

Zastosowanie wodorowych ogni paliwowych w transporcie kolejowym

Jakub SIWIEC¹

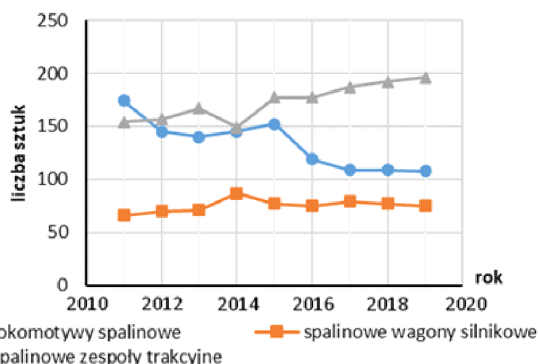
Streszczenie

W artykule opisano wodorowe ogniwa paliwowe, jako najbardziej zaawansowany technologicznie, alternatywny napęd pojazdów szynowych, o ogromnym potencjale rozwojowym. Scharakteryzowano obecny stan taboru oraz stan elektryfikacji sieci trakcyjnej. Zaprezentowano także krajowe i zagraniczne plany wdrożenia ogni paliwowych i towarzyszące prace legislacyjne, ukierunkowane na stosowanie rozwiązań przyjaznych dla środowiska naturalnego.

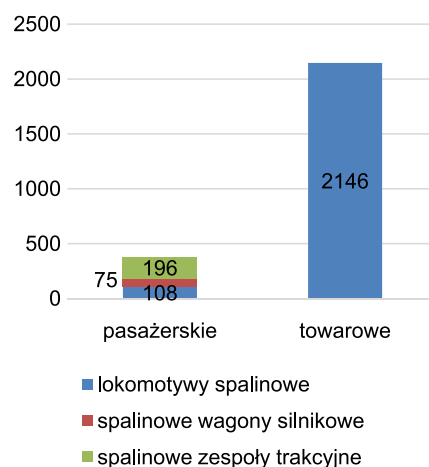
Słowa kluczowe: napęd wodorowy, ogniwa paliwowe, transport kolejowy

1. Wstęp

W końcu 2019 roku, krajowa sieć czynnych linii kolejowych miała długość ponad 19 500 km tras, z czego niemal 7500 km (38%) stanowiły linie, na których ruch pociągów był obsługiwany przez pojazdy o napędzie spalinowym [9]. Wprawdzie wśród przewoźników pasażerskich od kilku lat można zaobserwować trend do zmniejszania liczby lokomotyw spalinowych (rys. 1), niemniej jednak równocześnie wzrosła liczba spalinowych zespołów trakcyjnych. Częściowo jest to związane z przywracaniem ruchu na niezelektryfikowanych szlakach przez nowych przewoźników (np. Koleje Dolnośląskie, Łódzka Kolej Aglomeracyjna). Jednocześnie uwagę zwraca wyraźna dysproporcja pomiędzy przewoźnikami pasażerskimi i przewozami towarowymi pod względem liczby użytkowanych pojazdów spalinowych (rys. 2).



Rys. 1. Zmiana liczebności różnych typów pojazdów spalinowych w przewozach pasażerskich w latach 2011–2019; opracowanie własne na podstawie [9]



Rys. 2. Liczba użytkowanych pojazdów spalinowych w zależności od przewozu; opracowanie własne na podstawie [9]

W 2019 r. średni wiek lokomotyw spalinowych w przewozach pasażerskich (108 szt.) wynosił nieco ponad 42 lata, a w przewozach towarowych (2146 szt. lokomotyw spalinowych) – 39 lat [9]. Wskazuje to na bliską perspektywę konieczności wymiany bądź generalnej modernizacji znacznej części floty, co stanowi potencjalną możliwość do zmiany zasilania na alternatywne źródła energii. Dodatkową motywacją do poszukiwania zamiennych rodzajów napędów jest fakt, że wszelkie złoża ropy naftowej (zarówno obecnie eksploatowane jak i te, które mogą być odkryte) wyczerpią się w ciągu najbliższych 100 lat przy założeniu niezmiennego poziomu wydobycia. Przy wzroście zużycia ropy zaledwie o 2%, czas ten skróci się do 55 lat [5]. Za-

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: jsiwiec@ikolej.pl.

nim ropa całkowicie zniknie z rynku, nastąpi etap drastycznego wzrostu jej ceny dla odbiorców finalnych, co zawęzi jej wykorzystanie do nielicznych gałęzi, które z różnych przyczyn nie mogły do tego czasu przestać się na alternatywne źródła zasilania. Już obecnie 20% wydatków PKP Cargo stanowi koszt paliwa do lokomotyw. Można się również spodziewać wprowadzania dodatkowych opłat za używanie taboru spalinowego lub w dalszej perspektywie ustawowego ograniczania możliwości wykorzystywania napędów spalinowych w taborze kolejowym, podobnie jak zapowiedziano w odniesieniu do transportu drogowego.

Średni poziom elektryfikacji linii kolejowych w Unii Europejskiej wynosi obecnie około 62%, pozostałe linie obsługiwane są przez pojazdy z napędem na olej napędowy. Szacuje się, że około 20% przewozów kolejowych w UE jest wykonywanych pojazdami spalinowymi [11]. Już od dłuższego czasu Komisja Europejska aktywnie stara się przestawiać transport na źródła niskoemisyjne, podejmując wiele inicjatyw legislacyjnych, jak np.: europejską strategię w zakresie paliw alternatywnych, europejską strategią na rzecz mobilności niskoemisyjnej, Pakiet Czystej Mobilności oraz dokument planistyczny przyjęty w lipcu 2020 r. tzw. Europejski Zielony Ład, zakładający znaczącą redukcję emisji gazów cieplarnianych. Obecnie rozpoczęły się przygotowania Agencji Kolejowej Unii Europejskiej do nowelizacji Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności, które w nowej wersji mają zawierać regulacje wynikające z Zielonego Ładu, w szczególności w zakresie tzw. zielonych przewozów towarowych i stosowania pojazdów z nowymi źródłami napędu (ogniwa paliwowe wodorowe, akumulatory i inne). Propozycje nowelizacji TSI mają być gotowe w połowie 2022 r. [12].

Polskie organy ustawodawcze również aktywnie tworzą ramy prawne do zastosowań źródeł niskoemisyjnych w gospodarce krajowej. Przyjęta Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 r. (SRT2030) [10], wymienia w piątym kierunku interwencji ograniczenie wpływu transportu na środowisko. Zakres działań w tym obszarze przewiduje m.in.:

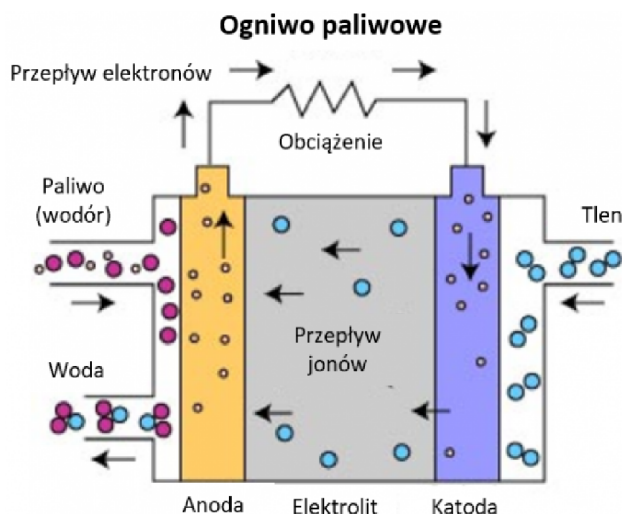
- unowocześnienie taboru (pojazdów oraz infrastruktury paliw alternatywnych),
- wspieranie transportu niskoemisyjnego, w tym przenoszenie przewozów z dróg na kolej,
- promowanie środków transportu zasilanych alternatywnymi źródłami energii (zmniejszające zależność sektora transportu od paliw konwencjonalnych).

Strategia przewiduje również wiele działań o charakterze innowacyjno-technologicznym, w tym między innymi uruchomienie wzdłuż sieci bazowej TEN-T stacji ładowania baterii elektrycznych, tankowania gazu ziemnego oraz w przypadku osiągnięcia efektywności kosztowej również tankowania wodoru.

Możliwości zastosowania wodorowych ogniw paliwowych w transporcie kolejowym były również tematem spotkania, które odbyło się w sierpniu 2020 r. w Urzędzie Transportu Kolejowego, z udziałem przedstawicieli nauki, producentów taboru oraz przewoźników [13]. Jak zapewnił Urząd, uczestnicy przychylnie odnieśli się do inicjatywy opracowania strategii wdrażania napędu wodorowego w Polsce.

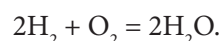
2. Ogniwa paliwowe

Istnieje wiele typów ogniw paliwowych, różniących się zarówno konstrukcją, jak i temperaturą pracy, jednak w przypadku napędów dla środków transportu (kolej, autobusy lub ciężarówki) zastosowanie znalazły jedynie niskotemperaturowe ogniwa z elektrolitem w postaci membrany polimerowej, tzw. PEMFC (ang. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), przedstawione na rysunku 3.



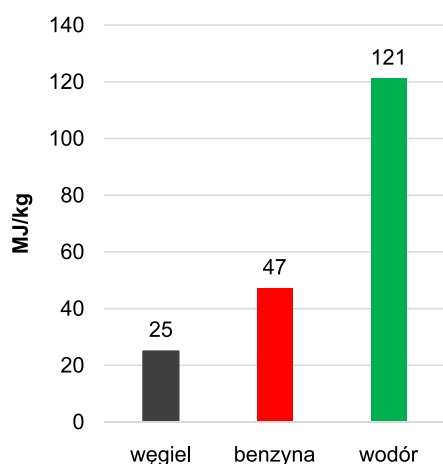
Rys. 3. Budowa ogniwa paliwowego na wodór [Wirtualne Muzeum Gazownictwa (www.wmgaz.pl)]

Paliwem ogniwa jest czysty wodór oraz tlen, które są odpowiednio podawane na anodę (H_2) i katodę (O_2), oddzielone od siebie elektrolitem, w którym zachodzi reakcja generowania energii elektrycznej przekazywanej do baterii. Ubocznym produktem tej reakcji jest woda:



Gęstość mocy ogniw paliwowych przyjmuje się na poziomie 650 W/kg. Przykładowo, do zasilania lokomotywy towarowej TRAXX o mocy 5,58 MW, należy zastosować ogniwa o masie 8,6 t oraz objętości 8,6 m³. Przy założeniu, że wodór jest przechowywany w zbiornikach pod ciśnieniem 35 MPA, uzyskuje się gęstość energii na poziomie 1633 Wh/kg lub objętościowo 0,533 MWh/m³. Sprawność rzeczywistego ogniwa zależy od obciążenia prądowego i waha się w granicach

od 40% do 60%. Wodór charakteryzuje się największą wartością energii na jednostkę masy w porównaniu z najpopularniejszymi dziś paliwami konwencjonalnymi (rys. 4), a jednocześnie jest najpowszechniej występującym pierwiastkiem na Ziemi (atomy wodoru stanowią 92,7% we wszechświecie) [4].



Rys. 4. Energia w odniesieniu do jednostki masy dla różnych rodzajów paliw; opracowanie własne na podstawie [4]

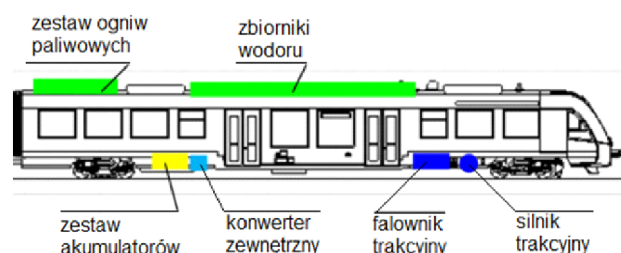
Kluczową barierą utrudniającą wykorzystywanie wodoru jako paliwa jest fakt, że występuje on w postaci związanej z innymi pierwiastkami, co wiąże się z koniecznością doprowadzenia energii do jego uwolnienia (przykładowo, praktycznie niewyczerpalne jego źródło stanowi woda). Dotychczas, problemem przy produkcji czystego wodoru (np. w procesie elektrolizy) był niekorzystny bilans energetyczny tego procesu. Tymczasem, coraz częściej mówi się o wykorzystaniu energii elektrycznej wytworzonej przez odnawialne źródła energii (OZE), np. panele fotowoltaiczne lub morskie farmy wiatrowe. Wyróżnia się trzy odmiany wodoru w zależności od sposobu jego wytwarzania:

- wodór szary – reforming metanu lub zgazowanie węgla (obecnie 76% produkowanego wodoru wytwarza się tą metodą),
- wodór niebieski – uzyskiwany z gazu ziemnego z wykorzystaniem technologii sekwestracji dwutlenku węgla (CCS, ang. *carbon capture and storage*),
- wodór zielony – uzyskiwany w procesie elektrolizy, jest najbardziej ekologicznym rodzajem paliwa w przypadku dostarczania energii z odnawialnych źródeł, np. z ferm wiatrowych; jego udział w całkowitej produkcji wodoru wynosi zaledwie 0,1%.

3. Obecne i planowane wdrożenia ogniw paliwowych w kolejnictwie

Pierwszym pociągiem napędzanym ogniwami paliwowymi wprowadzonym do publicznego transportu,

był wyprodukowany przez firmę Alstom w Salzgitter, zespół trakcyjny Coradia iLint, który od 17 września 2018 r. obsługuje trasę o długości około 100 km z Cuxhaven do Buxtehude w Dolnej Saksonii (Niemcy) [2]. Na rysunku 5 przedstawiono schemat rozmieszczenia kluczowych elementów systemu napędowego.



Rys. 5. Schemat systemu napędowego pociągu Coradia iLint; opracowanie własne na podstawie [2]

Maksymalna prędkość składu wynosi 140 km/h, na jednym tankowaniu można pokonać odcinek długości 1000 km [15], co przy rozkładowych dziesięciu kursach dziennie wymaga jednego tankowania dziennie. Obecnie, można tankować na mobilnej stacji, udostępnionej w kontrakcie przez firmę Alstom [2]. Dwa testowane egzemplarze iLint przejechały łącznie ponad 180 tys. km. Po udanym okresie testowym, Alstom otrzymał zamówienie na dostarczenie dla Dolnej Saksonii kolejnych 14 jednostek EZT iLint. Od września 2020 roku, austriacki przewoźnik federalny ÖBB rozpoczął testowanie jednostki iLint w ramach regularnej obsługi pasażerskiej [1]. Kolejne dostawy wodorowej wersji pojazdu Coradia są planowane w 2022 roku dla niemieckich przewoźników RMV (27 jednostek) i BEG (10 jednostek) oraz dla francuskiego narodowego przewoźnika SNCF (15 jednostek), który w perspektywie najbliższych 15 lat [7], nie wyklucza całkowitej rezygnacji z pociągów z silnikami wysokoprężnymi na rzecz napędów wodorowych.

W 2022 roku w Wielkiej Brytanii mają pojawić się pociągi Breeze, powstałe na bazie EZT klasy 321, w których w przeciwieństwie do składów iLint do napędu będą wykorzystywane wodorowe generatory energii, umożliwiające spalanie wodoru o mniejszej czystości od wodoru stosowanego w ogniwach paliwowych. Plany Brytyjczyków zakładają całkowitą rezygnację do 2040 roku z taboru o napędzie spalinowym [7].

Mimo niższego kosztu diesla jako paliwa w stosunku do mało opłacalnej technologii wodorowej, Stany Zjednoczone są zainteresowane rozwojem zeroemisyjnego transportu. W listopadzie 2020 roku, stan Kalifornia zakontraktował w firmie Stadler dostawę pociągu wodorowego Flirt H2 [3]. W czerwcu 2019 roku, największy na świecie japoński przewoźnik pasażerski, East Japan Railway Company, ogłosił we współpracy z Toyotą rozpoczęcie testów składu napędzanego ogniwami paliwowymi. Komercyjne wdrożenie planowane jest na 2024 rok.

Nad wersją zasilaną wodorem pracuje również Siemens [8], który wspólnie z kanadyjskim dostawcą ogniw paliwowych Ballard Power, zamierza opracować dwa warianty zespołów trakcyjnych Mireo Plus H, o pojemności 120 i 160 pasażerów. Testy zaplanowano na 2021 rok.

Najnowszą europejską inicjatywą rozwojową w zakresie ogniw paliwowych w transporcie kolejowym jest projekt budowy prototypowego pociągu z napędem hybrydowym na bazie istniejącego, trójczłonowego pociągu typu Civia. Koncepcja, wybrana przez Wspólną Inicjatywę Wodoru oraz Ogniw Paliwowych (*The Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking*, FCH JU), zakłada zastosowanie do napędu prototypowego składu ogniw paliwowych wspomaganych akumulatorami litowo-tytanowymi z dodatkową możliwością korzystania z napowietrznej sieci trakcyjnej. Projekt, którego budżet szacuje się na 10 mln euro [6], zrealizuje konsorcjum z hiszpańskim CAF jako liderem.

Polska, będąca jednym z większych producentów wodoru na świecie (około 1 mln ton rocznie) [3], również rozwija projekty wodorowe w branży kolejowej. Grupa Lotos, do której należy jedna z najnowocześniejszych na świecie rafinerii w Gdańsku, realizuje projekt budowy instalacji do oczyszczania i dystrybucji wodoru – Pure H2. Grupy: Lotos Kolej i Lotos Lab (będące częścią grupy Lotos), od września 2018 roku współpracują z Politechniką Warszawską przy projekcie modernizacji dwóch lokomotyw manewrowych, z których jedna będzie wyposażona w akumulatory zapewniające podstawowe źródło energii, wspomagane ogniwami paliwowymi [3]. Największy krajowy koncern paliwo-energetyczny PKN Orlen, będący jednocześnie liderem przedsiębiorstw petrochemicznych w Europie środkowo-wschodniej, pod koniec 2019 roku podpisał z producentem taboru PESA Bydgoszcz list intencyjny, na mocy którego powstanie prototypowa lokomotywa zasilana ogniwami paliwowymi [14]. Jednocześnie, w 2021 roku Orlen planuje uruchomienie w Trzebinii produkcji czystego paliwa wodorowego (99,999%), wykorzystywanego w ogniwach paliwowych [3, 17].

Spółka PKP Cargo, będąca drugą co do wielkości firmą transportu kolejowego w UE, współpracuje z Jastrzębską Spółką Węglową oraz Fabryką Pojazdów Szynowych H. Cegielski w zakresie realizacji wspólnych przedsięwzięć związanych z wykorzystaniem paliwa wodorowego. Grupa kapitałowa JSW produkuje obecnie około 0,8 mld m³ wodoru rocznie, co po oczyszczeniu umożliwi zasilanie 800 autobusów miejskich przez cały rok [3].

4. Podsumowanie

Zasilanie napędów elektrycznych pojazdów szynowych z napowietrznej sieci trakcyjnej jest obecnie w Europie najpowszechniejszym rozwiązaniem. Niemniej,

koszty elektryfikacji są istotną barierą dla zwiększania udziału trakcji w całym systemie transportu kolejowego, a w połączeniu z wysokimi kosztami paliwa do taboru spalinowego stwarzają dogodne warunki do poszukiwania alternatywnych źródeł energii. Pierwsze testy w ruchu pasażerskim oraz prace studialne dowiodły, że ogniwa paliwowe mogą być stosowane jako zamiennik silników spalinowych. Dotyczy to w szczególności stosunkowo długich tras (powyżej 100 km) o małej częstotliwości kursowania pociągu (do 10 kursów dziennie).

Opłacalność stosowania ogniw paliwowych w dużym stopniu zależy od kosztów energii elektrycznej potrzebnej do produkcji czystego wodoru (im koszt tej energii jest niższy, tym ogniwa będą bardziej opłacalne) i kosztów oleju napędowego, będącego konkurencją dla ogniw paliwowych. Przykładowo, niska cena ropy w USA powoduje, że obecnie napędy dieslowskie są korzystniejsze ekonomicznie, natomiast przewiduje się, że rozwój technologii ogniw paliwowych zmieni układ opłacalności na korzyść ogniw już w 2030 roku [16].

Wdrożenie technologii ogniw w większej skali będzie jeszcze wymagać znacznych nakładów finansowych i promocyjnych, jednak ze względu na zaangażowanie w rozwój paliwa wodorowego producentów taboru, potencjalnych dostawców wodoru oraz Komisji Europejskiej, wiele wskazuje na duże szanse powodzenia tego źródła energii. Szacuje się, że w 2030 roku jeden z pięciu nowo dostarczanych pojazdów szynowych w Europie będzie napędzany ogniwami paliwowymi [11].

Większość podejmowanych prac rozwojowych nad zastosowaniem ogniw paliwowych w transporcie szynowym koncentruje się obecnie w Europie, co stanowi punkt wyjścia również dla krajowych producentów z branży kolejowej, którzy wspólnie z europejskimi kooperantami mogą zdobyć niezbędne doświadczenie w nowej technologii i następnie prowadzić ekspansję na rynki rozwijające się. Utworzony w 2006 roku na mocy ustawy o biopaliwach (Dz.U. z 2019 r., poz. 1155 z późn. zm.) Fundusz Niskoemisyjnego Transportu stanowi stabilne źródło wsparcia finansowego dla prac rozwojowych w zakresie paliw alternatywnych i rozwoju infrastruktury niezbędnej do ich upowszechniania. Polska, która już dziś jest jednym z największych dostawców wodoru na świecie, dzięki potencjalnym możliwościom taniego wytwarzania czystego wodoru z wykorzystaniem energii elektrycznej z morskich farm wiatrowych, może stać się liderem w branży zielonego transportu.

Literatura

1. Alstom, materiały prasowe, WWW <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/9/alstomshydrogen-train-enters-regular-passenger-service-austria> [dostęp: 11.09.2020].

2. Alstom, materiały prasowe, WWW <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/5/successful-year-and-half-trial-operation-worlds-first-two-hydrogen> [dostęp: 19.05.2020].
3. Cabak M.: *Nadjeżdża kolej wodorowa*, WWW <https://biznesalert.pl/wodor-koleje-infrastruktura-innowacje/> [dostęp: 13.03.2020].
4. Daszkiewicz Paweł i in.: *Analiza wybranych napędów alternatywnych stosowanych w autobusach szynowych*, Autobusy, 2017, nr 6, s. 143–146.
5. Lewandowski W.M., Klugmann-Radziemska E.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii, Kompendium*, wyd. 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2020.
6. Madrjas J.: *Konsorcjum CAF zbuduje dla Komisji Europejskiej hybrydę wodorową*, Rynek Kolejowy, WWW <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/caf-zbuduje-pociag-na-wodor-dla-komisji-europejskiej-99383.html#> [dostęp: 5.11.2020].
7. Mokos T.: *Wodór napędzi kolej?* WWW <https://raportkolejowy.pl/wodor-napedzi-kolej/> [dostęp: 17.03.2020].
8. Raport Kolejowy, Napęd wodorowy, baterijny czy EDMU?, WWW <https://raportkolejowy.pl/naped-wodorowy-baterijny-czy-edmu/> [dostęp: 13.11.2020].
9. Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego w 2019 r., Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa, 2020.
10. Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 r., Ministerstwo Infrastruktury, Monitor Polski (poz. 1054/2019).
11. Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment – HI-02-19-229-EN-N, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
12. Urząd Transportu Kolejowego, Aktualności: Cyfrowa kolej i zielone przewozy towarowe – pakiet rewizji TSI 2022, WWW <http://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/16092,Cyfrowa-kolej-i-zielone-przewozy-towarowe-pakiet-rewizji-TSI-2022.html> [dostęp: 24.06.2020].
13. Urząd Transportu Kolejowego, Aktualności: Pociągi na wodór, WWW <http://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/15296,Pociagi-na-wodor.html?search=7918345157> [dostęp: 22.08.2019].
14. Usidus M.: *Młody Technik*, WWW <https://mlo-dytechnik.pl/technika/30054-wsiasc-do-pociagu-wodorowego> [dostęp: 11.2020].
15. Woźniak A.: *Pociągi na wodór coraz bliżej polskich torów*, Rzeczpospolita, WWW <https://www.rp.pl/Koleje/310089896-Pociagi-na-wodor-coraz-blizej-polskich-torow.html> [dostęp: 8.10.2020].
16. Zenith F.: *Techno-economic analysis of freight railway electrification by overhead line, hydrogen and batteries: Case studies in Norway and USA*, Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 234(7), pp. 791–802, Institution of Mechanical Engineers, 2020.