

Dr inż. Bartosz Ceran

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska
e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl

Mgr inż. Agata Orłowska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska
e-mail: agata.orłowska@put.poznan.pl

Mgr inż. Krystian Krochmalny

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska
ul. C.K. Norwida 1/3, 50-370 Wrocław, Polska
e-mail: krystian.krochmalny@pwr.edu.pl

Metoda wyznaczania szybkości spadku wydajności stosu ogniw paliwowych typu PEMFC na podstawie przesunięcia charakterystyki napięciowo-prądowej

The method of determining PEMFC fuel cell stack performance decrease rate based on the voltage-current characteristic shift

Słowa kluczowe: eksploatacja systemów ogniw paliwowych, wskaźniki eksploatacyjne stosu ogniw paliwowych, spadek wydajności stosu po latach eksploatacji, charakterystyka eksploatacyjna stosu.

Streszczenie: Artykuł przedstawia model matematyczny przeznaczony do wyznaczenia szybkości spadku wydajności stosu ogniw paliwowych. Szybkość spadku wydajności stosu ogniw jest wyznaczana na podstawie wartości napięcia średniego stosu. Zaproponowany model wykorzystano do wyznaczenia krzywej mocy i wskaźników eksploatacyjnych stosu ogniw paliwowych o mocy nominalnej 50 kW po 14 000 h ciągłej pracy. Model wykorzystano także do wyznaczenia szybkości zmiany wartości napięcia średniego jedenastoletniego stosu ogniw paliwowych o mocy 1,2 kW. W obu badaniach wyznaczono wartości wskaźników eksploatacyjnych oraz ich różnice względem wielkości nominalnych.

Keywords: fuel cells system exploitation, fuel cell stack exploitation indicators, stack performance decrease after years of operation, stack exploitation characteristics.

Abstract: The article presents mathematical model designed to estimate the rate of performance decrease in fuel cell stack. The fuel cell stack performance decrease rate is determined on the basis of stack average voltage measurements. The proposed model is used to determine power curve as well as exploitation indicators of fuel cell stack with a nominal power of 50 kW after 14 000 hours of continuous operation. The model is also used to determine the average voltage drop for the eleven-year fuel cell stack with a nominal power of 1,2 kW. In both studies, the values of exploitation indicators as well as their differences in relation to nominal values are determined.

1. Wprowadzenie

Wodorowe ogniwa paliwowe z jonowymienną membraną polimerową (PEMFC- ang. Proton Exchange Membrane Fuel Cell) są uznawane za jedną z najbardziej obiecujących i perspektywicznych technologii wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Przewiduje się ich zastosowanie dla elektrowni dużych mocy, małych źródeł rozproszonych [14] oraz sektora transportu [12,30]. Ogniwa paliwowe mogą być eksploatowane w szerokim zakresie zmienności obciążeń elektrycznych cechując się przy tym korzystnymi wartościami wskaźników eksploatacyjnych takich jak: sprawność przetwarzania energii chemicznej paliwa na elektryczną, jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa, jednostkowe zużycie paliwa. Mimo to wskaźniki niezawodnościowe pracy ogniw wciąż osiągają niezadowalające wartości i są główną przyczyną zahamowania komercjalizacji tej technologii na szeroką skalę [21].

Poprawa wskaźników niezawodnościowych i określenie wskaźników eksploatacyjnych jest obecnie aktualnym i ważnym problemem. Rozwój technologii ogniw paliwowych będzie głównym motorem napędowym rozwoju sektora energetyki wodorowej oraz transportu opartego na paliwie wodorowym. Prowadzone są badania nad wykorzystaniem wodoru jako paliwa dodatkowego do silników benzynowych i wysokoprężnych [18,20]. Analiza wyników badań przeprowadzona przez autorów pracy [20] wykazała brak zasadności stosowania wodoru jako paliwa dodatkowego w silnikach o zapłonie samoczynnym. Do zasilania wodorem przystosowuje się głównie silniki o zapłonie iskrowym. W pracy [30] stwierdzono, że jest to jednak rozwiązanie tymczasowe mające na celu wstępne przygotowanie i wdrożenie infrastruktury przechowywania i rozprowadzania wodoru przed wprowadzeniem perspektywicznych ogniw paliwowych.

Ze względu na ciągle wysokie koszty ogniw paliwowych wiele badań nad tą technologią jest wykonywanych za pomocą autorskich modeli matematycznych [2, 34]. Prace dotyczące modelowania stosu ogniw paliwowych można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą prace przedstawiające modele przeznaczone do optymalizacji parametrów stosu według funkcji celu takich jak: minimalizacja kosztów budowy, maksymalizacja gęstości prądu [1,4,6,15,27,32].

W artykule [4] autorzy przedstawiają trójwymiarowy wielofazowy model ogniwa paliwowego typu PEM przeznaczony do zbadania wpływu ciśnienia montażowego na rezystancję styku między warstwą dyfuzji gazu (GDL) a płytką bipolarną. Właściwy dobór wartości ciśnienia montażowego pozwala na wykonanie stosu o dłuższym czasie życia.

W pracy [6] autorzy prezentują model przeznaczony do optymalizacji wymiarów stosu ogniw paliwowych według ulepszonej wersji algorytmu optymalizacji mewy. Model pozwala na wyznaczenie charakterystyki eksploatacyjnej stosu, jednak nie uwzględnia jej przesunięcia po czasie eksploatacji. Z kolei w pracy [1] autorzy przedstawiają model stosu ogniw paliwowych o mocy 500 watów z jonowymienną membraną polimerową zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink. Model służy do wyznaczania wartości referencyjnej prądu elektrycznego dla dowolnego stanu ustalanego.

W pracy [27] autorzy przedstawiają procesy zachodzące w stosie ogniw paliwowych oraz opracowane modele numeryczne mające na celu minimalizację kosztów produkcji stosu i maksymalizację gęstości prądu. Modele te są przeznaczone do wspomagania projektowania stosów ogniw paliwowych.

Opracowywane są nowe techniki modelowania ogniw paliwowych np. z wykorzystaniem tzw. wykresów wiązań [32]. Prowadzone są także badania modelowe nad zwiększeniem efektywności energetycznej poprzez połączenie stosu ogniw z generatorem termoelektrycznym w układ hybrydowy [15].

Wszystkie wyżej wymienione modele matematyczne są budowane w celu wspomagania projektowania stosu ogniw paliwowych. Modele te nie uwzględniają natomiast spadku wydajności stosu po latach eksploatacji.

Do drugiej grupy publikacji dotyczących modelowania stosów należą prace, w których modeluje się procesy degradacyjne zachodzące w stosie podczas jego pracy. Autorzy skupiają się na wyznaczeniu wpływu jednego z elementów konstrukcyjnych, takich jak warstwa dyfuzyjna gazu (z ang. gas diffusion layer – GDL) [23], płytki dwubiegunowe, membrana polimerowa [26] i warstwa katalizatora na elektrodach stosu [31], na charakterystykę napięciowo-prądową. Modele te są wykorzystywane do minimalizacji źródła degradacji i zwiększenia żywotności stosu.

W pracy [26] przedstawiono numeryczny model ogniw paliwowych przeznaczony do badania mechanicznej degradacji membrany spowodowanej lokalnymi nieprężeniami. W celu zmniejszenia naprężeń autorzy sugerują zastosowanie dodatkowej uszczelki w łączeniu elektroda-elektrolit z GDL.

Kolejne prace dotyczą określenia prawdopodobieństwa degradacji danego elementu [25,35]. Autorzy artykułu [25] zaproponowali wykorzystanie drzewa błędów (z ang. fault tree analysis) do wyznaczenia prawdopodobieństwa wystąpienia degradacji elementów stosu ogniw paliwowych. Z kolei w artykule [35] zaproponowano nowatorski model prognozowania degradacji ogniwa paliwowego z membraną wymiany protonów z wykorzystaniem metody filtru cząsteczkowego i ekstrapolacji danych.

Niestety wyżej wymienione modele i proponowane metody nie są nastawione na praktyczne zastosowanie, ponieważ brakuje w nich wykazania, jak postępujące procesy degradacyjne wpłyną na wydajność stosu ogniw paliwowych po wielu godzinach bądź latach eksploatacji a przede wszystkim jak zmienią się wartości wskaźników eksploatacyjnych. Znajomość zmian wartości wskaźników eksploatacyjnych będzie miała decydujący wpływ na poprawne określenie kosztów eksploatacji stosu.

Publikacje dotyczące modelowania hybrydowych systemów wytwórczych z ogniwem paliwowym [16,19,28] potwierdzają, że zapotrzebowanie na model wykazujący wpływ starzenia się stosu ogniw paliwowych na wskaźniki eksploatacyjne jest obecnie bardzo wysokie. Techniki modelowania systemów hybrydowych przedstawione w wyżej wymienionych pracach nie uwzględniają spadku wydajności stosu po latach eksploatacji. W konsekwencji, w takim systemie hybrydowym może dojść do niezbilansowania energii [24], co będzie skutkowało zwiększeniem poboru z sieci elektroenergetycznej [9].

Analogicznie, jeśli ogniwo paliwowe jest wykorzystywane w sektorze transportu [3,11,29], nieuwzględnienie spadku wydajności stosu może doprowadzić do błędnego oszacowania zasięgu pojazdu lub zapotrzebowania na paliwo, co spowoduje błędne oszacowanie kosztów eksploatacji pojazdu.

W celu poprawnego określenia kosztów eksploatacyjnych pojazdu lub systemu hybrydowego wytwarzania energii elektrycznej z ogniwem paliwowym należy budować modele matematyczne, które umożliwią określenie spadku wydajności ogniw po latach eksploatacji.

Głównym celem niniejszego artykułu jest prezentacja modelu matematycznego pozwalającego na wyznaczenie szybkości spadku wydajności stosu ogniw paliwowych oraz przesunięcia charakterystyki eksploatacyjnej stosu względem charakterystyki dla danych katalogowych po zadanym czasie użytkowania. Model pozwala na wyznaczenie wartości wskaźników eksploatacyjnych tj. sprawności elektrycznej, jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej, jednostkowego zużycia paliwa na produkcję energii elektrycznej i porównanie ich z wartościami wskaźników odpowiadającymi charakterystyce katalogowej stosu.

2. Model matematyczny ogniwa paliwowego

Opisywane w literaturze modele matematyczne ogniw paliwowych pozwalają na wyznaczenie charakterystyki eksploatacyjnej dla warunków znamionowych (parametrów katalogowych). Proponowane modele nie uwzględniają spadku wydajności stosu po latach życia i eksploatacji.

Zaproponowana przez autorów metoda analizy pozwala na wyznaczenie charakterystyki eksploatacyjnej stosu ogniw paliwowych dla danych znamionowych, oraz charakterystyki po „n” latach eksploatacji. Z drugiej strony proponowany algorytm można wykorzystać do określenia szybkości spadku wydajności stosu na podstawie przesunięcia między charakterystyką katalogową a charakterystyką stosu po zadanym okresie użytkowania.

Metoda pozwala na szybkie wyznaczanie sprawności oraz pozostałych wskaźników eksploatacyjnych stosu ogniw paliwowych.

Sprawność przetwarzania energii chemicznej paliwa na elektryczną przez stos ogniw paliwowych można przedstawić za pomocą wzoru (1) [7]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{n}_{H_2} \cdot Q_{W_{H_2}}} = \frac{U \cdot I}{\dot{n}_{H_2} \cdot Q_{W_{H_2}}} \quad (1)$$

gdzie: P_{el} – moc elektryczna stosu ogniw paliwowych, U – napięcie stosu ogniw paliwowych, I – natężenie prądu, \dot{n}_{H_2} – molowy strumień wodoru, $Q_{W_{H_2}}$ – wartość opałowa wodoru odniesiona odpowiednio do 1 mola wodoru.

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej przez stos definiuje wzór (2):

$$q_{el} = \frac{\dot{n}_{H_2} \cdot Q_{W_{H_2}}}{P_{el}} \left[\frac{kJ}{kJ} \right] \quad (2)$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia paliwa na produkcję energii elektrycznej można obliczyć za pomocą wzoru (3):

$$b_{el} = \frac{V_{H_2}}{P_{el}} \left[\frac{Nm^3 H_2}{kWh} \right] \quad (3)$$

gdzie: V_{H_2} – objętościowy strumień wodoru.

Należy zaznaczyć, że producenci systemów ogniw paliwowych typu PEMFC w specyfikacji technicznej podają dwie wartości sprawności przetwarzania energii chemicznej paliwa na elektryczną: wartość sprawności odniesioną do wartości opałowej wodoru (ang. LHV – Low Heating Value) oraz wartość sprawności odniesioną do ciepła spalania wodoru (ang. HHV – High Heating Value). Analiza przedstawiona w tej pracy jest prowadzona w odniesieniu do wartości opałowej wodoru, ponieważ wartość wskaźnika q_{el} definiuje się, w klasycznej teorii eksploatacji źródeł wytwórczych, w odniesieniu do tej wielkości.

Definiowanie sprawności ogniwa paliwowego w odniesieniu do wartości opałowej pozwala na porównywanie jej wartości z innymi technologiami wytwarzania energii elektrycznej wykorzystującymi energię chemiczną paliwa, np. konwencjonalne bloki parowe, bloki gazowe i gazowo-parowe, silniki gazowe czy technologie wykorzystujące biomasę.

Wzór na strumień molowy wodoru można wyznaczyć na podstawie II prawa elektrolizy Faradaya (4):

$$q = n \cdot z \cdot F \quad (4)$$

gdzie: q [C] – ładunek elektryczny, n – liczba moli gazu, z [-] liczba elektronów koniecznych do uwolnienia cząsteczki dla $H_2 = 2$, tzn. 2 mole elektronów są potrzebne do uwolnienia 1 mola H_2 , dla $O_2 = 4$, F [C/mol] – stała Faradaya.

Dzieląc równanie (4) przez czas t otrzymuje się zależność na natężenie prądu elektrycznego (5):

$$I = \frac{n}{t} \cdot z \cdot F \quad (5)$$

Z równania (5) można wyznaczyć strumień molowy oznaczony jako \dot{n} (6):

$$\dot{n} = \frac{n}{t} = \frac{I}{z \cdot F} \quad (6)$$

Dla stosu ogniw paliwowych strumień molowy wodoru jest proporcjonalny do liczby celek wchodzących w skład stosu, stąd:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{I \cdot n_{celek}}{z \cdot F} \quad (7)$$

gdzie: n_{celek} – liczba celek (pojedynczych ogniw), z których zbudowany jest stos

W teorii ogniw paliwowych praktyczne zastosowanie ma wielkość nazwana potencjałem termoneutralnym, który jest zdefiniowany wg wzoru (8) [22]:

$$E_t^0 = - \frac{\Delta H_{H_2O(g)}^0}{z \cdot F} \quad (8)$$

gdzie: E_t^0 – potencjał termoneutralny [V], $\Delta H_{H_2O(g)}^0$ – standardowa entalpia tworzenia wody w fazie gazowej [kJ/mol], indeks “0” oznacza warunki standardowe ($T = 298$ K, $p = 10^5$ Pa).

Potencjał termoneutralny jest teoretyczną wartością napięcia jakie osiągnie ogniwo paliwowe przy teoretycznym założeniu, że 100 % strumienia dostarczonej energii chemicznej zostanie przekształcone w energię elektryczną.

Standardowa entalpia tworzenia wody w fazie gazowej $\Delta H_{H_2O(g)}$ energetycznie odpowiada wartości opałowej wodoru, przy założeniu, że woda jest produktem w stanie gazowym (9) [17]:

$$-\Delta H_{H_2O(g)}^0 = Q_{W_{H_2}} \quad (9)$$

Podstawiając równania (4), (8), (9) do równania (1) wzór na sprawność wytwarzania energii elektrycznej przez stos ogniw paliwowych przyjmuje postać wzoru (10):

$$\eta_{el} = \frac{U}{n_{celek} \cdot E_t^0} \quad (10)$$

Wartość średniego napięcia stosu ogniw paliwowych zdefiniowana jest jako stosunek napięcia stosu do liczby celek (pojedynczych ogniw) tworzących stos:

$$U_{av} = \frac{U}{n_{celek}} \quad (11)$$

Po podstawieniu zależności (11) do wzoru (10) wzór na sprawność stosu można przedstawić z pomocą zależności:

$$\eta_{el} = \frac{U_{av}}{E_t^0} \quad (12)$$

Wzór (12) na sprawność przetwarzania energii chemicznej paliwa na elektryczną przez stos jest bardzo praktyczny, ponieważ do wyznaczenia sprawności wystarczy pomiar napięcia stosu i znajomość liczby pojedynczych ogniw (celek) tworzących stos. Nie potrzeba natomiast dokonywać pomiarów strumienia zużywanego wodoru.

Miarą zmiany sprawności stosu jest zmiana wartości średniego napięcia stosu. Zmiana sprawności jest zgodnie z zależnością (13) wprost proporcjonalna do zmiany wartości średniego napięcia stosu:

$$\Delta\eta_{el} = \frac{\Delta U_{av}}{E_t^0} \quad (13)$$

Zmianę wartości średniego napięcia stosu definiuje wzór (14):

$$\Delta U_{av} = U_{av} - \frac{dU_{av}}{dt} \cdot t \quad (14)$$

gdzie: $\frac{dU_{av}}{dt}$ – szybkość zmiany wartości średniego napięcia stosu w czasie [$\mu\text{V/h}$], t – czas życia stosu ogniw paliwowych [h].

Zmianę mocy stosu można wyznaczyć na podstawie zależności (15):

$$\Delta P_{el} = \Delta\eta_{el} \cdot \dot{n}_{H_2} \cdot Q_{WH_2} \quad (15)$$

Przedstawiony powyżej algorytm pozwala w szybki sposób na określenie szybkości zmiany wartości średniego napięcia stosu, a co za tym idzie szybkości spadku generowanej mocy elektrycznej i sprawności przetwarzania energii chemicznej paliwa na elektryczną a także wzrostu wartości wskaźników jednostkowego zużycia paliwa i jednostkowego zużycia energii chemicznej przez stos.

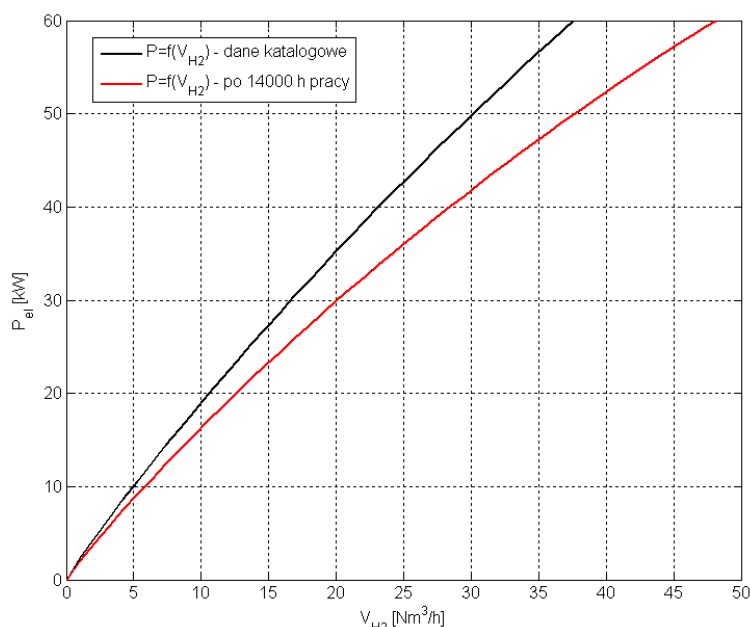
Dane wejściowe modelu stanowią parametry katalogowe stosu oraz wyznaczona na podstawie pomiarów wartość napięcia stosu. Na podstawie wzorów (1) – (15) wyznaczone są wartości wskaźników eksploatacyjnych stosu oraz wykreślane charakterystyki eksploatacyjne dla parametrów katalogowych oraz po zadanym okresie użytkowania. W celu wyznaczenia szybkości spadku wydajności stosu algorytm wykonuje szereg symulacji dla różnych wartości szybkości zmian średniego napięcia stosu z zadanym krokiem i ocenia, z zadaną dokładnością, dopasowanie charakterystyki rzeczywistej do symulowanej.

3. Wyznaczanie wskaźników eksploatacyjnych na podstawie szybkości zmiany wartości średniego napięcia stosu

Zmianę wartości średniego napięcia stosu ΔU_{av} można aproksymować funkcją liniową [33]. Szybkość zmiany wartości średniego napięcia w czasie dla systemów o mocy rzędu kilkudziesięciu kilowatów zawiera się, na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych, w zakresie od około 3 do 9 $\mu\text{V/h}$ [33]. Wartość ta zależy od wielu czynników, takich jak kultura eksploatacji stosu (przestrzeganie procedur ruchowych, rozruchu, odstawiania stosu), warunki pracy stosu (warunki atmosferyczne, temperatura otoczenia), charakter pracy stosu (ciągła, przerywana) itp.

Pilotażowa instalacja zbudowana z ogniw PEM o mocy 50 kW (12 stosów o mocy 4,2 kW) w Niderlandach, w miejscowości Delfzijl przepracowała bez przerw 14 000 h. Pomiar w czasie eksploatacji wykazały, że wartość średniego napięcia stosu zmniejszała się z szybkością średnią 8 $\mu\text{V/h}$ [33].

Bazując na równaniach (1) – (15) oraz autorskim kodzie opracowanym w środowisku Matlab przeprowadzono symulacje w celu wyznaczenia krzywej mocy stosu oraz wartości wskaźników eksploatacyjnych. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 1 oraz w tabeli 1.



Rys. 1. Wpływ zmiany wartości U_{av} na krzywą mocy stosu ogniw paliwowych o mocy 50 kW – badania symulacyjne

Tabela 1. Wskaźniki eksploatacyjne stosu ogniw paliwowych 50 kW – badania symulacyjne

| | Dane znamionowe | Po 14 000 h eksploatacji |
|--|-----------------|--------------------------|
| P [kW] | 50 | 42,4 |
| ΔP [kW] | | -7,6 |
| η_{el} [-] | 0,55 | 0,46 |
| $\Delta \eta_{el}$ [-] | | -0,09 |
| q_{el} [kJ/kJ] | 1,81 | 2,16 |
| Δq_{el} [kJ/kJ] | | 0,35 |
| b_{el} [$\text{Nm}^3\text{H}_2/\text{kWh}$] | 0,60 | 0,72 |
| Δb_{el} [$\text{Nm}^3\text{H}_2/\text{kWh}$] | | 0,12 |

Po 14 000 h ciągłej pracy sprawność wytwarzania energii elektrycznej przez instalację zmniejszyła swoją wartość o 16,36% spadając z 55% do wartości 46%. Efektem spadku sprawności jest spadek wartości mocy elektrycznej generowanej przez stos oraz zwiększenie wartości wskaźników jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa oraz jednostkowego zużycia paliwa. Moc nominalna stosu zmniejszyła się o 15,2%. Oznacza to, że dodatkowe 7,6 kW strumienia energii chemicznej wodoru zostanie zamienione przez instalację na moc cieplną kosztem wartości generowanej mocy elektrycznej. Wartość wskaźnika q_{el} wzrosła o 19,3% w stosunku do wartości nominalnej, natomiast wartość wskaźnika b_{el} wzrosła o 20%.

4. Wyznaczanie wartości szybkości zmiany napięcia średniego stosu na podstawie pomiaru charakterystyki eksploatacyjnej

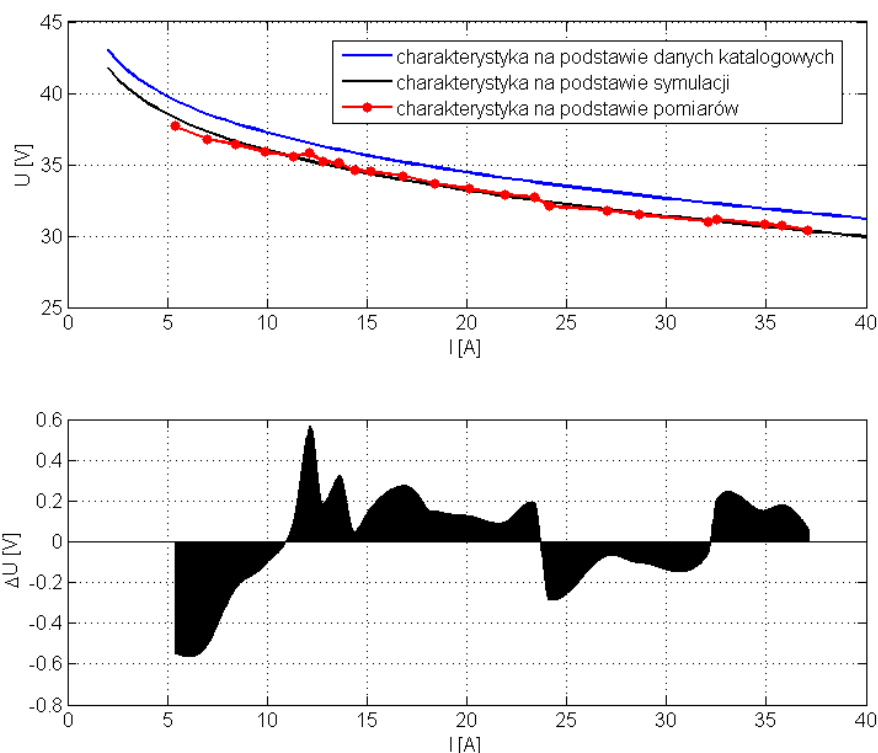
W celu weryfikacji modelu wykorzystano go do dopasowania charakterystyki napięciowo-prądowej stosu ogniw paliwowych o mocy 1,2 kW i wyznaczenia szybkości zmiany wartości napięcia średniego stosu. Badany stos ogniw paliwowych jest elementem systemu treningowego NEXA, który znajduje się w laboratorium konwersji energii Politechniki Wrocławskiej.

System NEXA jest urządzeniem przeznaczonym do awaryjnego zasilania urządzeń stało i przemiennoprądowych. Oprócz stosu o mocy 1,2 kW system zbudowany jest z [8]:

- układu zasilania wodorowego – butle ze sprężonym wodorem 20 MPa, reduktor ciśnienia wodoru, regulator ciśnienia wodoru, zawór nadmiarowego ciśnienia, zawór elektromagnetyczny odcinający dopływ paliwa podczas wyłączania systemu, detektor wycieku wodoru,
- układu zasilania powietrznego – dmuchawa typu Roots,
- układu chłodzenia stosu – stos ogniw w systemie NEXA jest chłodzony powietrzem za pomocą wentylatora chłodzącego,
- elektronicznego systemu sterowania – komputer sterujący, czujniki pomiarowe.

Wiek stosu ogniw paliwowych wynosi 11 lat. Na podstawie przeprowadzonej symulacji określona wartość szybkości zmiany napięcia średniego wynosi 0,34 $\mu\text{V/h}$. Dla tej wartości uzyskuje się najlepsze dopasowanie charakterystyki symulowanej do mierzonej. Niska, w porównaniu z systemem 50 kW, wartość szybkości zmiany napięcia średniego jest spowodowana tym, że stos ogniw 1,2 kW składa się z 46 celek. Dodatkowo system NEXA pracuje w trybie przerywanym, jest wykorzystywany tylko do celów badawczych i dydaktycznych.

Na rysunku 2a przedstawiono charakterystyki stosu ogniw paliwowych: nominalną, charakterystykę wyznaczoną na podstawie pomiarów (pomiar wykonany w marcu 2020) oraz charakterystykę uzyskaną na podstawie symulacji. Rysunek 2b przedstawia dopasowanie charakterystyki mierzonej do symulowanej.



Rys. 2. a) Charakterystyki stosu ogniw paliwowych: katalogowa, symulowana, zmierzona, b) ΔU między charakterystyką symulowaną a zmierzoną.

Odchylenia widoczne na charakterystyce pomiarowej są efektem działania układu płukania anody w czasie wykonywania pomiarów [5]. W tym punkcie różnica między wielkością mierzoną a symulowaną wynosi około 0,6 V. W większości przedziału obszaru omowego [10,13] charakterystyki napięciowo – prądowej różnica między punktami wynosi około 0,2 V.

W tabeli 2 przedstawiono porównanie wskaźników eksploatacyjnych obliczonych na podstawie danych katalogowych oraz na podstawie wyników symulacji.

Tabela 2. Wskaźniki eksploatacyjne stosu ogniw paliwowych 1,2 kW

| | Dane znamionowe | Po 11 latach |
|---|-----------------|--------------|
| P_{el} [kW] | 1,2 | 1,16 |
| ΔP [kW] | | -0,040 |
| η_{el} [-] | 0,550 | 0,521 |
| $\Delta\eta_{el}$ [-] | | -0,029 |
| q_{el} [kJ/kJ] | 1,840 | 1,920 |
| Δq_{el} [kJ/kJ] | | 0,080 |
| b_{el} [Nm ³ H ₂ /kWh] | 0,610 | 0,640 |
| Δb_{el} [Nm ³ H ₂ /kWh] | | 0,030 |

Niska wartość szybkości zmiany napięcia średniego stosu skutkuje mniejszymi zmianami wartości mocy stosu i wskaźników eksploatacyjnych. Moc nominalna stosu ogniw paliwowych po 11 latach spadła z 1,2 kW do 1,16 kW, zmniejszając swoją wartość o 3,33%. Sprawność przemiany energii chemicznej wodoru na energię elektryczną zmalała o 5,27%. Wartość wskaźnika jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej wzrosła o 4,35%. Jednostkowe zużycie paliwa na produkcję jednej kWh energii elektrycznej wzrosło o 4,92%.

Mając na uwadze fakt, że stos pracuje w warunkach laboratoryjnych z zachowaniem wysokiej kultury eksploatacji wyniki należy uznać za poprawne.

5. Podsumowanie

Aktualizacja charakterystyk eksploatacyjnych ogniw paliwowych z jonowymienną membraną polimerową jest kluczowym zagadnieniem w momencie rozwoju technologii opartych na wodorze tj. rozproszonej generacji energii elektrycznej oraz elektromobilności.

Zaproponowana metoda pozwala w łatwy i szybki sposób określić spadek wydajności stosu ogniw paliwowych, co pozwala na wyznaczenie aktualnych wartości wskaźników eksploatacyjnych stosu. Z kolei, wyznaczone wartości wskaźników eksploatacyjnych po latach użytkowania stosu pozwalają na bardziej dokładne oszacowanie kosztów eksploatacji systemu ogniw paliwowych.

Proponowana metoda stanowi przydatne narzędzie do przeprowadzania analizy studium wykonalności danego projektu (np. hybrydowy system wytwórczy z magazynem energii w postaci wodoru, samochód lub autobus na wódór), na podstawie której, inwestor będzie w stanie dokładniej ocenić ryzyko związane z danym przedsięwzięciem, urzeczywistniając szacunki techniczno-finansowe. Proponowany model może stanowić ułatwienie w planowaniu długoterminowej pracy stosów ogniw paliwowych zarówno w układach generacji rozproszonej jak i w pojazdach wodorowych.

Zaletami proponowanej metody są jej prostota, krótki czas obliczeń oraz fakt, że do określenia wydajności stosu ogniw paliwowych wystarczy wykonać pomiar napięcia generowanego przez stos.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że wartość spadku wydajności stosu zależy od jego mocy nominalnej (pośrednio od liczby celek) oraz trybu i warunków pracy (praca ciągła, praca przerywana). Przedstawiony w artykule model stanowi przyczynek do rozwoju metod aktualizacji charakterystyk eksploatacyjnych stosów ogniw paliwowych. Zagadnienia te będą miały coraz większe znaczenie ze względu na spodziewaną decentralizację struktury sektora wytwórczego systemu elektroenergetycznego, rozwój hybrydowych systemów wytwórczych ze stosami ogniw paliwowych oraz elektromobilności. Spadek wydajności stosu ogniw paliwowych w trakcie lat eksploatacji to aspekt niezwykle istotny dla inwestorów zainteresowanych nowymi technologiami wodorowymi.

References

1. Abdelnasir O, Smith D, Alaswad A, Amiri A, Sodre JR, Lucchesi A. Proton-exchange membrane (PEM) fuel cell system mathematical modelling. Paper presented at SDEWES - 14th Conference on Sustainable Development of Energy, 2019; Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia.
2. Abdul Rasheed RK, Liao Q, Caizhi Z, Chan SH. A review on modelling of high temperature proton exchange membrane fuel cells (HT-PEMFCs). *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(5): 3142-3165, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.078>.
3. Álvarez Fernández R, Corbera Caraballo S, Beltrán Cilleruelo F, Lozano JA. Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 81(1): 655-668, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.047>.
4. Atyabi SA, Afshari E, Wongwises S, Yan WM, Hadjadj A, Shadloo MS. Effects of assembly pressure on PEM fuel cell performance by taking into accounts electrical

- and thermal contact resistances. *Energy* 2019; 179: 490-501, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.031>.
5. Barbir F. *PEM Fuel Cell: Theory and Practice*. New York: Elsevier Academic Press, 2005, 99–113.
 6. Cao Y, Li Y, Zhang G, Jermsittiparsert K, Razmjoooy N. Experimental modeling of PEM fuel cells using a new improved seagull optimization algorithm. *Energy Reports* 2019; 5: 1616-1625, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.013>.
 7. Ceran B, Bernstein P.A. Operational characteristics of proton exchange membrane (PEM) fuel cells, *Przegląd Elektrotechniczny* 2014; 10: 102 – 105, 2014, doi: 10.12915/pe.2014.10.26.
 8. Ceran B, Długosz J, Kruczek-Pawlak H. Analiza energetyczna stosu ogniwo paliwowych z jonowymienną membraną polimerową PEMFC, *Poznań University of Technology Academic Journals*, 2016; 86: 301-312.
 9. Ceran B, Orłowska A. The Impact of Power Source Performance Decrease in a PV/WT/FC Hybrid Power Generation System on the Result of a Multi-Criteria Analysis of Load Distribution. *Energies* 2019; 12(18): 3453, <https://doi.org/10.3390/en12183453>.
 10. Ceran B. Charakterystyki eksploatacyjne stosu ogniwo paliwowych typu PEMFC. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 2014; 17(3): 135–146.
 11. Chandrasekar C, Amruth Kumar L. A Novel Approach on Range Prediction of a Hydrogen Fuel Cell Electric Truck. *SAE Technical Paper* 2019; 2019-28-2514.
 12. Chmielniak T, Lepszy S, Mońka P. Energetyka wodorowa – podstawowe problemy. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 2017; 20(3): 55–66.
 13. Dudek M, Celowski P, Lis B, Raźniak A, Dudek P. Laboratoryjny generator energii elektrycznej o mocy 360 W zawierający niskotemperaturowy stos ogniwo paliwowych PEMFC chłodzony za pomocą medium ciekłego. *Przegląd Elektrotechniczny* 2016; 10: 235 – 242, 2014, doi:10.15199/48.2016.10.54.
 14. Gharehpetian GB, Mohammad Mousavi Agah S. *Distributed Generation Systems. Design, Operation and Grid Integration*. Butterworth-Heinemann. An imprint of Elsevier, 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804208-3.09993-3>.
 15. Guo X, Zhang H, Wang J, Zhao J, Wang F, Miao H, Yuan J, Hou S. A new hybrid system composed of high-temperature proton exchange fuel cell and two-stage thermoelectric generator with Thomson effect: Energy and exergy analyses. *Energy* 2020; 195: 117000, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117000>.
 16. Hosseinalizadeh R, Shakouri GH, Amalnick MS, Taghipour P. Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 54: 139-150, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.046>.
 17. Kabza A. Fuel Cell Formulary, www.kabza.de, dostęp: 31.03.2020.
 18. Keršys A, Kalisinskas D, Pukalskas S, Vilkauskas A, Keršys R, Makaras R. Investigation of the influence of hydrogen used in internal combustion engines on exhaust emission. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (4): 384–389.
 19. Khan A, Javaid N. Optimum Sizing of PV-WT-FC-DG Hybrid Energy System using Teaching Learning-Based Optimization. *International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT) Islamabad, Pakistan, 2019; 127-1275, 10.1109/FIT47737.2019.00033*.
 20. Kruczyński S, Ślęzak M, Gis W, Orliński P. Evaluation of the impact of combustion hydrogen addition on operating properties of self-ignition engine. *Eksploatacja i*

- Niezawodność – Maintenance and Reliability 2016; 18 (3): 343–347, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.3.4>.
21. Mayur M, Gerard M, Schott P, Bessler WG. Lifetime Prediction of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell under Automotive Load Cycling Using a Physically-Based Catalyst Degradation Model. *Energies* 2018; 11: 2054, doi:10.3390/en11082054.
 22. O'Hayre R, Cha SW, Colella W, Prinz FB. *Fuel Cell Fundamentals*, 3rd Edition, Wiley 2016.
 23. Park J, Oh H, Ha T, Lee YI, Min K. A review of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: Durability and degradation. *Applied Energy* 2015; 155: 866-880, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.068>.
 24. Paska J. Chosen aspects of electric power system reliability optimization. *Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (2): 202–208.
 25. Placca L, Kouta R. Fault tree analysis for PEM fuel cell degradation process modelling. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(19): 12393-12405, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.093>.
 26. Qiu D, Peng L, Liang P, Yi P, Lai X. Mechanical degradation of proton exchange membrane along the MEA frame in proton exchange membrane fuel cells. *Energy* 2018; 165: 210-222, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.136>.
 27. Secanell M, Jarauta A, Kosakian A, Sabharwal M, Zhou J. *PEM Fuel Cells, Modeling*. 2017; Springer, New York, NY.
 28. Shayeghi H, Shahryari E, Moradzadeh M, Siano P. A Survey on Microgrid Energy Management Considering Flexible Energy Sources. *Energies* 2019; 12(11): 2156, <https://doi.org/10.3390/en12112156>.
 29. Sprik S, Thornton MJ, Brooks K, Tamburello DA. Performance Modeling of Materials-Based Hydrogen Storage Systems for Automotive Applications. 2017 AIChE Annual Meeting, 29 October - 3 November 2017, Minneapolis, Minnesota.
 30. Sroka ZJ. Durability of engine components due to alternative fuels. *Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2007; 4(36): 9-15.
 31. Thangavelautham J. Degradation in PEM fuel cells and mitigation strategies using system design and control. T. Taner (Ed.), *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, London: Intech Open Ltd, 2018, pp. 63-95, 10.5772/intechopen.72208.
 32. Vasilyev A, Andrews J, Jackson LM, Dunnett SJ, Davies B. Component-based modelling of PEM fuel cells with bond graphs. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42: 29406-29421, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.004>.
 33. Verhage A, Gerits J, Manders T. Duration Tests of PEM Fuel Cells in a 50 kW Pilot Power Plant. In *Proceedings of the 18th World Hydrogen Energy Conference (WHEC)*, Essen, Germany, 2010; 16–20 May: 63–67.
 34. Wu H-W. A review of recent development: Transport and performance modeling of PEM fuel cells. *Applied Energy* 2016; 165: 81-106, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.075>.
 35. Zhou D, Wu Y, Gao F, Breaz E, Ravey A, Miraoui A. Degradation Prediction of PEM Fuel Cell Stack Based on Multiphysical Aging Model With Particle Filter Approach. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2017; (53)4: 4041-4052, 10.1109/TIA.2017.2680406.