PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

OPEN ACCESS

Artur SZCZĘSNY[1], Ewa KORZENIEWSKA[2], Jakub STANIEWSKI[3], Sławomir BARAŃSKI[4], Łukasz NOWAK[5], Taras PANSKYI[6], Małgorzata SERWACH[7]

ORCID: [1]0000-0002-5186-1447, [2]0000-0002-0766-1376, [3]0000-0002-3120-4941, [4]0000-0002-6620-0465, [5]0000-0003-4096-8166, [6]0000-0002-0416-8711, [7]0000-0002-6931-074X

DOI: 10.15199/48.2025.11.29

Zintegrowane stanowisko dydaktyczne: model badania łańcucha konwersji zielonego wodoru w kontekście transformacji energetycznej

Integrated teaching station: a model for studying the green hydrogen conversion chain in the context of energy transformation

[1] dr inż. Artur Szczęsny, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, 90-537 Łódź, Stefanowskiego 18, Polska, e-mail: artur.szczesny@p.lodz.pl

[2] dr hab. inż. Ewa Korzeniewska, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, 90-537 Łódź, Stefanowskiego 18, Polska, e-mail: ewa.korzeniewska@p.lodz.pl

[3] mgr inż. Jakub Staniewski, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, 90-537 Łódź, Stefanowskiego 18, Polska, e-mail: jakub.staniewski@p.lodz.pl

[4] dr inż. Taras Panskyi, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, 90-537 Łódź, Stefanowskiego 18, Polska, e-mail: taras.panskyi@p.lodz.pl

[5] dr hab. inż. Sławomir Barański, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki I Automatyki, Instytut Elektroenergetyki, 90-537 Łódź, Stefanowskiego 18, Polska, e-mail: slawomir.baranski@p.lodz.pl

[6] dr inż. Łukasz Nowak, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki I Automatyki, Katedra Aparatów Elektrycznych, 90-537 Łódź, Stefanowskiego 18, Polska, e-mail: lukasz.nowak@p.lodz.pl

[7] dr hab. inż. Małgorzata Serwach, Uniwersytet Łódzki, Wydział Prawa i Administracji, Katedra Prawa Cywilnego, 90-232 Łódź, ul. Kopcińskiego 8/12, Polska, e-mail: mserwach@wpia.uni.lodz.pl

Adres do korespondencji: artur.szczesny@p.lodz.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości modyfikacji dwóch stanowisk dydaktycznych: inteligentnej sieci hybrydowej HYBR-08 oraz samochodu wodorowego OGPA-36 z hamownią. Celem jest integracja odnawialnych źródeł energii z procesem pozyskiwania i wykorzystania wodoru. Analizie poddano zastosowanie elektrolizera i ogniwa paliwowego w układzie sieci hybrydowej, a także budowę małej instalacji PV do zasilania stanowisk. Oceniono sprawność wytwarzania wodoru we współpracy z inteligentną siecią energetyczną oraz sprawność pracy samochodu na hamowni. Omówiono możliwe badania i znaczenie dydaktyczne.

Słowa kluczowe: wodór, smart grid, fotowoltaika, ogniwo paliwowe, hamownia, transformacja energetyczna

Abstract: The article presents the possibilities of modifying two educational laboratory stands: the HYBR-08 intelligent hybrid network and the OGPA-36 hydrogen-powered vehicle with a dynamometer. The aim is to integrate renewable energy sources with the process of hydrogen production and utilization. The study analyzes the use of an electrolyzer and a fuel cell within the hybrid network system, as well as the construction of a small PV installation for powering the stands. The efficiency of hydrogen generation in cooperation with the intelligent energy network and the performance efficiency of the vehicle on the dynamometer were evaluated. Possible experiments and educational significance are also discussed.

Keywords: hydrogen, smart grid, photovoltaics, fuel cell, dynamometer, energy transformation

Wstęp

Trendy dotyczące rozwoju nowoczesnych technologii wymagają od uczelni przygotowywania przestrzeni laboratoryjnej do rozwoju kompetencji inżynierskich [1-6]. W zakresie mechatroniki motoryzacyjnej przechodzą intensywne przemiany w wyniku globalnej zielonej transformacji. Jest to kluczowe, gdyż obecny przemysł motoryzacyjny zmierza w kierunku zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcia celu neutralności klimatycznej. Oznacza to bardzo szybkie

wprowadzanie zaawansowanych systemów napędowych z odnawialnymi źródłami energii (OZE), zwłaszcza systemów zasilanych wodorem i akumulatorami elektrycznymi. Ta rewolucja technologiczna, obejmująca od struktury i konstrukcji pojazdów po całą infrastrukturę energetyczną, stawia szczególne wyzwania dla edukacji, ponieważ wymaga natychmiastowego przemyślenia programów nauczania [7-9]. Aby sprostać tej zmianie, konieczne jest przygotowanie przyszłych inżynierów do zielonej transformacji. Obejmuje ona Europejski Zielony Ład (European Green Deal), który zawiera pakiet regulacji prawnych poświęconych neutralności klimatycznej planowanej do 2050 r. Unijne przepisy zobowiązują zatem kraje członkowskie do redukcji emisji gazów cieplarnianych na rzecz odnawialnych źródeł energii i transportu.

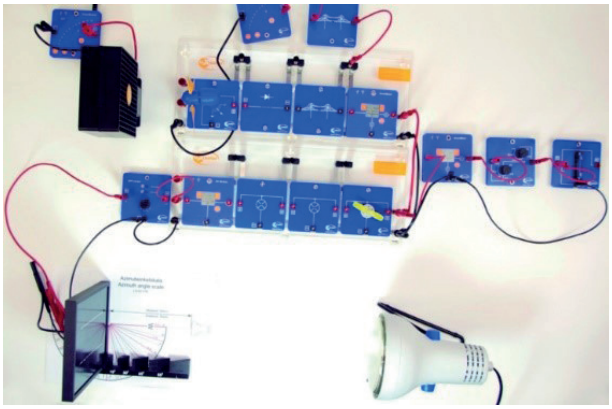
Edukacja w zakresie mechatroniki motoryzacyjnej nie może już być ograniczona do tradycyjnych silników spalinowych. Musi również aktywnie uwzględniać treści dotyczące nowych technologii, takich jak ogniwa paliwowe, systemy magazynowania wodoru, zarządzanie energią w pojazdach hybrydowych oraz integracja pojazdów z inteligentnymi sieciami. To właśnie teraz ujawnia się znaczenie zielonej transformacji dla edukacji technicznej. Nie jest to tylko zmiana tematyki, ale dostosowanie programów nauczania do rozwiązań proekologicznych. Aby sprostać tym wymaganiom, nowe stanowiska laboratoryjne do nauczania umożliwiają przyszłym inżynierom doświadczenie wyzwań związanych z energią wodorową i zarządzaniem przepływem energii. Aby w pełni zrozumieć złożoność procesów elektrochemicznych, termodynamicznych i mechatronicznych systemów zasilanych zieloną energią, wymagany jest bezpośredni kontakt z działającymi systemami. Badania prowadzone na tych stanowiskach symulują warunki eksploatacyjne, które będą wykorzystywane do szkolenia przyszłych specjalistów w diagnozowaniu, projektowaniu i serwisowaniu zaawansowanych systemów napędowych. Analiza koncentruje się na dwóch stanowiskach, gdzie integracja umożliwia bieżące badania w procesie pozyskiwania i wykorzystania zielonej energii. Pierwsze to HYBR-08 inteligentna sieć hybrydowa, która może symulować zarządzanie energią w mikrosieci i obejmuje magazynowanie energii w akumulatorach oraz odnawialne źródła. Studenci mogą badać optymalizację bilansu mocy, algorytmy kontroli przepływu energii i efektywność konwersji. Drugie stanowisko to OGPA-36 samochód elektryczny zasilany wodorem z dynamometrem. To stanowisko może analizować dynamicznie zachowanie systemu napędowego FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) w laboratorium, gdzie można ocenić jego parametry eksploatacyjne, takie jak wydajność, efektywność, zużycie paliwa wodorowego w kontrolowanym obciążeniu testowym. W zielonej motoryzacji ważne jest zrozumienie, jak czynniki eksploatacyjne wpływają na efektywność energetyczną pojazdu, do czego przyczynią się te badania. Hybrydowy projekt łączący inteligentną sieć (HYBR-08) i pojazd zasilany wodorem (OGPA-36), stanowi odrębne stanowisko badawczo-dydaktyczne. Pozwala na symulację całego cyklu życia energii: od generacji OZE, przez magazynowanie w wodorze, po ostateczne napędzanie pojazdu. Pomaga to studentom poznać cały łańcuch wartości dla zielonego wodoru (Power-to-Gas-to-Mobility) i jak można go zintegrować z inteligentnymi sieciami. To realizacja idei, w której pojazd elektryczny staje się aktywną częścią systemu energetycznego wspierającego stabilność sieci (V2G – Vehicle-to-Grid). Autorzy publikacji [10-12] nieustannie podkreślają znaczenie edukacji w transformacji energetycznej. Stanowiska takie jak HYBR-08 i OGPA-36 służą jako dobre przykłady, jak współczesna dydaktyka odpowiada na wyzwania zielonej transformacji. Wyższe i zawodowe kształcenie staje się strategicznym inwestorem w ekologicznym rozwoju gospodarczym, przygotowując specjalistów zdolnych do zarządzania zieloną energią i projektowania jej zastosowań w motoryzacji.

W przełomie technologicznym znaczenie ma także zrozumienie kwestii prawnych i regulacyjnych w kontekście działań edukacyjnych. Ramy prawne związane z zieloną transformacją, takie jak pakiet „Fit for 55" UE oraz cele neutralności klimatycznej, mają bezpośredni wpływ na sektory motoryzacyjne i energetyczne. Przyszli inżynierowie muszą zdawać sobie sprawę, że rozwój pojazdów wodorowych i ich integracja z inteligentnymi sieciami energetycznymi prawdopodobnie będą wiązać się z rygorystycznymi regulacjami dotyczącymi bezpieczeństwa (np. transportu i magazynowania wodoru), homologacji, norm emisji oraz kwestii infrastrukturalnych. Wreszcie, aspekty prawne dotyczące praw własności intelektualnej w odniesieniu do zielonych innowacji są ważne dla komercjalizacji ich wyników. Integracja takiej wiedzy w ramach procesu edukacyjnego umożliwi przyszłym inżynierom lepsze zrozumienie systemów prawnych. W szczególności, w zakresie przepisów odnoszących się do odpowiedzialności prawnej przyszłych inżynierów za prawidłowość wprowadzanych rozwiązań.

Stanowisko HYBR-08 – modyfikacje i rola elementów wodorowych

Stacja HYBR-08 to nowoczesne stanowisko laboratoryjne umożliwiające badania nad współpracą odnawialnych źródeł energii (paneli fotowoltaicz-

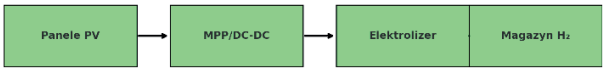
nych), klasycznych odbiorników oraz nowoczesnych systemów magazynowania energii. Kluczową cechą jej funkcjonalności jest możliwość symulacji działania Hybrydowej Sieci Inteligentnej, co jest istotnym aspektem transformacji energetycznej w kierunku zielonej energii. Schemat ten umożliwia kompleksową ocenę procesu konwersji energii PV na energię elektryczną, magazynowania energii elektrycznej oraz ponownej konwersji zgodnie z zapotrzebowaniem. System obejmuje zbiornik wodoru i ogniwo paliwowe, aby lepiej zrozumieć technologię wodorową. W ten sposób użytkownicy stanowiska mogą badać cały proces cyklu Power-to-Gas-to-Power, w którym nadmiar energii z OZE jest wykorzystywany w elektrolizerze do produkcji wodoru do magazynowania, a następnie efektywnie przekształcany z powrotem w energię elektryczną w ogniwie paliwowym. Jest to ważne przy ocenie potencjału wodoru jako długoterminowego i bezemisyjnego nośnika energii [13-15].



Rys. 1. Widok stanowiska HYBR-08 [10]

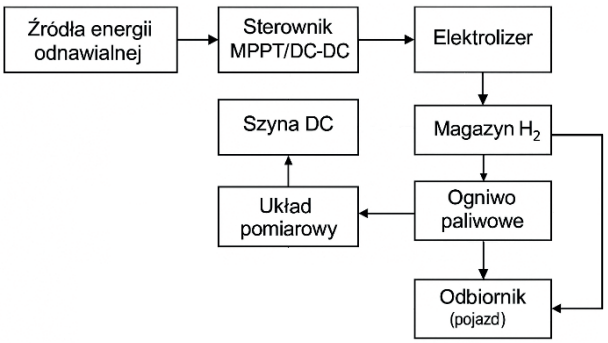
Nowoczesny system pomiarowy zarządza stacją; kontroluje napięcia, prądy, moce i ładunki przepływające przez wszystkie komponenty w sieci, a także pozwala na badanie dynamiki procesu ładowania i rozładowywania (rysunek 1). Algorytmy zarządzania energią (EMS – Energy Management System) mogą być również testowane przez system, co jest ważną metodą poprawy bilansu energetycznego między OZE, magazynowaniem a odbiornikami, a ostatecznie edukacji inżynierów w podejściu integracji pojazdów elektrycznych ze zrównoważoną energią.

Ogniwo paliwowe dołączone po stronie DC pełni funkcję źródła regulowanego. Zastosowanie układów pomiarowych dla napięcia, prądu i mocy na każdym etapie pozwala określić lokalne sprawności i straty. Konfiguracja może pracować w trybie wyspowym lub w trybie zasilania odbiorników laboratoryjnych. Modyfikacja polegająca na dołączeniu zewnętrznej sieci źródeł odnawialnych oraz wykorzystaniu elektrolizera jako elementu sieci hybrydowej zwiększa funkcjonalność stanowiska, umożliwiając symulację pracy mikrosieci z wodorowym magazynem energii rysunek 2.



Rys. 2. Instalacja PV – łańcuch zasilania do elektrolizera i magazynu H_2

Instalacja PV (2–4 moduły łączone szeregowo) współpracuje z układem MPPT/DC–DC tak, aby zapewnić odpowiednie napięcie i prąd na zaciskach elektrolizera. W okresach słabszego nasłonecznienia proces może być buforowany energią z magazynu rysunek 3. Dzięki temu student obserwuje w jednym układzie zarówno produkcję H_2, jak i jego wykorzystanie w pojeździe. Włączenie elektrolizera umożliwia zamianę nadwyżek energii na wodór, który następnie może być zmagazynowany i wykorzystany w ogniwie paliwowym lub do napędu pojazdu hybrydowego. Taki przepływ pozwala przeprowadzić ćwiczenia z bilansowania mocy oraz gospodarowania energią w mikrosieci. co zwiększa liczbę możliwych scenariuszy zajęć.

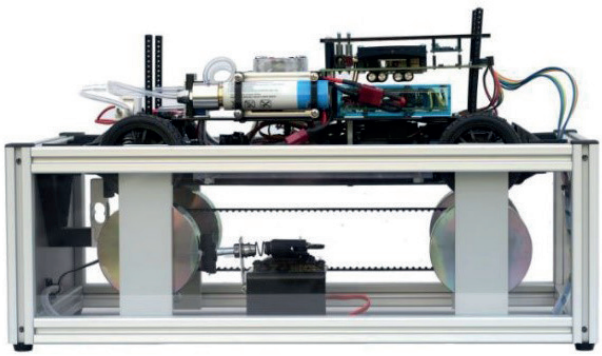


Rys. 3 Schemat blokowy Stanowiska HYBR-08 z ogniwem paliwowym

Stanowisko OGPA-36 – samochód wodorowy z hamownią

Samochód OGPA-36 wyposażony jest w zbiornik Hydrostik, ogniwo paliwowe PEM oraz napęd elektryczny. Integralnym elementem stanowiska jest hamownia z systemem akwizycji (LabVIEW/Arduino), umożliwiająca rejestrację charakterystyk prędkości, mocy i energii. Stanowisko pozwala analizować zachowanie pojazdu w różnych warunkach obciążenia (rysunek 4).

Dzięki zastosowaniu modyfikacji stanowiska HYBR-08, magazyny wodoru wykorzystywane do zasilania pojazdu pozwalają zamknąć obieg energii – od słońca do kół pojazdu we współpracy z modelem inteligentnej sieci energetycznej (rysunek 5).



Rys. 4. Samochód OGPA-36 na hamowni [10]

Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska zintegrowanego

Takie rozwiązanie zwiększa atrakcyjność dydaktyczną oraz umożliwia badania efektywności pracy układu. W zintegrowanym stanowisku, energia pozyskiwana ze źródeł odnawialnych, konwertowana jest do napędu kołowego, którego parametry bada hamownia. Połączenie hybrydowego zasilania do pojazdu przedstawia rysunek 6.

Model energo-mechaniczny i sprawność

Całkowitą sprawność łańcucha definiujemy jako iloczyn sprawności etapów:

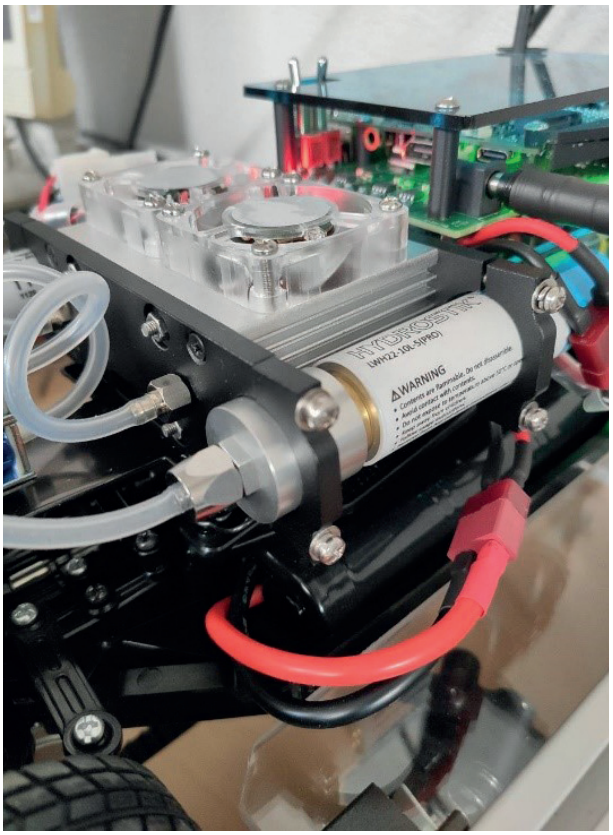
$$\eta = \eta_{PV} \times \eta_{EL} \times \eta_{MAG} \times \eta_{FC} \times \eta_{DR}$$

gdzie:
η_{PV} – sprawność paneli fotowoltaicznych,
η_{EL} – sprawność elektrolizera,
η_{MAG} – sprawność magazynu H_2,
η_{FC} – sprawność ogniwa paliwowego,
η_{DR} – sprawność napędu,

Tab. 1. Wartości sprawności poszczególnych elementów systemu

Etap	Sprawność [%]
PV	18
Elektrolizer	65
Magazyn H_2	90
Ogniwo paliwowe	50
Napęd	48–50
Całkowita	≈ 2,8 – 8,1

Na podstawie danych zestawu (OGPA-36 i HYBR-08) przyjęto: $\eta_{DR} \approx 0{,}48–0{,}50$ (silnik+przekładnia); $\eta_{FC} \approx 0{,}5$ (laboratoryjne PEM); $\eta_{EL} \approx 0{,}6–0{,}7$; $\eta_{MAG} \approx 0{,}9$; $\eta_{PV} \approx 0{,}18$.



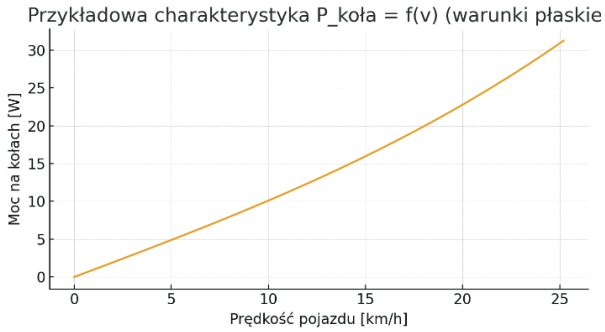
Rys. 6 Połączenie zasilania pojazdu hybrydowego (akumulator i ogniwa wodorowego zasilane ze zbiorników wodoru)

Wartości PV/EL/FC/MAG odpowiadają typowym parametrom zestawów edukacyjnych; η_{DR} wynika z dokumentacji OGPA-36 (sprawność silnika i przekładni ~0,48–0,50).

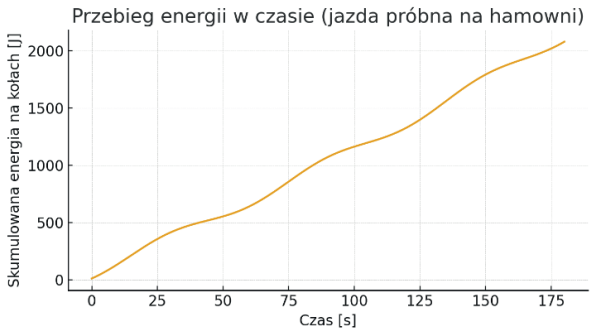
Wyniki badań pojazdu hybrydowego na hamowni

Na rys. 7 pokazano orientacyjną zależność mocy na kołach od prędkości na torze płaskim. Rys. 8 przedstawia skumulowaną energię w funkcji czasu podczas testu dla różnych warunków jazdy. W badaniach studenckich możliwe jest porównanie profilu jazdy, wpływu masy i obciążenia, a także sprawdzenie skutków zmiany strategii sterowania.

Analiza wskazuje, że największe straty energii występują w procesie elektrolizy i w konwersji w ogniwie paliwowym. Dodatkowo należy uwzględnić straty mechaniczne w napędzie, wynikające z tarcia i sprawności przekładni. Łączna sprawność całego toru jest niska, ale stanowi realistyczne odzwierciedlenie zjawisk zachodzących w systemach wodorowych [16-18]. Interpretacja wyników wskazuje na dynamiczne zmiany obciążenia i wpływ strategii sterowania na efektywność. Dane pomiarowe pozwalają porównać warunki jazdy po płaskiej nawierzchni i pod górę, co jest kluczowe w ocenie sprawności napędu.



Rys. 7. Przebieg mocy na kołach w funkcji prędkości pojazdu



Rys. 8. Skumulowana wartość energii w czasie symulacji jazdy na hamowni

Podsumowanie

Artykuł koncentruje się na analizie zintegrowanych stacji laboratoryjnych HYBR-08 (inteligentna sieć hybrydowa) i OGPA-36 (samochód elektryczny zasilany wodorem z dynamometrem), co potwierdza ich fundamentalne znaczenie w dziedzinie transformacji energetycznej i technologii w nowoczesnej edukacji mechatronicznej. Podstawą tego założenia była potencjalna kombinacja obu systemów do przeprowadzenia szeroko zakrojonych badań nad mechanizmem pozyskiwania i wykorzystywania zielonej energii, umożliwiając pełną realizację całego łańcucha konwersji energii wodorowej. Kluczowe informacje na temat wydajności systemu uzyskano z przeprowadzonych testów i danych laboratoryjnych. Wyniki potwierdzają zgodność z wartościami uzyskanymi w literaturze, co dowodzi niezawodności i odpowiedniego skalowania modeli edukacyjnych. Całkowita wydajność systemu uzyskana w analizie energetycznej została oszacowana na 2,8 – 8,1%. Choć ta liczba jest stosunkowo niska w porównaniu z bezpośrednim wykorzystaniem energii elektrycznej, należy ją interpretować w szerszym kontekście konwersji energii elektrycznej na chemiczną (wodór) i z powrotem na elektryczną (ogniwo paliwowe). Wyniki te wskazują obszary wymagające dalszych badań i rozwoju. Analiza strat systemu ujawnia, że większość strat występuje wewnątrz elektrolizera i ogniwa paliwowego. Ten wynik jest zgodny z aktualnym stanem wiedzy i identyfikuje największe rezerwy wydajności dotyczące procesów elektrolizy i ogniwa paliwowego. Ważne jest również, aby przyszli inżynierowie byli świadomi tego faktu, ponieważ skieruje to ich wysiłki badawcze w najbardziej obiecujące nowe obszary, a tym samym przyczyni się do postępu zielonej transformacji. Ponadto stacja OGPA-36 napędzana dynamometrem umożliwiła szczegółowe obserwacje dynamiki pojazdu. Testy na dynamometrze ujawniają, że wydajność zależy od warunków obciążenia, co jest ważną informacją dla optymalizacji strategii zarządzania energią w rzeczywistych pojazdach wodorowych. Tego rodzaju symulacja była kluczowa dla projektowania energooszczędnych systemów sterowania napędem FCEV. Zintegrowany system umożliwia porównanie z innymi technologiami magazynowania energii, takimi jak akumulatory litowo-jonowe, a także pozwala na identyfikację zalet i ograniczeń nośnika energii wodorowej w szerszym kontekście transformacji energetycznej. Może mieć niższe wydajności konwersji, ale wodór zapewnia kilka zalet związanych z wysoką gęstością energii, przydatnych dla ciężkiego transportu i długich dystansów oraz do długoterminowego magazynowania nadmiaru energii z odnawialnych źródeł. Jest to przydatny system do nauczania i badań. Stacja ma również znaczenie pedagogiczne, gdzie przyszli inżynierowie mogą stosować swoje obserwacje w praktycznych, świadomych środowiskowo, rzeczywistych warunkach, poprzez rzeczywiste problemy, takie jak integracja systemów, optymalizacja wydajności i minimalizacja strat w wymagającym łańcuchu energetycznym. Przygotowanie inżynierów do posiadania tych praktycznych, interdyscyplinarnych technik, łączących mechatronikę i energię, jest kluczowe dla pomyślnego wdrożenia zielonej transformacji i osiągnięcia celów neutralności klimatycznej.

Przyjęto: 28.10.2025, **zaakceptowano:** 07.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Jagusiak, M., Dróżdż T., Nawara, P., Kiełbasa P., Lis S., Wrona P., Nęcka, K., Oziembłowski, M., Kompatybilność elektromagnetyczna w pomiarach energii elektrycznej, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, 92 (12), 139-144, doi:10.15199/48.2016.01.34
[2] Tomasik, M, Lis S., Nęcka, K., Oziembłowski, M., Kiełbasa P., Dróżdż T., Nawara P., Ostafin, M., Sterowanie piecem indukcyjnym do laboratoryjnego spalania biomasy, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, 92 (1), 173–176
[3] Pawłowski, S.; Mączka, M. Optimisation of QCL Structures Modelling by Polynomial Approximation. Materials 2022, 15, 5715. https://doi.org/10.3390/ma15165715
[4] Sikora, R., Markiewicz, P., Mączka, M., Pawłowski S.,Plewako, J., Wykorzystanie metody interpolacji do szacowania napięcia skokowego i dotykowego w układzie uziemiającym, Przegląd Elektrotechniczny, 2023, 99 (2), 263–266, DOI: 10.15199/48.2023.02.53
[5] T Szabała et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1782 012037DOI 10.1088/1742-6596/1782/1/012037
[6] Kłosowski, G.; Hoła, A.; Rymarczyk, T.; Mazurek, M.; Niderla, K.; Rzemieniak, M. Using Machine Learning in Electrical Tomography for Building Energy Efficiency through Moisture Detection. Energies 2023, 16, 1818. https://doi.org/10.3390/en16041818
[7] Poschauko, V., Kreuzer, E., Hirz, M., & Pacher, C. (2023). Engineering Education goes Lifelong Learning: Modularized Technical Vocational Education and Training Program for the Automotive Sector, 1799–1808. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.002.
[8] Curiel-Ramirez, L., Bautista-Montesano, R., Galluzzi, R., Izquierdo-Reyes, J., Ramírez-Mendoza, R., & Bustamante-Bello, R. (2022). Smart Automotive E-Mobility – A Proposal for a New Curricula for Engineering Education. Education Sciences. https://doi.org/10.3390/educsci12050316.
[9] Boretti, A. (2023). The perspective of hybrid electric hydrogen propulsion systems. International Journal of Hydrogen Energy. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.051.
[10] OGPA-36: Samochód elektryczny na wodór z hamownią – instrukcja obsługi, MGS Nauka, 2017.
[11] HYBR-08: Inteligentna sieć hybrydowa – zestaw profesjonalny, MGS Nauka, 2017.
[12] Turner J.A., Sustainable Hydrogen Production, Science, 2004.
[13] Lubello, P., Pasqui, M., Mati, A., & Carcasci, C. (2022). Assessment of hydrogen based long term electrical energy storage in residential energy systems. Smart Energy. https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100088.
[14] Abdelsalam, R., Mohamed, M., Farag, H., & El-Saadany, E. (2024). Green hydrogen production plants: A techno-economic review. Energy Conversion and Management. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118907.
[15] Capurso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M., & Camporeale, S. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. Energy Conversion and Management. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898.
[16] Dincer I., Acar C., Review and evaluation of hydrogen production methods, Int. J. Hydrogen Energy, 2015.
[17] Momirlan M., Veziroglu T.N., Properties of hydrogen as fuel, Int. J. Hydrogen Energy, 2005.
[18] IEC 62282 – Fuel cell technologies, IEC.