystaniem ogniw paliwowych.



Rys. 2. Elementy składowe ogniwa paliwowego

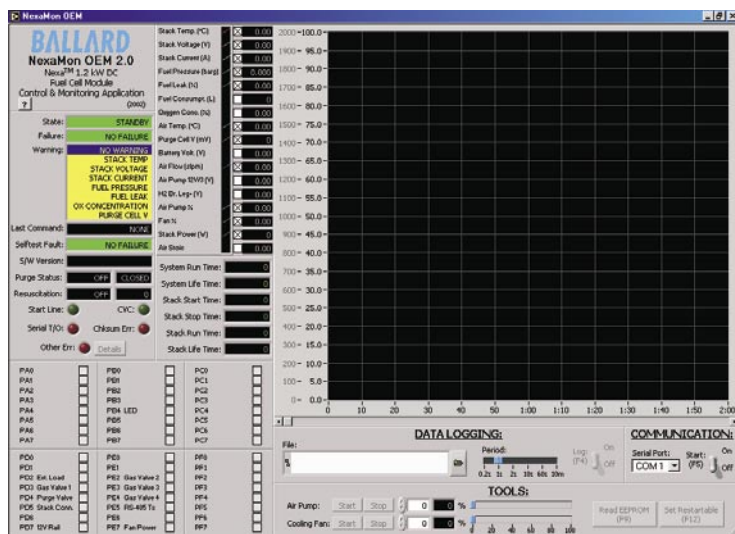
Nexa™ (rys. 3) jest ogniwem paliwowym typu PEMFC. Wytwarza prąd stały o napięciu 22-50 V i natężeniu do 45 A. Moc maksymalna tego urządzenia wynosi 1200 W. Paliwem wymaganym do zasilania jest wodór o klasie czystości 4,9,



Rys. 3. Ogniwo paliwowe 1,2 kW Nexa™

o ciśnieniu zredukowanym do 0,7-17 bar. Tlen pobierany jest z powietrza. Podczas pracy z maksymalną mocą produkuje ok. 0,87 dm³ wody na godzinę. Ogniwo to samoczynnie podtrzymuje swoją pracę i jedynie podczas rozruchu wymaga zasilania z zewnętrznego źródła prądu stałego o napięciu 18-26 V i prądzie 10 A (zasilacz stabilizowany lub bateria akumulatorów).

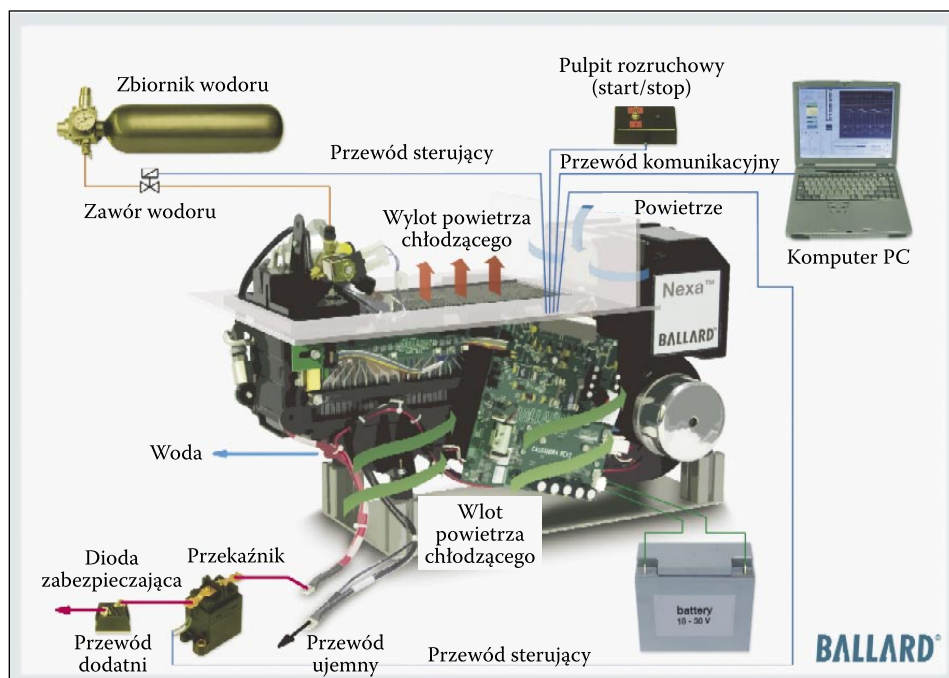
Badane ogniwo paliwowe zostało wyposażone przez producenta w szereg czujników i układów pomiarowych, pozwalających na monitorowanie stanu pracy urządzenia. Mierzone są przede wszystkim wielkości elektryczne, ale także temperatura ogniwa, stężenie tlenu w powietrzu, stężenie wodoru w gazach wylotowych, ciśnienie wodoru, zużycie paliwa oraz cały szereg parametrów diagnostycznych. Ogniwo wyposażone jest też w port komunikacyjny, pozwalający na kontrolowanie i rejestrację parametrów pracy ogniwa przez komputer PC (rys. 4).



Rys. 4. Ekran programu monitorującego ogniwo paliwowe Nexa™

3. Wyniki badań ogniwa paliwowego

W celu poznania możliwości energetycznych ogniwa paliwowego Nexa™ i porównania ich z danymi producenta przeprowadzono badania stanowiskowe tego urządzenia. Stanowisko badawcze (rys. 5) zostało wyposażone w urządzenia umożliwiające pracę ogniwa paliwowego: dziesięciolitrową butlę z wodorem, reduktor gazowy, zasilacz stabilizowany, włącznik rozruchowy, zworę blokującą, komputer pomiarowo-rejestrujący oraz rezystor wodny. Rezystor pozwalał na płynne obciążenie ogniwa paliwowego do ok. 40 A.



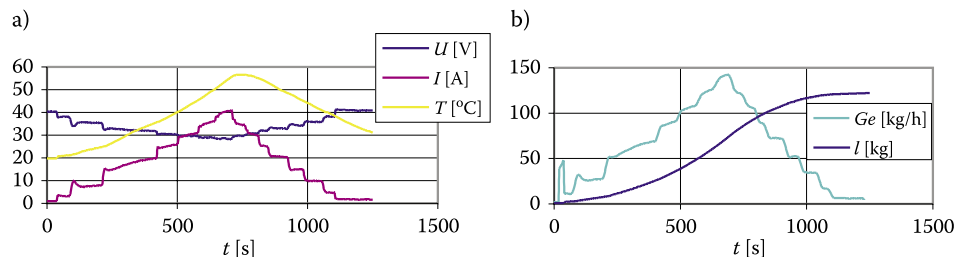
Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego z ogniwem paliwowym

Podczas badań zarejestrowano pracę ogniwa paliwowego na biegu jałowym, bez obciążenia, a następnie stopniowo zanurzano rezystor w wodzie, zwiększając wartość prądu generowaną przez badane urządzenie. Na każdym z ustawionych poziomów obciążenia czekali kilka minut na wyrównanie parametrów pracy ogniwa. Nie było to łatwe, zwłaszcza przy mniejszych wartościach obciążenia, gdzie obserwowano stały wzrost natężenia prądu i temperatury ogniwa. Częściowo było to spowodowane pracą rezystora wodnego zbudowanego z aluminiowych radiatorów, które miały tendencję do rozpuszczania się podczas elektrolizy, a produkty zużycia zalegały między płytami rezystora, powodując zwiększenie przepływu prądu.

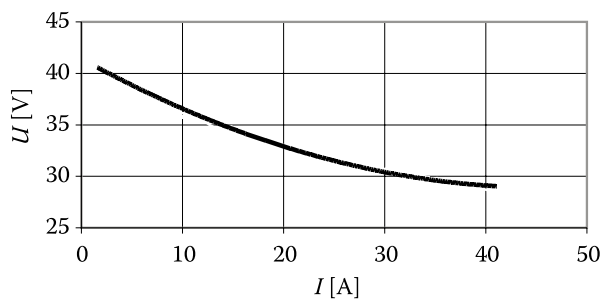
Podczas pomiarów zarejestrowano napięcie U [V] i natężenie prądu I [A], temperaturę ogniwa T [°C] (rys. 6a) oraz całkowite I [kg] i godzinowe zużycie wodoru Ge [kg/h] (rys. 6b).

Pomiary wykazały, że najmniej korzystną cechą ogniwa paliwowego jest jego charakterystyka prądowo-napięciowa (rys. 7), która wykazuje silną zależność napięcia od natężenia prądu. Zmiana natężenia prądu od zera na biegu jałowym do 40 A przy maksymalnym obciążeniu spowodowała spadek napięcia z 42 V do 27 V. Może to powodować spore kłopoty z doбором urządzeń w układach zasilania.

nych ogniwoem paliwowym. Typowe układy elektryczne (falowniki, silniki prądu stałego) nie są projektowane na tak szeroki zakres napięć.

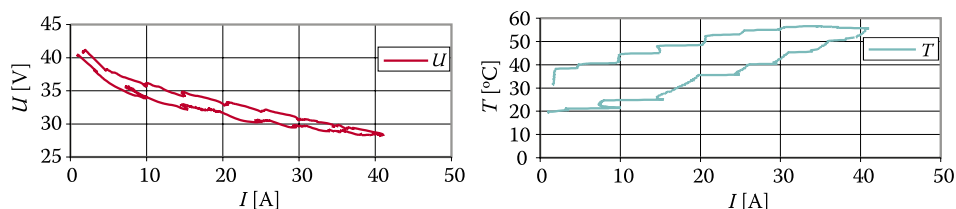


Rys. 6. Wyniki pomiarów parametrów pracy ogniwa paliwowego



Rys. 7. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa paliwowego 1,2 kW Nexa

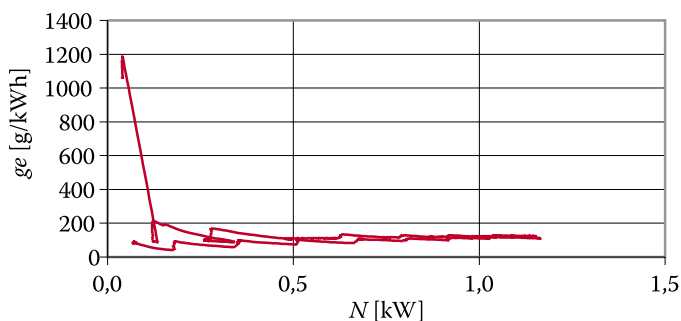
Kolejną niekorzystną cechą jest duża histereza napięcia oraz temperatury podczas obciążania i odciążania ogniwa paliwowego (rys. 8), które są spowodowane dość dużą zależnością napięcia generowanego przez ogniwo od temperatury i wolnym tempem nagrzewania się ogniwa podczas pracy.



Rys. 8. Pętle histerezy na przebiegach napięcia i temperatury

Pomiar mocy i godzinowego zużycia paliwa pozwolił na wyznaczenie charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa, która umożliwia ocenę ekonomiczności pracy ogniwa paliwowego. Analiza wykresu pozwala stwierdzić, że ekonomiczność

wytwarzania energii jest w przypadku ogniw paliwowych wyższa niż w przypadku paliw płynnych. Oczywiście, największe znaczenie ma tutaj niska gęstość wodoru. W przypadku układu napędowego należałoby jeszcze uwzględnić sprawność silnika elektrycznego wraz z ewentualnym układem sterowania.



Rys. 9. Zależność jednostkowego zużycia paliwa

4. Wnioski

1. Wykorzystanie badanego ogniwa paliwowego ze względu na niekorzystną charakterystykę prądowo-napięciową może być dość kłopotliwe. Konieczne będzie opracowanie układu napędowego niewrażliwego na tak duże zmiany napięcia. W przypadku układu stałonapięciowego konieczne będzie ustabilizowanie tego napięcia na zakres 24-28 V, tak aby ogniwo mogło współpracować zarówno z akumulatorami, jak i silnikami prądu stałego. W przypadku układów zasilanych prądem przemiennym konieczne będzie opracowanie lub dobranie falownika mogącego pracować w tak szerokim zakresie napięcia prądu elektrycznego.
2. Zastosowanie wodoru jako paliwa powoduje powstawanie dodatkowych problemów związanych z bezpieczeństwem. Konieczne jest wentylowanie pomieszczenia, w którym pracuje ogniwo, zwłaszcza z uwagi na dość częste pęknięcie części wodorowej ogniwa z pojawiającej się tam pary wodnej i występującą w związku z tym emisją wodoru.
3. Ekonomiczność pracy ogniwa paliwowego wydaje się wysoka, należy jednak pamiętać o uwzględnieniu sprawności napędu elektrycznego i dość wysokiej cenie wodoru. Dodatkowo, niska gęstość powoduje, że objętościowe zużycie paliwa jest znaczne. Wymusza to stosowanie zbiorników o dużej objętości i masie. Dziesięciolitrowy zbiornik z wodorem sprężonym do ciśnienia 20 MPa pozwala na wytworzenie ok. 15 kWh energii.

LITERATURA

- [1] *Nexa™ power module user's manual*, MAN5100078, Ballard Power Systems Inc., 2003.
- [2] M. EHSANI, Y. GAO, S.E. GAY, A. EMADI, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, CRC Press, London, 2004.
- [3] A. ROUSSEAU, R. AHUWAHLIA, B. DEVILLE, Q. ZHANG, *Well-to-Wheel analysis of advanced SUV fuel cell vehicles*, SAE International, 2003-01-0415.

L. SZCZĘCH

Investigation stand of 1.2 kW Nexa™ fuel cell

Abstract. The investigation stand of the 1.2 kW Nexa™ PEM fuel cell was introduced in the paper. The investigation results of were showed and basic characteristics described. The influence of temperature on voltage, current, and fuel consumption was estimated.

Keywords: hybrid drive, fuel cell, vehicle drive system

Universal Decimal Classification: 629.1.02