

Analiza przepływu energii w pojeździe szynowym zasilanym wodorowym ogniwem paliwowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję zastosowania wodorowego ogniwa paliwowego jako podstawowego źródła energii dla szynowego pojazdu pomocniczego. Zaprezentowano propozycję zabudowy dodatkowych urządzeń systemu zasilania wodorowego w wybranym pojeździe. Określono wymagania związane ze specyfiką pracy tego pojazdu oraz rozważono możliwy przepływ energii elektrycznej pomiędzy poszczególnymi komponentami. Proponowane rozwiązanie może być przeznaczone przede wszystkim do pojazdów szynowych, które prowadzą prace robocze i manewrowe w miejscach zamkniętych, gdzie emisja toksycznych związków w spalinach powoduje zwiększone zagrożenie dla zdrowia ludzi.

Abstract. The article presents the concept of using a hydrogen fuel cell as the primary energy source for a rail auxiliary vehicle. A proposal for the installation of additional hydrogen power system equipment in the selected vehicle is presented. The requirements related to the specifics of the operation of this vehicle have been determined, and the possible flow of electrical energy between the various components has been considered. The proposed solution can be designed primarily for rail vehicles that carry out work and maneuvering in confined areas, where the emission of toxic compounds in the exhaust gas causes an increased risk to human health. (**Analysis of energy flow in a rail vehicle powered by a hydrogen fuel cell**)

Słowa kluczowe: pojazd szynowy, ogniwo wodorowe, zasobnik trakcyjny, modernizacja.

Keywords: rail vehicle, fuel cell, traction battery, modernization.

Wstęp

Tendencje promowania idei ochrony środowiska i ograniczenia emisji zanieczyszczeń coraz szerzej docierają do gałęzi przemysłu związanych z transportem kolejowym. Transport szynowy prowadzony na zelektryfikowanych trasach stał się wzorem, dokąd powinna prowadzić ścieżka transportu osób i towarów [1, 2]. Wciąż otwartą kwestią pod względem ochrony środowiska pozostaje użytkowanie pojazdów szynowych na nieelektryfikowanych trasach oraz bocznicach kolejowych. Dotychczas powszechnie stosowany napęd w pojazdach szynowych, z wykorzystaniem silnika spalinowego jako źródła energii stanowi wiodące rozwiązanie. Dostępność paliwa, zasięg i autonomia, długie okresy międzyprzegładowe, prostota konstrukcji oraz szeroko dostępna wiedza umożliwiająca dokonywanie, zarówno doraźnych, jak i okresowych napraw to atrybuty, z którymi trudno konkurować. Jedną z alternatyw dla pojazdu z silnikiem spalinowym stanowi pojazd zasilany bateryjnym zasobnikiem energii [3, 4]. Niestety taki rodzaj napędu posiada ograniczenia związane ze zmniejszoną autonomią, które mocno zawężają możliwości zastosowania - w zależności od typu pojazdu i rodzaju pracy. Nieoptymalnym rozwiązaniem jest stosowanie zasobników bateryjnych jako jedyne źródła energii w pojazdach trakcyjnych, wykorzystywanych do prowadzenia ciężkich pociągów, ze względu na ilość energii potrzebnej do pokonania oporów ruchu i związanej z tym wymaganej ilości energii w zasobniku bateryjnym [5]. Natomiast bardzo często wykorzystywane są rozwiązania bateryjnych pojazdów przetokowych, służących do lekkich prac manewrowych, prowadzonych przy małych prędkościach i na ograniczonym obszarze, spotykane często na bocznicach kolejowych zakładów przemysłowych [6]. Zasobniki energii stosowane są również w lekkich pojazdach pasażerskich do ruchu regionalnego, gdzie możliwe jest oszacowanie zużycia energii i zaplanowanie przerw eksploatacyjnych, a ze względu na stosunkowo niewielką masę pojazdu zasobnik nie ograniczy możliwości trakcyjnych i przewozowych [7]. W praktyce takie rozwiązania stosowano powszechnie już na początku XX wieku, czego przykład stanowi eksploatowana

przez wiele lat seria zespołów akumulatorowych AT3 „Wittfeld” [8].

Pozostałą lukę wypełnia rozwiązanie bazujące na wodorze, które jest powszechnie uważane za obiecujące dla rozwoju energetyki. Wykorzystanie wodoru do generowania energii elektrycznej w pojazdach szynowych, ze względu na brak emisji szkodliwych substancji dla środowiska, staje się strategicznym kierunkiem rozwoju o znacznych perspektywach zastosowania [5, 9, 10]. Następuje też sukcesywny rozwój sieci dystrybucji wodoru oraz stopniowe upowszechnianie się pojazdów drogowych (szczególnie autobusów komunikacji miejskiej), napędzanych wodorem jako paliwem [11].

Czołowi producenci taboru kolejowego zaczęli wprowadzać na rynek pojazdy zasilane wodorem [10]. Dominują tu przede wszystkim pojazdy pasażerskie np. Coradia iLint [12]. Prowadzone są w Polsce również prace nad modernizacjami lokomotyw manewrowych, np. SM42 – 6Dn produkcji PESA Bydgoszcz S.A. [13].

W dalszym ciągu jednak brakuje takich rozwiązań dla pojazdów mniejszej mocy, dla których autonomia jest kluczowym parametrem eksploatacyjnym.

W niniejszym artykule przedstawiono propozycję przystosowania szynowego pojazdu pomocniczego do zabudowy bezemisyjnego układu napędowego, ze szczególnym naciskiem na analizę trybów pracy wymaganych przez specyfikę użytkowania takich pojazdów. Omówiono zasady doboru elementów obwodu głównego dla określonego typu pojazdu. Na podstawie uzyskanych danych określono wstępne wytyczne dla systemu sterowania (TCMS – Train Control and Monitoring System) takim pojazdem, dla poszczególnych stanów pracy. Stanowić one będą wstęp dla dalszej praktycznej implementacji kompletnego TCMS.

Demonstrator

Jako platformę do przyszłej zabudowy napędu wodorowego wybrano pojazd pomocniczy WM-15A. Pojazd produkowano do 1996 roku, powstało łącznie 555 sztuk, z czego większość wciąż jest eksploatowana przez PKP PLK S.A., PGE Energetyka Kolejowa S.A., ich spółki zależne oraz mniejsze zakłady taboru.

Wózek motorowy wyposażony jest w silnik spalinowy SW680/123 o mocy 147 kW, pozwala to osiągnąć prędkość konstrukcyjną 80 km/h [14]. Widok wózka motorowego przedstawiono na rysunku nr 1. Podstawowe dane techniczne zawarto w tabeli 1.



Rys.1. Wózek motorowy WM-15A

Tabela 1. Wybrane dane techniczne WN-15A

1.	Silnik	SW680/123
2.	Moc silnika	147 kW (200 KM)
3.	Prędkość maksymalna	80 km/h
4.	Zbiornik paliwa	2x 150 l
5.	Masa własna	20 t
6.	Nośność	15 t
7.	Długość	12450 mm
8.	Szerokość	2800 mm
9.	Wysokość	3360 mm

Rozmieszczenie oryginalnych elementów układu napędowego w przedziale silnikowym, umieszczonym pomiędzy kabiną a skrzynią ładunkową oraz przestrzeń na podwoziu maszyny (pod ostoją), umożliwiają zabudowę elementów wodorowego układu zasilania bez znacznej ingerencji w konstrukcję pojazdu. Widok boczny wózka motorowego przedstawiono na rysunku nr 2.



Rys.2. WM-15A – widok na przedział silnikowy i skrzynię ładunkową

Założeniem podstawowym przy modernizacji pojazdu jest osiągnięcie co najmniej takich samych parametrów trakcyjnych, w porównaniu do fabrycznego zespołu napędowego, dotyczących siły trakcyjnej i zasięgu.

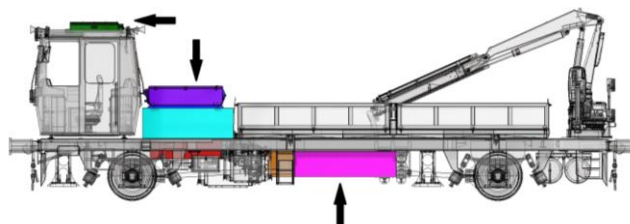
W pierwszym etapie modyfikacja polega na usunięciu silnika spalinowego oraz zbiorników paliwa. Następnie elektryczny silnik trakcyjny, o mocy zbliżonej do fabrycznego silnika Diesla zestawiony zostanie z oryginalną skrzynią biegów. Wówczas moment obrotowy w dalszym ciągu przekazywany będzie na osie poprzez przekładnię pośrednią i przekładnię osiowe. Silnik elektryczny zasilony zostanie z falownika trakcyjnego, podłączonego

bezpośrednio do głównej szyny zasilania DC. Zastosowanie wspólnej szyny zasilania DC dla źródła energii oraz odbiorników umożliwia wariantową budowę pojazdu [7]. Zasilanie głównej szyny DC zapewni wodorowe ogniwo paliwowe, poprzez przetwornicę DC/DC, oraz baterijny zasobnik trakcyjny. W proponowanym rozwiązaniu istnieje możliwość ładowania baterijnego zasobnika trakcyjnego z zasilania warsztatowego.

W wózku motorowym WM-15A zabudowane są instalacje i urządzenia hydrauliczne oraz pneumatyczne. Źródłem sprężonego powietrza w niemodernizowanym pojeździe jest sprężarka wchodząca w skład wyposażenia silnika wysokoprężnego [14]. Napęd dla pompy hydraulicznej zapewnia przystawka z przekładnią pasową, zestawioną z wałem silnika spalinowego. Aby zachować funkcjonalność pojazdu roboczego podczas modernizacji konieczne jest zabudowanie elektrycznej pompy hydraulicznej oraz sprężarki dla obwodów pneumatycznych. Zasilanie 3x400V dla tych urządzeń zapewni przetwornica pomocnicza, będąca częścią kontenera trakcyjnego. W kontenerze trakcyjnym zabudowany jest również zasilacz buforowy 24V dla obwodów sterujących oraz pełniący funkcję ładowania akumulatora 24V. System chłodzenia ogniwa wodorowego umożliwi wykorzystanie ciepła z aktywnego ogniwa wodorowego dla ogrzewania kabiny. Zastąpi to dotychczasowe ogrzewanie kabiny z obiegu wodnego silnika wysokoprężnego.

Obwód główny

W miejscu komory silnika, zbiorników paliwa i pod ostoją pojazdu zabudowane zostaną elementy napędu wodorowego. (Rys. 3).

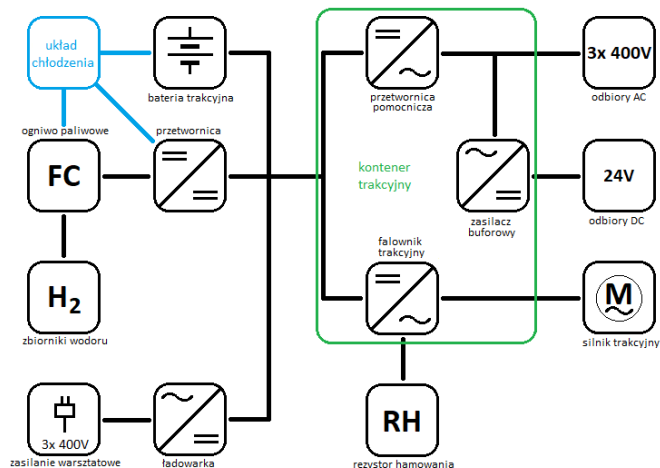


Rys.3. WM-15A zabudowa elementów napędu wodorowego

Do głównej szyny zasilania DC podłączone zostaną: kontener trakcyjny, bateria trakcyjna, przetwornica ogniwa paliwowego oraz ładowarka warsztatowa. Kontener trakcyjny składa się z trzech modułów: falownika trakcyjnego, przetwornicy pomocniczej oraz zasilacza buforowego. Falownik trakcyjny zasila silnik trakcyjny oraz umożliwia odzysk energii podczas hamowania do baterii trakcyjnej lub do rezystora hamowania. Przetwornica pomocnicza oraz zasilacz buforowy zapewniają zasilanie 3x 400V AC oraz 24V DC. Schemat ideowy obwodu głównego przedstawiono na rysunku 4.

Zgodnie z założeniem nie pogorszenia parametrów trakcyjnych wytypowany został elektryczny silnik trakcyjny o mocy 150 kW, jednocześnie falownik trakcyjny zapewnia moc czynną na takim samym poziomie. Pełna moc silnika trakcyjnego będzie wykorzystywana jedynie podczas rozruchu (przyspieszania) pojazdu, dlatego też przewidziane do zastosowania jest wodorowe ogniwo paliwowe o mocy wyjściowej 100 kW. Aby zapewnić chwilowe uzyskanie pełnej mocy oraz pokryć zapotrzebowanie na energię przy stanach przejściowych oraz wyłączeniu ogniwa paliwowego przyjęta została użyteczna pojemność baterii trakcyjnej na poziomie 100 kWh, przy zachowaniu zdolności do oddawania mocy na poziomie nie niższym niż 2C, tj. 200 kW. Przewidziano zastosowanie przetwornicy pomocniczej o mocy czynnej

wyjściowej 30 kW dla obiorów prądu przemiennego 3x 400 V, np. klimatyzacji, sprężarki powietrza oraz elektronarzędzi (przy pracy roboczej pojazdu), oraz mocy wyjściowej 10 kW dla odbiorów prądu stałego. Dodatkowo zastosowana zostanie ładowarka baterii trakcyjnej, regulowana w zależności od dostępnej mocy przyłącza 3x 400V, tj. 11/22/43 kW. Parametry elementów obwodu głównego zawarto w tabeli 2.



Rys.4. Schemat ideowy obwodu głównego

W projekcie zakładana jest możliwość skalowania pojemności zbiorników wodoru w zależności od wymaganej autonomii pojazdu.

Tabela 2. Parametry elementów obwodu głównego

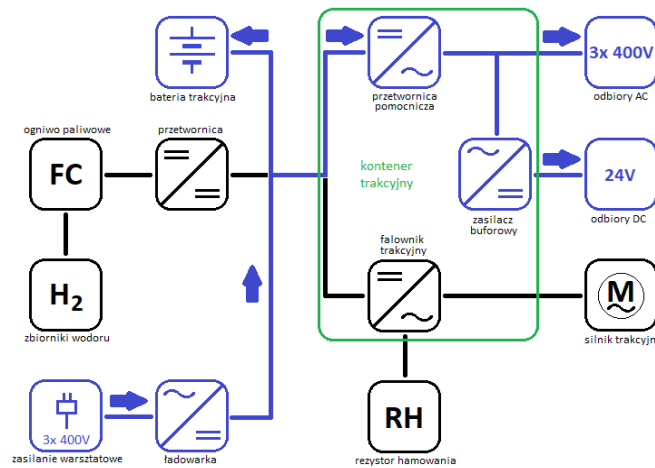
nr	Opis	Moc / Pojemność
1.	Silnik trakcyjny	150 kW
2.	Ogniwo wodorowe	100 kW
3.	Bateria trakcyjna	100 kWh
4.	Falownik trakcyjny	150 kW
5.	Przetwornica AC	30 kW
6.	Przetwornica DC	10 kW
7.	Ładowarka	11/22/34 kW

Stany pracy

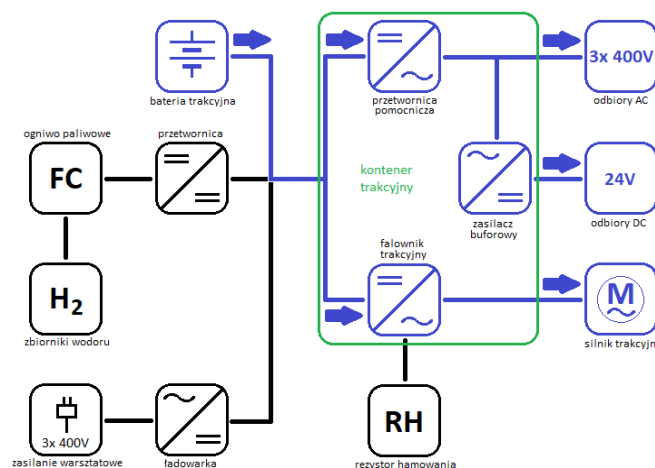
W toku analiz wytypowano najczęściej występujące stany pracy pojazdu oraz stany pracy ogniwa wodorowego. W artykule wyszczególnione zostały podstawowe stany pracy pojazdu: ładowanie zewnętrzne, praca baterijna, praca z wykorzystaniem ogniwa wodorowego. W każdym z wymienionych wyżej trybów pracy należy również rozpatrzyć szczegóły przepływu energii pomiędzy komponentami, które zostaną przedstawione w dalszej części rozdziału.

Pierwszy stan pracy to postój pojazdu z ładowaniem baterii trakcyjnej za pośrednictwem ładowarki warsztatowej. Pozwala to uzupełnić energię w baterii trakcyjnej i przygotować pojazd do dłuższej pracy bez zużycia wodoru. W tym stanie możliwe jest załączenie obwodów pomocniczych. Uruchomione zostają przetwornica pomocnicza oraz zasilač buforowy. Umożliwia to uruchomienie sprężarki w obwodzie pneumatycznym, pompy hydraulicznej, załączenie ogrzewania oraz oświetlenia. Należy zwrócić uwagę na ograniczoną moc przyłącza warsztatowego i konieczność zastosowania zaawansowanego zarządzania energią – nie wszystkie odbiory będą mogły pracować jednocześnie lub z pełną mocą. W dalszym ciągu nie jest wykorzystywana energia z baterii trakcyjnej. Zasobnik przygotowywany jest do zapewnienia jak najdłuższej pracy bez załączenia ogniwa paliwowego. Stan pracy przedstawiony został na schemacie blokowym obwodu głównego na rysunku nr 5.

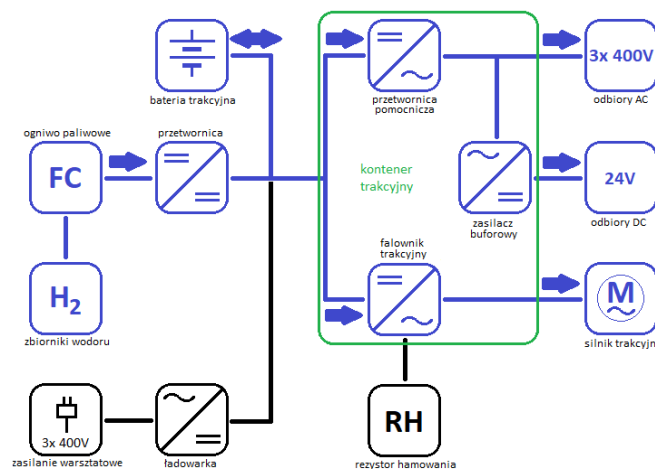
Kolejny stan to praca pojazdu z użyciem wyłącznie baterii trakcyjnej. Po odłączeniu ładowarki warsztatowej zasilanie szyny DC zapewnione jest z baterii trakcyjnej. TCMS otrzymuje informację o braku ładowania zewnętrznego, umożliwia pełną pracę urządzeń pomocniczych. Możliwe jest załączenie falownika trakcyjnego i rozpoczęcie jazdy. Stan pracy przedstawiony został na rysunku nr 6.



Rys.5. Postój, ładowanie, pojazd załączony



Rys.6. Praca z wykorzystaniem baterii trakcyjnej



Rys.7. Praca z wykorzystaniem ogniwa wodorowego

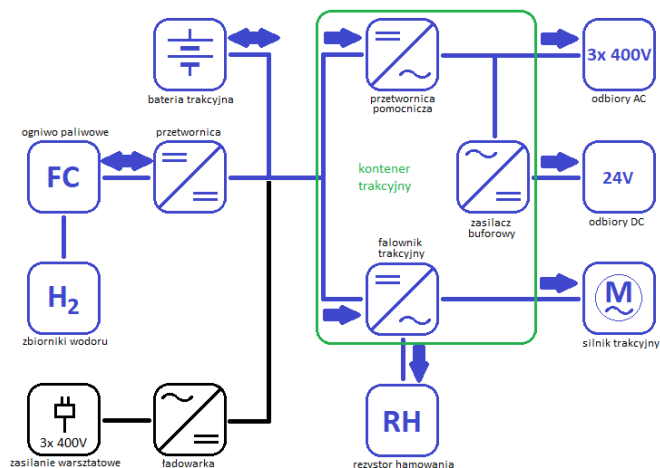
Trzeci stan - praca z wykorzystaniem ogniwa wodorowego jako podstawowego źródła energii (rys. 7). W

przypadku zmniejszenia ilości pozostałej energii w baterii trakcyjnej, np. w trakcie prac przytorowych, sterownik pojazdu rozpoczyna procedurę uruchamiania ogniwa wodorowego. Energia dla rozruchu ogniwa pobierana jest z baterii trakcyjnej, zasilone są również urządzenia pomocnicze.

Modernizowany pojazd roboczy przewidziany jest do prac przytorowych. Możliwe jednak jest wykorzystanie jego możliwości przetokowych i jazdy pociągowej ze składem. W takim przypadku praca pojazdu wyłącznie z wykorzystaniem baterii trakcyjnej powodować może szybkie jej rozładowanie do poziomu, w którym TCMS rozpoczyna procedurę rozruchu ogniwa wodorowego. Uruchamianie ogniwa to stan pracy, w którym następuje największe rozładowanie baterii trakcyjnej. Opracowywany system TCMS musi zapewnić bezpieczny rozruch ogniwa, kontrolując energię pozostałą w baterii trakcyjnej, oraz aktualne zapotrzebowanie generowane przez kontener trakcyjny.

Uruchomione ogniwo wodorowe może pozostać w trybie oczekiwania na pracę. W tym czasie generuje kilkanaście kW mocy, która może być zużyta w całości przez obwody pomocnicze pojazdu. Po uruchomieniu napędu pojazdu system sterowania przełącza ogniwo wodorowe w tryb pracy z pełną mocą. W przypadku jazdy z małymi oporami ruchu (niewielka prędkość, mała masa składu, korzystny profil linii) kontener trakcyjny pracuje znacznie poniżej mocy znamionowej, co dodatkowo umożliwia doładowanie baterii trakcyjnej.

Należy uwzględnić również sytuację, gdy przy pełnym obciążeniu falownika trakcyjnego nastąpi rozładowywanie baterii trakcyjnej, przy pracującym ogniwie wodorowym. Taki stan pracy jest ograniczony czasowo ze względu na pojemność baterii trakcyjnej. W celu zaplanowania ewentualnego ograniczenia mocy, w przypadku głębokiego rozładowania zasobnika, TCMS na podstawie danych z baterii, ogniwa i kontenera trakcyjnego powinien mieć możliwość zasygnalizowania obsłudze konieczność ograniczenia z dawania siły trakcyjnej.



Rys.8. Hamowanie bez odzysku energii

Zadaniem TCMS jest kontrolowanie stanu naładowania baterii trakcyjnej i uniemożliwienie pełnego jej naładowanie w czasie jazdy. Algorytm optymalizacji zużycia energii uwzględnia informacje o aktualnej prędkości pojazdu oraz przewiduje możliwość użycia hamowania odzyskowego, które stanowić będzie podstawowy rodzaj hamowania pojazdu [15]. Falownik trakcyjny umożliwia odzysk energii na szynę DC, dzięki czemu możliwe jest ładowanie zasobnika trakcyjnego. Przy braku możliwości wykorzystania energii hamowania do ładowania baterii trakcyjnej, ogniwo paliwowe przełączone zostaje w stan gotowości do pracy, a nie-

wykorzystana energia pochodząca z hamowania elektrodynamicznego zostaje rozproszona jako ciepło w rezystorze hamowania (rys. 8).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę stanów pracy szynowego pojazdu pomocniczego zasilanego z ogniwa wodorowego oraz baterii trakcyjnej. W celu optymalnego wykorzystania możliwości takiego napędu należy opracować dedykowane algorytmy i system sterowania tj. autorski TCMS. Kluczowym zagadnieniem jest rozruch ogniwa wodorowego oraz wygaszanie stosu ogniwa po zakończeniu pracy. TCMS powinien zarządzać stopniem naładowania zasobnika trakcyjnego zapewniając energię dla celów trakcyjnych, obwodów pomocniczych oraz energię niezbędną do uruchomienia ogniwa wodorowego. Na podstawie danych z kontenera trakcyjnego o zapotrzebowaniu na moc trakcyjną, moc dla urządzeń pomocniczych oraz z prędkości pojazdu, TCMS powinien oszacować zużycie energii dla pojazdu nieobciążonego lub jazdy pociągowej ze składem. W każdym z tych przypadków system sterowania musi zapewnić rezerwę w zasobniku dla energii z hamowania rekuperacyjnego. Możliwość ładowania zewnętrznego baterii trakcyjnej na postoju oraz opcja hamowania odzyskowego pozwolą na zmniejszenie zużycia wodoru, zwiększa to zasadność proponowanego rozwiązania pod względem ekonomicznym.

Autorzy planują dalsze prace związane z opracowaniem i zaimplementowaniem kompletnego systemu sterowania szynowym pojazdem pomocniczym zasilanym wodorowym ogniwem paliwowym.



Dofinansowano ze środków budżetu państwa – dotacja celowa Prezesa Centrum Łukasiewicz „Kompletny system sterowania pojazdem wodorowym” – H2CONTROL.

Autorzy: mgr inż. Patryk Radziszewski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Nowoczesnej Mobilności, ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań, E-mail: patryk.radziszewski@pit.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Maksymilian Cierniowski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Nowoczesnej Mobilności, ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań, E-mail: maksymilian.cierniewski@pit.lukasiewicz.gov.pl; dr hab. inż. Dorota Stachowiak, Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: dorota.stachowiak@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Pamuji, F. A., Dhiaulhaq, M. Z., Wibowo, R. S., Faurahmansyah, M. A., Suwito, Iskandar, E., Effendi, M. K., Sudarman, B., Syafi'i, B. A., Arumsari, N., & Fauzun, Energy Management System Design for Hybrid and Intelligent Light Train, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 8, 80-86
- [2] Saeed M., Briz F., Guerrero J.M., Larrazabal I., Ortega D., Lopez V., Valera J.J., Onboard Energy Storage Systems for Railway: Present and Trends, *IEEE Open Journal of Industry Applications*, (2023), vol. 4, 238-259
- [3] Abbas M., Cho I., Kim J., Reliability-constrained optimal sizing and rechargeable battery selection for improved load distribution in a fuel-cell hybrid railway propulsion system, *Energy Conversion and Management*, (2019), vol. 196, 1167-1179
- [4] Taratajcio M., Rozwiązania poprawiające efektywność energetyczną kolei na podstawie testów przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 11, 135-139
- [5] Sun Y., Anwar M., Hassan N.M.S., Spiragin M., Cole C., A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations. *Railway Engineering Science*, (2021), vol. 29, 212-232

- [6] Winkelmann H., Winkelmann K., Das Akkuschieppfahrfahrzeug (ASF) EL16, Modelleisenbahner, VEB Verlag für Verkehrswesen, (1982), No. 7, 19-20
- [7] Cierniewski M., Jakuszko W., Stobnicki P., Sterowanie obwodem głównym hybrydowego pojazdu szynowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 9, 265-268
- [8] Die akkumulator-Triebwagen der Preussisch-Hessischen Staatseisenbahn und der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft, Freiburg, ISBN 3-88255-203-4, (1997)
- [9] Ding D., Wu X-Y., Hydrogen fuel cell electric trains: Technologies, current status, and future, *Applications in Energy and Combustion Science*, (2024), vol. 17, 100255
- [10] Nqodi A., Moseithe T.C., Yusuff A.A., Advances in Hydrogen-Powered Trains: A Brief Report, *Energies*, (2023), no. 16, 6715.
- [11] Poggio A. E., Balest J., Zubaryeva A., Sparber W., Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas, *Journal of Energy Storage*, (2023), vol. 72, 108411
- [12] Germany launches world's first hydrogen-powered train, *The Guardian, Agence France-Presse*, (2018)
- [13] Stobnicki P., Gallas D., Adoption of modern hydrogen technologies in rail transport, *Journal of Ecological Engineering*, (2022), no. 23, 84–91
- [14] Dokumentacja techniczno – ruchowa Wózek motorowy typ WM-15. Centralne Biuro Konstrukcyjne Maszyn i Urządzeń Drogowych przy ZNTK „Stargard” w Stargardzie, Stargard, (1978)
- [15] Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Karwowskiego, Energetyka Transportu Zelektryfikowanego, *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, (2020)