

Marek Adamiec¹⁾

WPŁYW RODZAJU OGNIWA PALIWOWEGO NA CHARAKTERYSTYKI ZASILANEGO SILNIKA ELEKTRYCZNEGO – BADANIA SYMULACYJNE

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych układu „ogniwo paliwowe – silnik elektryczny”. Symulacje zostały wykonane w programie Matlab Simulink. Omówiono budowę, właściwości i zastosowanie ogniw paliwowych. Opisano charakterystyki silnika zasilanego przez alkaliczne ogniwo typu AFC oraz membranowe ogniwo typu PEMFC. Układ „ogniwo – silnik” był analizowany w nieustalonym i ustalonym stanie pracy.

Słowa kluczowe: ogniwo paliwowe, silnik elektryczny, model matematyczny, symulacje.

WSTĘP

Ogniwo paliwowe jest elektrochemicznym przetwornikiem energii, w którym zachodzą reakcje utleniania wodoru i redukcji tlenu. Dzięki rozdzieleniu tych reakcji na dwie elektrody, możliwe jest uzyskanie z energii chemicznej wodoru głównie energii elektrycznej i częściowo cieplnej. Teoretycznie sprawność ogniwa paliwowego wynosi 83%, a w praktyce uzyskuje się przeciętnie 40–60 % [2, 3]. Nazwy głównych elementów ogniw są typowe dla chemicznych przetworników energii, a więc występują tu dwie elektrody – anoda i katoda oraz elektrolit. Jednak materiały stosowane do wykonania tych elementów są inne w różnych rodzajach ogniw, które klasyfikuje się ze względu na temperaturę pracy, ciśnienie gazów, rodzaj i stan skupienia elektrolitu, skład chemiczny paliwa i utleniacza [4]. Różne są też katalizatory reakcji chemicznych, decydujące o osiągnięciach i cenie ogniwa. Podobnie jak inne chemiczne źródła energii (baterie, akumulatory), elementarne ogniwo paliwowe wytwarza niewielkie napięcie elektryczne, wynoszące w stanie jałowym 0,9-1 V, a przy obciążeniu znamionowym 0,6-0,7 V. Dlatego w praktyce ogniwa posiadają budowę modułową, jednostki elementarne łączone są w sposób szeregowy i równoległy w celu uzyskania odpowiednich wartości napięcia i prądu. Ogniwa elementarne mogą stanowić odrębne jednostki lub znajdować się w jednej obudowie i być połączone w sposób trwały. Zjawiska fizyczne i chemiczne zachodzące w ogniwie zobrazowane są przez charakterystykę napięciowo-prądową [6, 8].

¹⁾ Katedra Pojazdów Samochodowych, Politechnika Lubelska, e-mail: m.adamiec@pollub.pl

W przebiegu tej charakterystyki można wyróżnić część liniową, w której dominują rezystancyjne spadki napięć, oraz część nieliniową, w której większą rolę odgrywają straty napięcia spowodowane przez różne etapy reakcji chemicznych na elektrodach (aktywacja, dyfuzja, zmiana stężenia substratów i produktów) [5].

Tak więc przebieg charakterystyki napięciowo-prądowej ogniwa zależy od jego rodzaju i jest bardzo istotny dla zasilanego odbiornika. Ważną wielkością porównawczą dla różnych ogniw jest także gęstość prądu.

W ostatnich kilkunastu latach prowadzono wiele badań związanych z konstrukcją i zastosowaniem ogniw paliwowych. Znaczna ich część miała miejsce w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie zbudowano wiele prototypów pojazdów z silnikiem elektrycznym zasilanym przez ogniwo paliwowe [7, 9]. Jest jeszcze wiele problemów technicznych oraz ekonomicznych związanych z budową i ceną ogniw oraz wytwarzaniem i dystrybucją wodoru. Dla zwiększenia i opłacalności produkcji tego paliwa bardzo istotny jest rozwój przetworników energii odnawialnej (ogniwa fotowoltaiczne, elektrownie wiatrowe, wytwórnie biogazu) [8]. W krajach wysoko rozwiniętych ogniwa paliwowe stosowane są w energetyce rozproszonej, jako stacjonarne oraz rezerwowe źródła energii elektrycznej i ciepłej. Dopóki nie rozwinię się sieć dystrybucji paliwa wodorowego w motoryzacji, ogniwa paliwowe mają większe szanse zastosowania w lekkich pojazdach transportowych, poruszających się na niewielkim obszarze [10].

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wykonanych dla układu „ogniwo – silnik” z wykorzystaniem charakterystyki napięciowo-prądowej ogniwa i modelu matematycznego silnika [3]. Symulacje wykonano dla dwóch rodzajów niskotemperaturowych ogniw paliwowych stosowanych w prototypowych pojazdach elektrycznych oraz silnika prądu stałego, wykorzystywanego do napędu lekkiego pojazdu transportowego [10, 11].

METODYKA BADAŃ

W badaniach symulacyjnych wykorzystano dwa rodzaje niskotemperaturowych i niskociśnieniowych ogniw paliwowych, alkaliczne typu AFC (Alkaline Fuel Cell) oraz membranowe typu PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). W ogniwie AFC elektrolitem jest wodorotlenek potasu KOH występujący w roztworze wodnym, natomiast w ogniwie PEMFC elektrolit stanowi polimerowa membrana protonowymienna, mająca zdolność przewodzenia jonów wodorowych [6]. W czasie badań laboratoryjnych wyznaczono charakterystyki napięciowo-prądowe dla obydwu ogniw elementarnych w znamionowych warunkach pracy. Na podstawie tych pomiarów i przy pomocy programu komputerowego wyznaczono równania wielomianowe różnego stopnia i wybrano te, które najdokładniej opisują przebiegi charakterystyk.

Charakterystykę ogniwa AFC opisano równaniem trzeciego stopnia, a krzywą ogniwa PEMFC wielomianem siódmego stopnia:

$$U = -0,0025 \cdot I^3 + 0,0238 \cdot I^2 - 0,1476 \cdot I + 0,9104 \quad (1)$$

$$U = -0,048 \cdot I^7 + 0,5272 \cdot I^6 - 2,3249 \cdot I^5 + 5,2665 \cdot I^4 - 6,5059 \cdot I^3 + 4,2906 \cdot I^2 - 1,5032 \cdot I + 0,9496 \quad (2)$$

Do badań wykorzystano silnik prądu stałego z magnesem trwałym na wirniku, którego wielkości charakterystyczne zamieszczono poniżej:

$$U_n = 36 \text{ V}; I_n = 110 \text{ A}; I(10 \text{ min}) = 200 \text{ A}; P_n = 3,5 \text{ kW}; n_n = 1700 \text{ obr/min}; \omega_n = 177,93 \text{ rad/s}; M_n = 20,5 \text{ Nm}; L = 0,019 \text{ mH}; R = 16 \text{ m}\Omega; J = 0,025 \text{ kg}\cdot\text{m}^2; k_e = 0,192; k_t = 0,0051$$

Pracę silnika elektrycznego prądu stałego opisano równaniami różniczkowymi, w których występują wielkości elektryczne i mechaniczne:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} u(t) - \frac{k_e}{L} \omega(t) - \frac{R}{L} i(t) \quad (3)$$

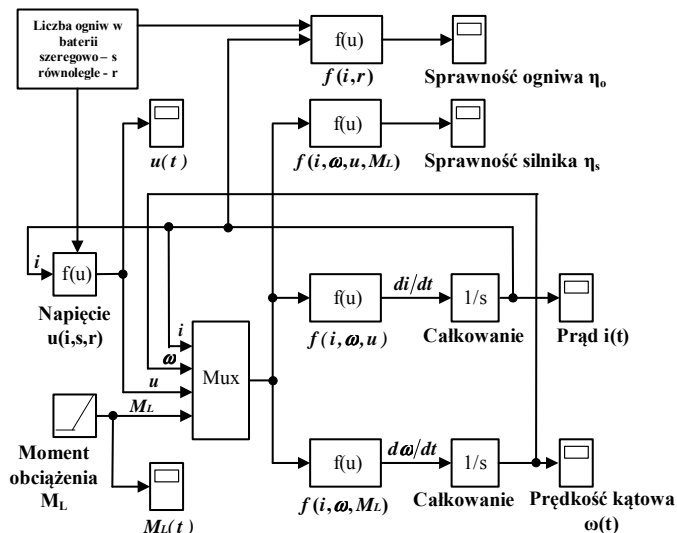
$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_t}{J} i(t) - \frac{k_t}{J} \omega(t) - \frac{1}{J} M_{obc} \quad (4)$$

gdzie: u – wartość chwilowa napięcia silnika, i – wartość chwilowa prądu silnika, k_e – stała elektromagnetyczna silnika, ω – prędkość kątowa wału silnika, L – indukcyjność uzwojenia silnika, R – rezystancja uzwojenia silnika, M_{obc} – moment obciążenia silnika, J – moment bezwładności silnika, k_t – współczynnik strat mechanicznych silnika, t – czas.

Na podstawie równań wielomianowych ogniwa oraz równań różniczkowych silnika opracowano schemat blokowy układu „ogniwo – silnik” w programie Matlab Simulink (rys. 1). Strukturę schematu i metodykę badań symulacyjnych opisano w pracach [1, 3]. Wielkościami wejściowymi w układzie symulacyjnym są napięcie i moment siły, a wielkościami wyjściowymi prąd i prędkość silnika. Napięcie uzależnione jest od prądu zgodnie z charakterystyką ogniwa opisaną wielomianem $U = f(I)$.

Program symulacyjny umożliwił wyznaczenie przebiegów czasowych napięcia, prądu i prędkości obrotowej w stanach dynamicznych pracy silnika (rozruch, zmiana obciążenia) oraz obliczenie wartości tych wielkości w stanie ustalonym, przy stałym obciążeniu. Dodatkowo obliczane są wartości sprawności układu „ogniwo – silnik” i jego elementów. Przed wykonaniem symulacji ustala się i wprowadza do programu liczbę ogniw elementarnych połączonych szeregowo i równolegle, tak aby dopasować wartości napięcia i prądu do wymagań silnika. Zakłada się, że wszystkie ogniwa elementarne w zestawie będą pracować identycznie, a rezystancja połączeń między nimi jest znikomo mała. W przeprowadzonych badaniach przyjęto taką liczbę ogniw, aby uzyskać znamionowe wielkości silnika elektrycznego. Ogniwo AFC

utworzono z 53 jednostek elementarnych połączonych szeregowo i 48 równolegle, a ogniwo PEMFC z 50 modułów szeregowych i 165 równoległych.



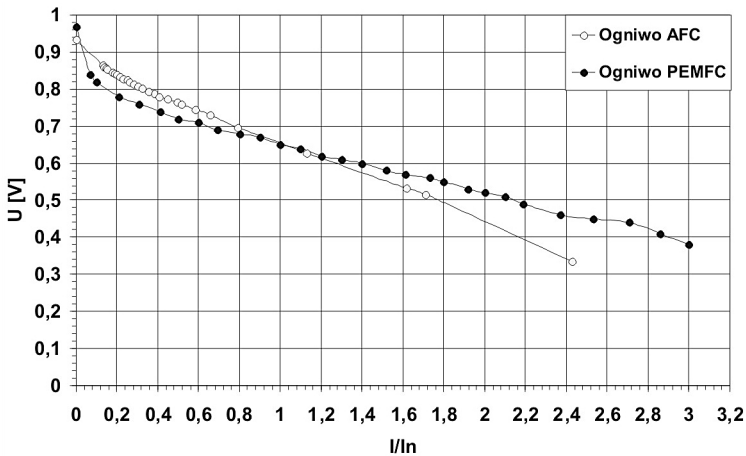
Rys. 1. Schemat blokowy układu symulacyjnego „ogniwo - silnik”

Na podstawie równań matematycznych opisujących pracę ogniwa i silnika napisano również program komputerowy, umożliwiający prowadzenie badań symulacyjnych. W oknie dialogowym programu wprowadza się wielkości charakteryzujące silnik, współczynniki wielomianu opisującego charakterystykę napięciowo-prądową ogniwa, wartość napięcia stanu jałowego oraz liczbę ogniw elementarnych połączonych szeregowo i równolegle. Program wykonuje wykresy napięcia, prądu, prędkości i momentu silnika w funkcji czasu, w fazie rozruchu, obciążenia i pracy ustalonej. Rozruch silnika może być realizowany z wykorzystaniem funkcji tzw. „łagodnego startu” („soft start”). Program daje możliwość wygodnej i szybkiej zmiany parametrów wprowadzanych w celu wykonania obliczeń i wykresów.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Przed przystąpieniem do badań symulacyjnych wyznaczono charakterystyki napięciowo-prądowe elementarnych ogniw paliwowych typu AFC i PEMFC w znamionowych warunkach pracy (rys. 2). Przebieg napięcia wykreślono w funkcji stosunku prądu do prądu znamionowego I/I_n , ponieważ badane ogniwa mają różne prądy znamionowe (AFC–2,5A; PEMFC–1A). Charakterystyka ogniwa PEMFC jest znacznie bardziej elastyczna w pierwszej części przebiegu i wtedy występują większe straty napięcia, natomiast po przekroczeniu prądu znamionowego ogniwo

PEMFC charakteryzuje się mniejszymi spadkami napięcia w porównaniu z ogniwnem AFC. Napięcie w stanie jałowym jest nieznacznie większe dla ogniwa typu PEMFC.

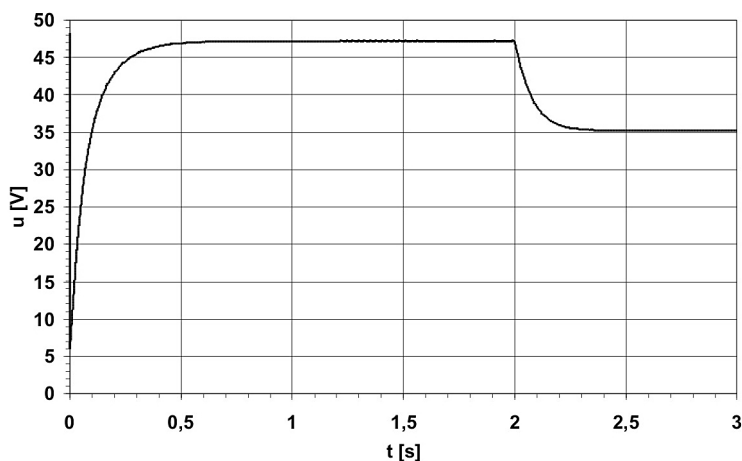


Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe elementarnych ogniw paliwowych typu AFC i PEMFC

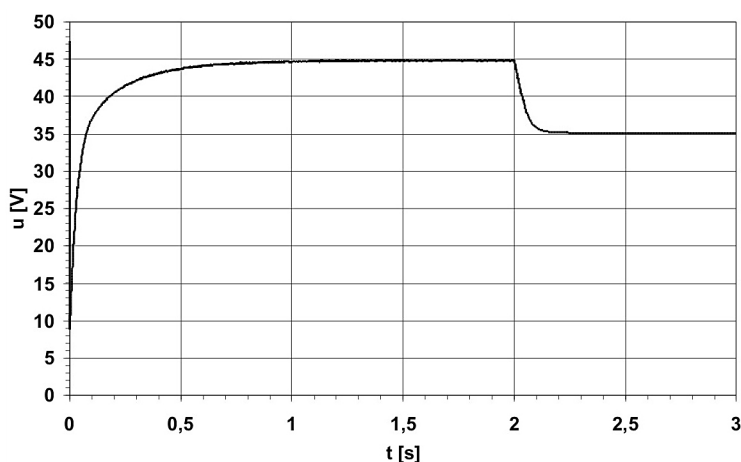
W pierwszej części badań symulacyjnych wyznaczono charakterystyki w nieustalonym stanie pracy silnika, który został poddany rozruchowi, a po 2 s pracy obciążony momentem znamionowym równym 20,5 Nm. W początkowej fazie rozruchu napięcie silnika zmniejsza się w dużym stopniu i w bardzo krótkim czasie z powodu dużego prądu rozruchowego i osiąga mniejszą wartość minimalną w przypadku zasilania przez ogniwo AFC (rys. 3 i 4). Napięcie silnika zasilanego ogniwnem typu AFC osiąga nieco większą wartość w stanie jałowym, a taką samą pod obciążeniem, w porównaniu z napięciem silnika zasilanego ogniwnem typu PEMFC. W pierwszym przypadku napięcie stanu jałowego stabilizuje się w krótszym czasie, a napięcie pod obciążeniem w dłuższym. Bardzo podobny przebieg posiadają krzywe obrazujące zmienność prędkości obrotowej silnika w czasie, przy zasilaniu ogniwnami różnych typów (rys. 5 i 6).

Różnice występują tylko w początkowej fazie rozruchu, gdy napięcie obniża się do wartości minimalnej, a następnie wzrasta, natomiast prędkość wzrasta od zera do wartości ustalonej. Prąd rozruchowy silnika zasilanego ogniwnem AFC osiąga mniejszą wartość niż w przypadku zasilania przez ogniwo PEMFC, natomiast prąd płynący w stanie jałowym i pod obciążeniem jest taki sam dla dwóch rodzajów ogniw paliwowych (rys. 7 i 8). W przypadku zasilania silnika przez ogniwo AFC, prąd szybciej osiąga wartość ustaloną w stanie jałowym, a nieco później pod obciążeniem.

W drugiej części badań symulacyjnych silnik był poddawany różnym obciążeniom, wyznaczono jego charakterystyczne wielkości w ustalonym stanie pracy i na tej podstawie wykreślono typowe charakterystyki.



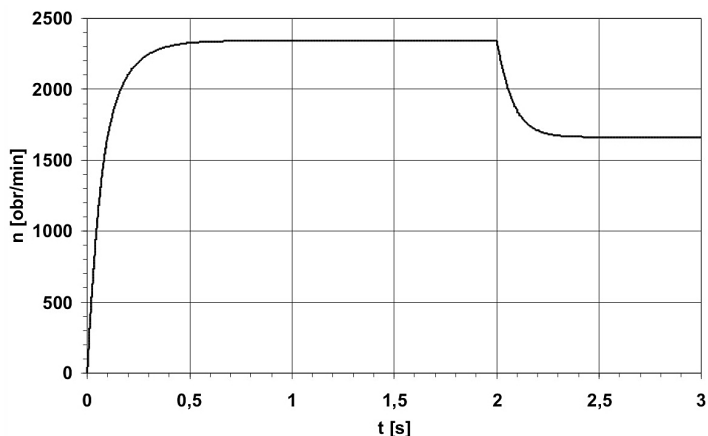
Rys. 3. Przebieg napięcia silnika zasilanego ogniwem AFC w czasie rozruchu i obciążenia momentem znamionowym



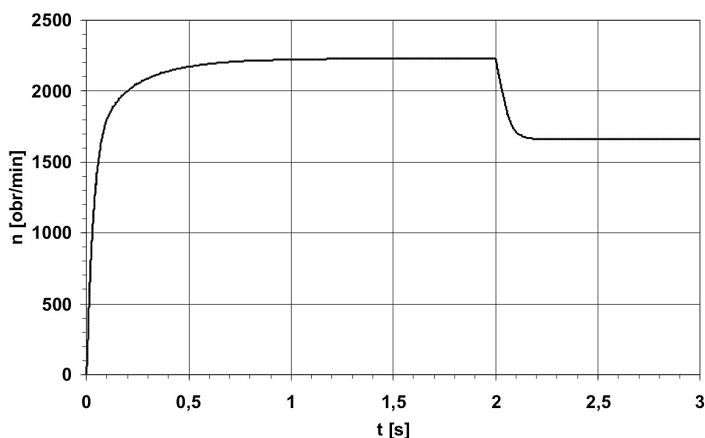
Rys. 4. Przebieg napięcia silnika zasilanego ogniwem PEMFC w czasie rozruchu i obciążenia momentem znamionowym

Analizując charakterystykę mechaniczną silnika $n = f(M)$ można stwierdzić, że przy zasilaniu ogniwem typu AFC jego wirnik osiąga większą prędkość obrotową w stanie jałowym i przy obciążeniach mniejszych od znamionowego, natomiast dla większych obciążeń prędkość ta jest mniejsza (rys. 9). Na rysunku 10 pokazano zależność mocy elektrycznej silnika od momentu obciążenia $P_e = f(M)$. Przy zasilaniu ogniwem AFC i obciążeniach mniejszych od znamionowego, moc osiąga większą wartość w porównaniu z mocą silnika zasilanego ogniwem typu PEMFC. Po przekroczeniu momentu znamionowego jest odwrotnie, a największe różnice występują

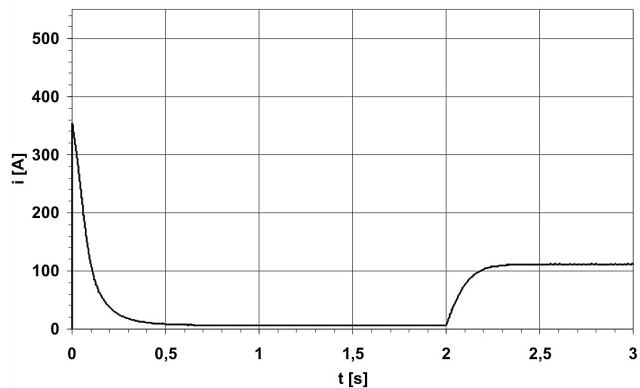
przy maksymalnych obciążeniach. Bardzo podobną zmienność charakterystyk obserwuje się na wykresie obrazującym zależność mocy mechanicznej silnika od momentu obciążenia (rys. 11). Wykresy poszczególnych mocy silnika wykazują symetrię, dlatego przebiegi sprawności silnika w funkcji obciążenia, dla dwóch rodzajów źródeł zasilania, są do siebie bardzo podobne (rys. 12).



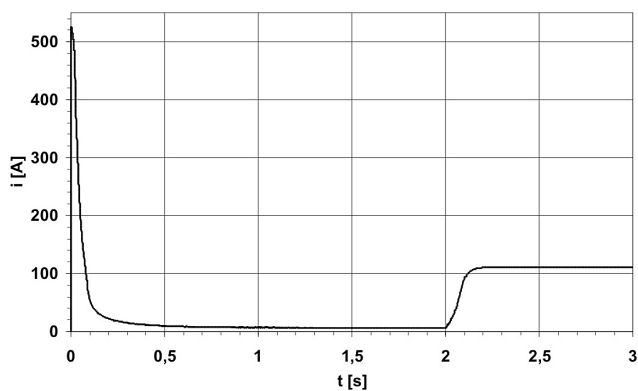
Rys. 5. Zmienność prędkości obrotowej silnika zasilanego ogniwem AFC w czasie rozruchu i obciążenia momentem znamionowym



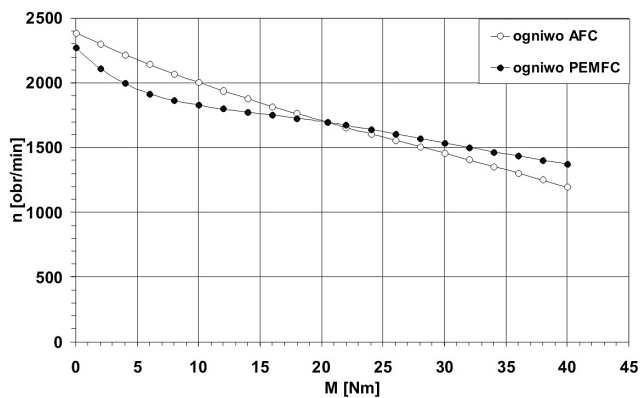
Rys. 6. Zmienność prędkości obrotowej silnika zasilanego ogniwem PEMFC w czasie rozruchu i obciążenia momentem znamionowym



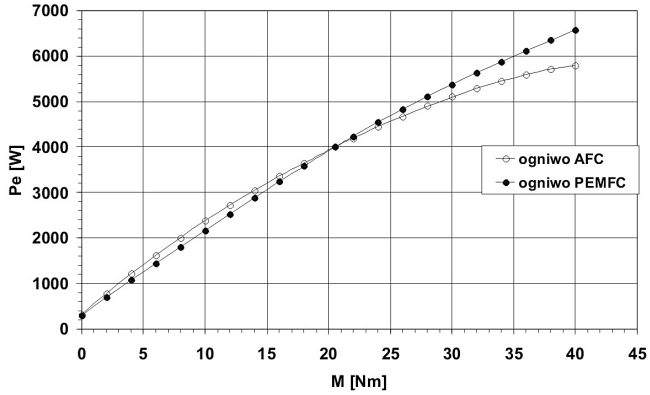
Rys. 7. Przebieg prądu silnika zasilanego ogniwo AFC w czasie rozruchu i obciążenia momentem znamionowym



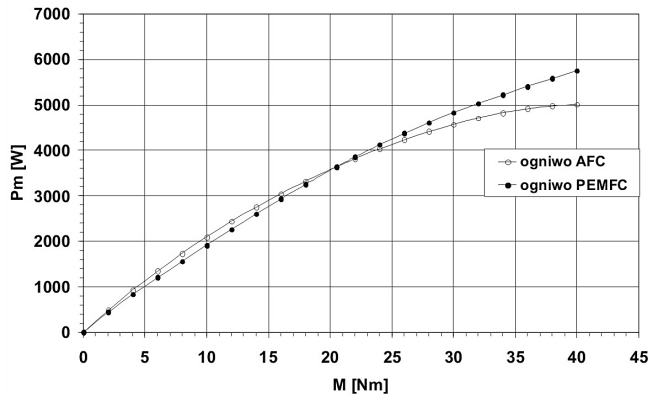
Rys. 8. Przebieg prądu silnika zasilanego ogniwo PEMFC w czasie rozruchu i obciążenia momentem znamionowym



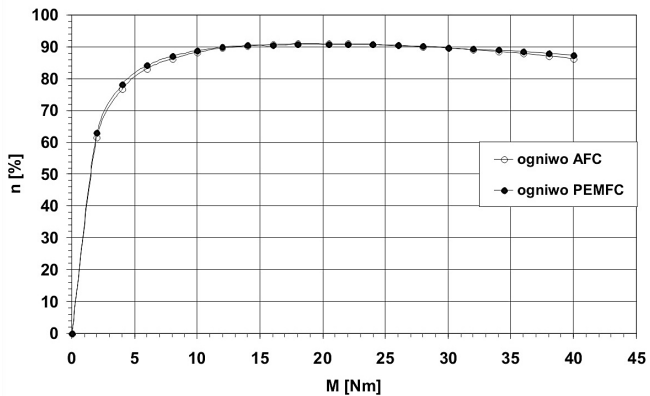
Rys. 9. Zależność prędkości obrotowej silnika od momentu obciążenia przy zasilaniu ogniwami paliwowymi typu AFC i PEMFC



Rys. 10. Zależność mocy elektrycznej silnika od momentu obciążenia przy zasilaniu ogniwami paliwowymi typu AFC i PEMFC



Rys. 11. Zależność mocy mechanicznej silnika od momentu obciążenia przy zasilaniu ogniwami paliwowymi typu AFC i PEMFC



Rys. 12. Zależność sprawności silnika od momentu obciążenia przy zasilaniu ogniwami paliwowymi typu AFC i PEMFC

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania symulacyjne pozwalają na wieloaspektową analizę obiektów technicznych, a wyniki uzyskuje się szybko i z mniejszym nakładem finansowym niż w przypadku badań laboratoryjnych. Jednak trudno jest uwzględnić wszystkie czynniki decydujące o pracy danego układu i najczęściej ustala się założenia upraszczające. Badania symulacyjne układu „ogniwo paliwowe – silnik elektryczny” wykonano z uwzględnieniem i na podstawie badań praktycznych ogniw paliwowych, podczas których w laboratorium wyznaczono ich charakterystyki napięciowo-prądowe. Jednak symulacyjnie łączono dużą ilość ogniw elementarnych ze sobą i w tym przypadku nie uwzględniono rezystancji połączeń oraz założono, że wszystkie ogniwa będą pracować prawidłowo i podobnie do siebie.

W praktyce laboratoryjnej stwierdzono, że charakterystyki poszczególnych ogniw, z powodu wpływu wielu czynników, różnią się nieznacznie między sobą. Dlatego, aby uniknąć dużych błędów, do badań wykorzystano wartości średnie z ekstremalnie różnych charakterystyk. Zastąpienie rzeczywistej charakterystyki równaniem wielomianowym wprowadza kolejną niedokładność, ale w tym przypadku udało się znaleźć równania, które bardzo dokładnie odzwierciedlają przebiegi charakterystyk, prawie w całym zakresie zmienności. Zastosowano prosty model matematyczny silnika prądu stałego, który jednak nie uwzględnia, że w praktyce niektóre wielkości fizyczne w zależności od innych mogą ulegać zmianom (np. rezystancja i indukcyjność uzwojeń czy współczynnik tarcia).

W analizie symulacyjnej układu „ogniwo – silnik” uzyskano wyraźne zróżnicowanie charakterystyk silnika, przy zasilaniu ogniwami paliwowymi różnego typu, zarówno w ustalonym jak i nie ustalonym stanie pracy. Na podstawie wykonanych badań opracowano najważniejsze szczegółowe wnioski:

1. W ogniwie typu AFC z elektrolitem w roztworze wodnym występują większe rezystancyjne spadki napięć, a mniejsze spowodowane przez elektrodowe reakcje chemiczne, w porównaniu z ogniwem typu PEMFC z elektrolitem stałym. Można to stwierdzić na podstawie charakterystyki napięciowo-prądowej, która dla ogniwa PEMFC jest znacznie bardziej nieliniowa i elastyczna przy małych obciążeniach, a mniejsze spadki napięć występują w części liniowej przy obciążeniach większych.
2. Czas trwania stanów nieustalonych (przejściowych) podczas pracy silnika (rozruch, zmiana obciążenia) uzależniony jest od elastyczności charakterystyki napięciowo-prądowej źródła zasilania w danym zakresie zmian obciążenia. Przy większej elastyczności stan nieustalony trwa dłużej.
3. Zmienność napięcia w funkcji prądu ogniwa paliwowego zasilającego silnik, decyduje o zmianach jego prędkości obrotowej i mocy w zależności od momentu obciążenia. Charakterystyka mechaniczna silnika $n = f(M)$ jest bardziej elastyczna przy zasilaniu ogniwem paliwowym typu AFC.

LITERATURA

1. Adamiec M., Dziubiński M.: Computer simulation of “fuel cell – electric motor” system. SAE (2009-24-0085). 9th International Conference on Engines and Vehicles. Neapol 2009.
2. Adamiec M., Dziubiński M.: Alkaliczne ogniwo paliwowe – aspekt sprawności. Przegląd Elektrotechniczny, nr 4, 2009, 182–185.
3. Adamiec M., Dziubiński M.: Sprawność w układzie „ogniwo paliwowe – silnik elektryczny” – badania symulacyjne. Teka Komisji Motoryzacji. Zeszyt nr 33-34 pt. Konstrukcja, Badania, Eksploatacja, Technologia Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Kraków 2008.
4. Hoogers G.: Fuel cell technology handbook. Florida 2003.
5. Kulikovskiy A. A.: The voltage – current curve of a polymer electrolyte fuel cell: exact and fitting equations. Electrochemistry Communications, 4, 2002, 845–852.
6. Małek A., Wendeker M.: Ogniwa paliwowe typu PEM – teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2010.
7. Merksiz J., Pielecha I.: Alternatywne paliwa i układy napędów pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
8. Ogulewicz W., Węcel D., Wiciak G., Łukowicz H., Kotowicz J., Chmielniak T.: Pozyskiwanie energii z ogniw paliwowych typu PEM chłodzonych cieczą. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
9. Pischinger S., Schönfelder C., Ogrzewalla J.: Analysis of dynamic requirements for fuel cell systems for vehicle applications. Journal of Power Sources, 154, 2006, 420–427.
10. Wiak S., Welfle H.: Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2001.
11. Strona internetowa PERM MOTOR GmbH: www.perm-motor.de

THE INFLUENCE OF FUEL CELL TYPE ON CHARACTERISTICS OF SUPPLIED ELECTRIC MOTOR – SIMULATION RESEARCH

Abstract

The paper presents results of the simulation research of „fuel cell – electric motor” system. The simulations were made in Matlab Simulink programme. Construction, properties and application of fuel cells were discussed. Characteristics of electric motor which was supplied by the alkaline fuel cell (AFC) as well as membrane fuel cell (PEMFC) were described. “Fuel cell – motor” system was analyzed in a steady and unsteady state of motor operation.

Key words: fuel cell, electric motor, mathematical model, simulation.