

Modelowanie pracy ogniw paliwowych w pojazdach wodorowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozwój badań nad ogniwami paliwowymi oraz wykorzystanie ich w motoryzacji. Omówiono aspekty modelowania ogniw paliwowych – ich zasadę działania, równanie Nernsta oraz najważniejsze parametry. Zaprezentowano aplikację komputerową służącą do symulacji pracy układu zasilania. Przeprowadzono analizę zachowania się ogniw paliwowych oraz akumulatora w wodorowym autobusie miejskim. Uzyskane wyniki zaprezentowano w postaci wykresów i omówiono.

Abstract. The paper presents the development of research on fuel cells and their use in automotive applications. Aspects of fuel cell modelling are discussed - their principle of operation, Nernst equation and most important parameters. Computer application used for simulation of power system operation was presented. The analysis of fuel cell and battery behavior in a hydrogen city bus was performed. Obtained results are presented as graphs and discussed. (**Modelling the operation of fuel cells in hydrogen vehicles**).

Słowa kluczowe: energochłonność pojazdów, modelowanie ogniw chemicznych, ogniwo paliwowe, pojazd wodorowy.

Keywords: energy consumption of vehicles, chemical cell modelling, fuel cell, hydrogen vehicle.

Wstęp

W ostatnich latach, w wielu mediach i gremiach, coraz więcej mówi się na temat pojazdów wodorowych, czyli – w rozumieniu ustawy o elektromobilności i paliwach alternatywnych – *pojazdach wykorzystujących do napędu energię elektryczną wytworzoną z wodoru w zainstalowanych w nich ogniwach paliwowych*. Generują one energię elektryczną w wyniku reakcji utleniania paliwa. W większości rozwiązań proces ten charakteryzuje się stosunkowo wysoką sprawnością (przekraczającą 50%) [1]. Co więcej, wykorzystują one do napędu silniki elektryczne, które również wyróżniają się bardzo wysoką sprawnością (ich znamionowa sprawność zazwyczaj przekracza 90%) [2]. Warto także podkreślić, że silnik elektryczny, pełniący funkcję napędu pojazdu, nie zużywa energii podczas pracy na biegu jałowym (np. na postoju w korku miejskim), a podczas hamowania umożliwia rekuperację energii. Bez wątpienia, wraz z niemal bezgłośną pracą i brakiem emisji gazów cieplarnianych, są to kluczowe zalety pojazdów z napędem elektrycznym (tj. elektrycznych i wodorowych) w porównaniu do klasycznych rozwiązań z napędem spalinowym, niezależnie od zastosowanego paliwa (sprawność silników spalinowych wynosi około 30-45%, a wypadkowa sprawność układu napędowego w pojazdach w praktyce jest znacznie niższa) [3].

Większość ogniw paliwowych do produkcji energii elektrycznej wykorzystuje wodór (na anodzie) oraz tlen (na katodzie) – stąd ich nazwa: ogniwa wodorowe. W odróżnieniu od ogniw galwanicznych, podczas pracy ogniw paliwowych nie zmienia się skład chemiczny elektrod i elektrolitu. Dzięki temu nie zachodzi potrzeba odtwarzania stanu pierwotnego poprzez czasochłonne ładowanie, a jedynie uzupełnianie paliwa. To właśnie ta kwestia jest wciąż hamulcem ograniczającym rozwój samochodów wodorowych, mimo że pierwsze ogniwo paliwowe zostało zbudowane już prawie półtora wieku temu. Problem z tankowaniem wodoru związany jest przede wszystkim z brakiem stacji do tankowania wodoru. Co prawda kilka miesięcy temu została zbudowana pierwsza w Polsce stacja z wodorem, ale jest to prywatna stacja zlokalizowana w Warszawie (na terenie Telewizji Polsat), a najbliższa publiczna znajduje się w Berlinie. Na szczęście zapowiadane są budowy kolejnych stacji do tankowania

wodoru. Nadzieje te potęguje projekt *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040* (opracowywana przez ekspertów Ministerstwa Klimatu i Środowiska oraz Międzyresortowy Zespół do spraw gospodarki wodorowej), której jednym z celów jest wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie [4]. W stacjach takich do tankowania aut osobowych, zgodnie z normą ISO 17268, wykorzystuje się wodór H₇₀ (przechowywany w formie lotnej i pompowany pod ciśnieniem 700 bar w temperaturze 15°C), które umożliwia zatankowanie w ciągu kilku minut około 5 kg wodoru, co przeciętnie pozwoli na przejechanie około 600 km. W przypadku autobusów i pojazdów ciężarowych do tankowania wykorzystuje się wodór H₃₅ (przechowywany w formie lotnej i pompowany pod ciśnieniem 350 bar w temperaturze 15°C), co umożliwi w ciągu 15 minut uzupełnienie 30 kg wodoru [5]. Przeciętnie taka ilość pozwala na pokonanie przez autobus około 400 km. Niestety należy dodać, że w sprzedaży detalicznej koszt wodoru to około 9,50 Euro/kg, a hurtowej 3,80 Euro/kg, co sprawia, że aktualnie nie jest to cena zachęcająca do zakupu pojazdu wodorowego.

Zagadnieniem związanym z tematyką pojazdów wodorowych jest analiza pracy ich układów zasilania. Proces ten jest bardzo złożony i wymaga stosowania zaawansowanych metod obliczeniowych [1,3,6-9]. Mimo to jest to ważny obszar nauki, ponieważ każdy projekt pojazdu wymaga indywidualnej analizy pod kątem zapotrzebowania na energię oraz maksymalną dostępną moc [8]. Na tej podstawie w przedstawionej pracy podjęto tematykę modelowania pracy ogniw wodorowych w pojazdach.

Modelowanie pracy ogniw wodorowych

Zasada działania ogniw wodorowych została opisana matematycznie przez Walthera Hermanna Nernsta w 1887 roku. Równanie to, znane jako równanie Nernsta, które wyraża równowagowy potencjał elektrody E (siłę elektromotoryczną) względem jej potencjału standardowego E^0 (teoretycznego napięcia jałowego ogniwa) i stężenia substancji biorących udział w procesie elektrodowym [7]:

$$(1) \quad E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{a_{\text{ox}}}{a_{\text{red}}} \right)$$

gdzie: R – stała gazowa, T – temperatura, z – liczba wymienianych elektronów, a – aktywność chemiczna indywidualów chemicznych biorących udział w reakcji elektrodowej (red – redukcji i ox – oksydacji), F – stała Faradaya.

Napięcie na zaciskach ogniwa paliwowego U zmniejszone jest dodatkowo o straty wynikające z szybkości reakcji elektrodowych (polaryzacja aktywacyjna) i koncentracji stężenia substratów reakcji w pobliżu elektrod (polaryzacja koncentracji), a także z powodu rezystancji wewnętrznej (polaryzacja omowa) [10]. Straty te zależą głównie od natężenia pobieranego z ogniwa prądu, dlatego wartość napięcia U może być wyznaczana na podstawie zależności fizyko-chemicznych opisujących te procesy czy empirycznych wzorów, ale w przypadku analiz zachowania się ogniwa paliwowego w obwodach elektrycznych najczęściej stosuje się obwody ekwiwalentne (schematy zastępcze). Składają się one z elementów rezystancyjnych i pojemnościowych, które odzwierciedlają skalę i inercję procesów elektrochemicznych powodujących straty.

Ogniwa paliwowe w pojazdach wodorowych nie zasilają bezpośrednio silnika napędowego (ze względu na dużą inercję układu sterowania), tylko podładowują akumulatory z mocą, dla której ogniwo pracuje w możliwie wysokiej sprawności, cyklicznie załączając się i rozłączając w zależności od stanu naładowania akumulatora. Do oceny tego stanu stosowany jest parametr SOC (ang. State of Charge). Określa on ilość ładunku, który pozostał w akumulatorze elektrochemicznym w stosunku do jego pojemności (wzór 2). Najczęściej wyrażany jest [%]. Wartość 100% jest równoznaczna z akumulatorem naładowanym w pełni, zaś 0% oznacza zupełne rozładowanie.

$$(2) \quad SOC = 1 - \frac{\int_0^{t_R} i(t) dt}{C}$$

gdzie: t_R – czas pobierania ładunku, licząc od stanu pełnego naładowania, $i(t)$ – prąd przepływający przez ogniwo, C – pojemność akumulatora.

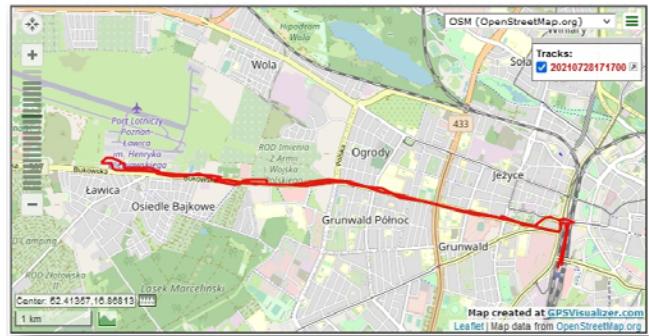
Przykład symulacji pracy układu zasilania w wodorowym autobusie miejskim

System zasilania samochodów wodorowych (FCEV) różni się od analogicznego rozwiązania w pojazdach elektrycznych (EV) [11] tym, że oprócz akumulatorów zasilających układ napędowy posiada ogniwo paliwowe uzupełniające energię w akumulatorach – pełniące rolę tzw. *range extendera*. Z tego względu akumulatory w FCEV mogą mieć mniejszą pojemność, jednak muszą być wystarczające, aby zapewnić możliwość dostarczania odpowiedniej mocy podczas przyspieszania oraz hamowania odzyskowego. Tymczasem moc ogniwa wodorowego może ograniczać się do średniej mocy pojazdu, ponieważ jego zadaniem jest uzupełnianie energii w akumulatorze. W przypadku samochodów, moc ogniwa paliwowego często nieznacznie różni się od mocy silnika, co umożliwia ładowanie akumulatorów nawet podczas jazdy np. na autostradzie. Inaczej jest w autobusach miejskich, w których – ze względu na ich częste przyspieszanie i zwalnianie (rekuperacyjne) – ogniwa mogą mieć znacznie mniejszą moc w stosunku do mocy układu napędowego. Ogranicza to koszty inwestycyjne, w szczególności ogniwa paliwowych, których zakup jest bardzo kosztowny.

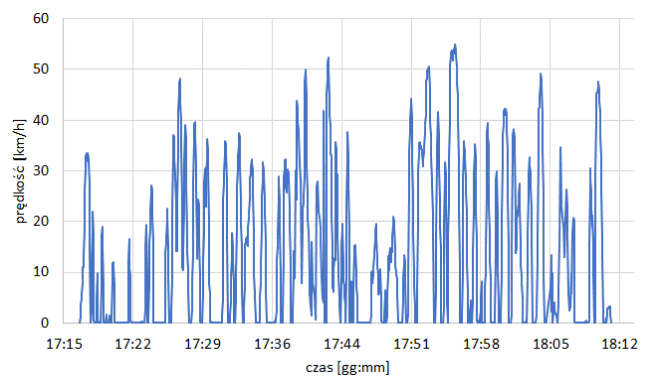
Na potrzeby tego artykułu jako przykład modelowania pracy ogniwa paliwowego wybrano system zasilania autobusu komunikacji miejskiej w Poznaniu. Dokładną trasę

jego przejazdu, o długości 4,72 km, przedstawiono na rys. 1. Podczas prowadzenia badań prędkość autobusu była rejestrowana w warunkach rzeczywistych, podobnie jak w [12]. Pokonał on wybraną trasę dwukrotnie – od zajezdni początkowej do końcowej i z powrotem (rys. 2).

W celu przeprowadzenia analizy stworzono autorską aplikację komputerową wraz z algorytmem opisującą pracę układu zasilania autobusu. W symulacji wyznaczano m.in. wartości prądów i napięć na ogniwie paliwowym oraz stan naładowania akumulatora. Program pozwala również na bieżąco monitorować sprawność ogniwa oraz wyznaczyć ilość zużywanego wodoru.



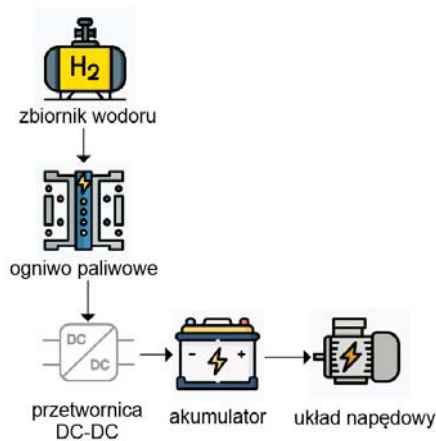
Rys. 1. Trasa autobusu, na której zrealizowano pomiary



Rys. 2. Zarejestrowana prędkość jazdy

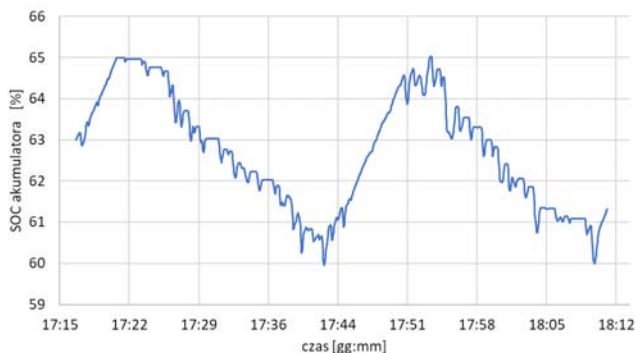
Parametrami wejściowymi są masa i prędkość pojazdu, długość przebytej trasy, pojemność akumulatora zamontowanego w autobusie oraz moc ogniwa. Wykorzystując informacje o zarejestrowanej prędkości jazdy i o czasie, w którym została przebyta trasa, wyznaczono moc mechaniczną, która jest potrzebna do poruszania się pojazdu. Uproszczony schemat działania programu został przedstawiony na schemacie blokowym (rys. 3).

W pojeździe jest zamontowany zbiornik wodoru, niezbędny do przeprowadzenia reakcji chemicznych w ogniwie i produkcji energii elektrycznej. Na podstawie informacji o mocy mechanicznej potrzebnej do pracy układu informacyjnego pojazdu oraz napięciu, wyznaczono wartości prądu, który jest pobierany z akumulatora. Równocześnie, w przypadku obniżenia się stanu naładowania poniżej pewnego poziomu, akumulator jest ładowany z ogniwa paliwowego poprzez przetwornicę DC-DC. Jest ona jednym z najważniejszych elementów w układzie, ponieważ dopasowuje napięcie ogniwa paliwowego do poziomu napięcia akumulatora, które znacząco różni się od siebie, co w konsekwencji umożliwia regulację prądu ładowania do optymalnego poziomu.

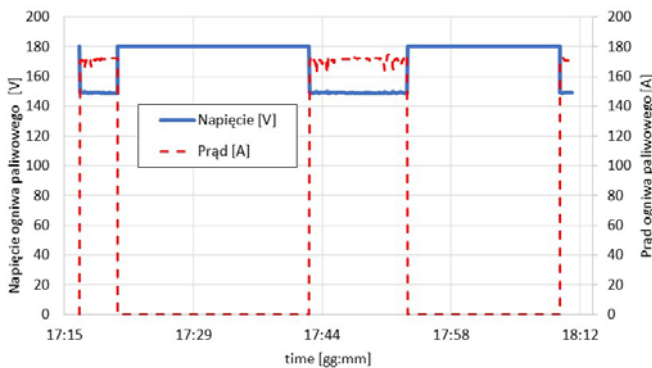


Rys. 3. Schemat blokowy układu zasilania symulowanego pojazdu

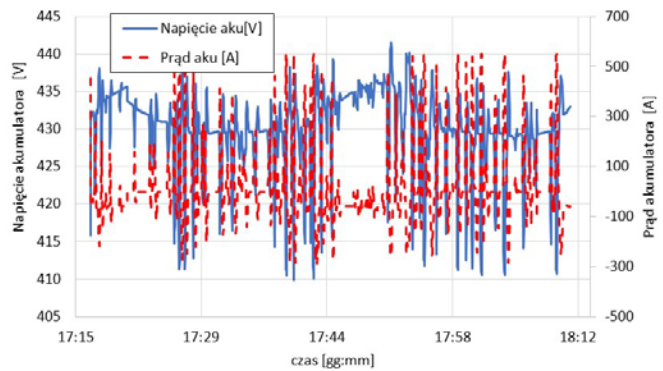
Założono, że masa pojazdu wynosi 10 t, pojemność akumulatorów około 20 kWh (440 V, 45 Ah), zużycie energii na systemy pokładowe (w tym klimatyzowanie kabiny) 5 kW. Przyjęto, że pojazd wyposażony jest w ogniwo paliwowe firmy Ballard o mocy 30 kW (napięcie pracy: 85 – 180 V, zakres prądu: 0 – 300 A, sprawność 55%) [13]. Ponadto w obliczeniach przyjęto, że akumulatory na początku były naładowane w 63%, a ogniwo paliwowe załączało się, ładując akumulatory prądem o natężeniu 60 A (po stronie ogniwa paliwowego – około 180 A), gdy poziom naładowania akumulatora spadał poniżej 60%, a wyłączało, gdy przekraczał 65% (wąski zakres SOC miał na celu zaprezentowanie zachowania się ogniw). Uzyskane wyniki stanu naładowania akumulatora, poziomów napięć i prądów ogniwa paliwowego oraz akumulatora, a także zużycia wodoru przedstawiono na rysunkach 4 – 6.



Rys. 4. Obliczony stan naładowania akumulatora w funkcji czasu jazdy



Rys. 5. Obliczona wartość napięcia i prądu ogniwa paliwowego w funkcji czasu jazdy



Rys. 6. Obliczona wartość napięcia i prądu akumulatora w funkcji czasu jazdy



Rys. 7. Przebieg zużycia paliwa podczas jazdy

Wnioski

Dynamiczny rozwój w technologii produkcji ogniw wraz z rosnącym doświadczeniem naukowców przyczynia się do powstawania nowych obszarów zastosowania tych źródeł. Kolejne etapy prac nad rozwojem ogniw umożliwią zmniejszenie ich wymiarów, redukcję masy i wzrost ich sprawności. Dzięki temu stają się obiektem zainteresowania producentów różnego rodzaju pojazdów. Również ze względu na znikomą emisyjność i praktycznie brak negatywnego wpływu na środowisko, coraz powszechniej wykorzystuje się ogniwa paliwowe w transporcie publicznym. Nie bez znaczenia jest fakt, że w krajach Unii Europejskiej pojawiają się programy wsparcia dla tego typu rozwiązań.

W związku z tym, tematyka poruszona w pracy jest ważnym i aktualnym zagadnieniem. Narzędzie przedstawione w pracy pozwala analizę parametrów ogniwa oraz akumulatora w pojeździe. Ze względu na uniwersalność programu, można przeprowadzać za jego pomocą analizy ogniw paliwowych o różnej mocy i technologii wykonania. Nieodłącznym elementem układu jest również akumulator, dlatego symulacja pozwala także na dokładne monitorowanie stanu jego naładowania (rys. 4) oraz wartości prądu i napięcia (rys. 6) Na podstawie symulacji obliczono, że do przebycia trasy potrzeba około 3 kWh energii oraz zużyto 0,17 kg wodoru. Za pomocą symulacji można dokonać analizy pracy ogniwa oraz optymalizować parametry jego pracy, w taki sposób, aby poprawić wydajność całego systemu zasilania.

Autorzy

dr hab. inż. Leszek Kasprzyk, prof. PP; Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: leszek.kasprzyk@put.poznan.pl;
mgr inż. Damian Burzyński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: damian.burzynski@put.poznan.pl;

mgr inż. Agnieszka Lewandowska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: agnieszka.lewandowska@put.poznan.pl;
 mgr inż. Robert Pietracho, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań; E-mail: robert.pietracho@put.poznan.pl;
 Dr.-Ing Christoph Wenge, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Sandtorstraße 22, 39106 Magdeburg, Germany, E-mail: christoph.wenge@iff.fraunhofer.de;
 dr inż. Jan Szymenderski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jan.szymenderski@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Sazali N., Wan Salleh W. N., Jamaludin A. S., Mhd Razali M. N., New perspectives on fuel cell technology: A brief review. *Membranes*, Vol. 10, No. 5, 99, 2020
- [2] Komarnicki P., Wenge C., Pietracho R., Elektromobilność – integracja pojazdów elektrycznych z infrastrukturą sieci elektroenergetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 96, No. 5, pp. 1–13, 2020
- [3] Knight B., Better mileage now. *Scientific American*, Vol. 302, No. 2, pp. 50-55, 2010
- [4] <https://bip.mos.gov.pl/strategie-plany-programy/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030-z-perspektywa-do-2040-r/> [dostęp:15.07.2021]
- [5] <http://gashd.eu/wodor-h2/> [dostęp:15.07.2021]
- [6] Kasprzyk L.; Nawrowski R., Tomczewski A. Optimization of Complex Lighting Systems in Interiors with the Use of Genetic Algorithm and Elements of Paralleling of the Computation Process, *International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, vol. 119, pp. 21-29, 2008
- [7] Larminie J., Dicks A., *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, 2003
- [8] Shamarova N., Komarnicki P., Wenge C.: Comparative study of state of charge estimation algorithms for Lithium-Ion Battery, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, pp. 1111(1): 012053, 2021
- [9] Burzyński D., Kasprzyk L., A novel method for the modelling of the state of health of lithium-ion cells using machine learning for practical applications, *Knowledge-Based Systems*, vol. 219, pp. 106900-1-106900-11, 2021
- [10] Małek A., Wendeker M.: *Ogniwa paliwowe typu PEM teoria i praktyka*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2010
- [11] Helm S., Hauer I., Wolter M., Wenge C., Balischewski S., Komarnicki P.: Impact of unbalanced electric vehicle charging on low-voltage grids, *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 2021
- [12] Pietracho R., Wenge C., Balischewski S., Lombardi P., Komarnicki P., Kasprzyk L., Burzyński D., Potential of Using Medium Electric Vehicle Fleet in a Commercial Enterprise Transport in Germany on the Basis of Real-World GPS Data. *Energies*, vol. 14, No. 17, 2021
- [13] https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocitymd.pdf?sfvrsn=ebc380_2 [dostęp:15.07.2021]