

## Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 1)

### Napędy trakcyjne pojazdów szynowych zasilane wodorem (cz. 1)

*The paper presents the reasons for launching the efforts aimed at implementing the low-emission rail vehicles. A short history of development of the hydrogen-powered drive solutions is described. It has been pointed out that implementation of hydrogen-powered rail vehicles results in simultaneous development of production and distribution of this fuel. The qualities of new energy sources suitable for use in the rail vehicles are depicted, while further part of the paper presents the rail vehicles already implemented in the world. Another part of the article pertains to domestically undertaken measures related to hydrogen propulsion. Due to topicality of the National Reconstruction Plan, the excerpts from its provisions related to hydrogen production and modern rail transport have been mentioned. The following chapter is devoted to economic aspects, while the last one to measurable environmental benefits resulting from the use of the hydrogen traction. Another part of the paper will be published in the next issue of the Rail Vehicles.*

*W artykule przedstawiono powody uruchomienia działań mających na celu wdrożenie niskoemisyjnych pojazdów szynowych. Opisano krótką historię rozwoju napędów zasilanych wodorem. Zwrócono uwagę, że wdrożenie do eksploatacji pojazdów szynowych zasilanych wodorem wiąże się z równoczesnym rozwojem produkcji i dystrybucji tego paliwa. Zostały opisane cechy nowych źródeł energii do stosowania w pojazdach szynowych, a w kolejnej części artykułu zaprezentowano pojazdy szynowe wdrożone na świecie. Następną część artykułu dotyczy podjętych w kraju działań związanych z napędami wodorowymi. Ze względu na aktualność tematu Krajowego Planu Odbudowy przytoczone zostały fragmenty jego zapisów dotyczące produkcji wodoru i nowoczesnego transportu szynowego. Dalszy rozdział został poświęcony aspektom ekonomicznym, a ostatni wymiernym korzyściom dla środowiska z zastosowania napędów trakcyjnych zasilanych wodorem.*

*Dru ga część artykułu zostanie opublikowana w następnym numerze Pojazdów Szynowych.*

#### 1. Introduction

One of the main objectives of the European Union's policy consists in protecting the environment, minimizing the risk to human health and climate, and to preserving the biodiversity. Thanks to the European Green Deal, Europe is to become the first climate-neutral continent, largely due to the use of cleaner energy sources and technologies [8], [9].

The search for less energy-consuming and low-emission transport systems, especially in agglomerations, becomes a serious challenge for the people responsible for civilization development of the country, acting at any state of the management level. Such the undertakings should be based on responsible analyzes of the current situation and the conditions achievable in the future.

The COP 54 Conference (The Conference of Parties 25) in Madrid (December 2–13, 2019) confirmed importance of the subject of the climate change and indicated enormous threat to our planet in the case of the

#### 1. Wstęp

Jednym z głównych celów polityki Unii Europejskiej jest ochrona środowiska naturalnego i zminimalizowanie zagrożeń dla zdrowia ludzi i dla klimatu oraz zachowanie różnorodności biologicznej. Europa za sprawą Europejskiego Zielonego Ładu ma stać się pierwszym kontynentem neutralnym dla klimatu, w dużej mierze dzięki bardziej ekologicznym źródłom energii i technologiom [8], [9].

Poszukiwanie mniej energochłonnych i niskoemisyjnych systemów transportowych, szczególnie w aglomeracjach, staje się poważnym wyzwaniem dla ludzi odpowiedzialnych za rozwój cywilizacyjny kraju, na każdym szczeblu zarządzania państwem. Podstawą do takich działań powinny być odpowiedzialnie przeprowadzone analizy sytuacji obecnej i możliwej do uzyskania w przyszłości.

Konferencja COP 54 (Conference of Parties 25) w Madrycie (2–13 grudnia 2019) potwierdziła ważność tematu zmian klimatycznych i wskazała na olbrzymie

lack of much more intense action than before [5].

The use of the transport means, inclusive of the rail ones, also adversely affects the environment condition. This is the result of CO<sub>2</sub> emission to the atmosphere, the noise generated by the rail vehicles and contamination caused by the dust from brake blocks and discs, as well as leaking oil and grease.

The difficult situation in the field of environmental protection contributed to the launch of development works on new energy sources and new rail vehicle drives, including the hydrogen-powered ones.

As early as in 1807, the Swiss designer Isaac de Rivaz built the first hydrogen-powered wheeled vehicle. The de Rivaz engine was one of the first internal combustion engines [25].

Over 40 years ago, TVP aired the "Sonda" program held by Kamiński and Kurek who have presented a project of a hydrogen-powered car. It was an electrically powered car, in which the electric power is generated on an ongoing basis by the fuel cells supplied with previously refueled hydrogen. Twenty five years later James May leading the Top Gear - the British entertainment program - presented a prototype hydrogen vehicle of GM, claiming that in 10-20 years such cars will become available [4].

The term "hydrail" was first used on August 22, 2003 at a speech in the Volpe National Transportation Systems Center of the U.S. Department of Transportation in Cambridge. Stan Thompson from AT&T then gave a presentation entitled "*Mooreville Hydrail Initiative*".

Since 2005, the International Hydrail Conferences are held annually by Appalachian State University and Mooreville South Iredell Chamber of Commerce, in collaboration with universities and other entities. They are aimed to bring together the scientists, engineers, and business leaders, industry experts and operators engaged in this technology or using it, with a view to discuss and exchange the knowledge, thus accelerating implementation of the hydrogen solutions, with a view to improve the environment condition, climate, energy security and overall economic development.

In the beginning the hydrogen fuel cells technology was best known and widespread in Japan and California, nevertheless, recently the investments undertaken in Germany predominate [23].

## **2. Premises for implementation of new power supply systems to the railway vehicles traction**

Potential advantages for the environment resulting from using the FCH (Fuel Cell Hydrogen) consist, first of all, in the lack of the exhaust pollutants emission, caused by the transport means and in reduction in the noise emission [17].

Vehicles referred to as "hydrail" usually falling under hybrid vehicles, are provided with renewable energy storage, as for example batteries or supercapacitors, and with regenerative braking. Possible applications

zagrożenie dla naszej planety w sytuacji braku działań znacznie intensywniejszych niż dotychczasowe [5].

Eksploatacja środków transportu, w tym szynowego, wpływa także negatywnie na stan środowiska. Jest to wynik emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery, generowania hałasu przez pojazdy szynowe oraz zanieczyszczania terenu pyłem z klocków i tarcz hamulcowych, wycieku oleju i smarów.

Trudna sytuacja w zakresie ochrony środowiska spowodowała uruchomienie prac rozwojowych nad nowymi źródłami energii i nowymi napędami do pojazdów szynowych, w tym zasilanych paliwem wodorowym.

Już w 1807 r. szwajcarski konstruktor Isaac de Rivaz zbudował pierwszy pojazd kołowy napędzany silnikiem wodorowym. Silnik de Rivaza był jednym z pierwszych silników o spalaniu wewnętrznym [25].

Ponad 40 lat temu TVP wyemitowała program „Sonda”, w którym redaktorzy Kamiński i Kurek prezentowali widzom projekt samochodu na wodór, czyli auta o napędzie elektrycznym, w którym energia elektryczna wytwarzana jest na bieżąco w ogniach paliwowych z zatankowanego uprzednio wodoru, a 25 lat później w brytyjskim programie rozrywkowo-motoryzacyjnym Top Gear prowadzący James May prezentował prototypowy pojazd wodorowy koncernu GM twierdząc, że za 10-20 lat takie samochody będą dostępne dla kierowców [4].

Termin "**kolej wodorowa**" (*hydrail*) został po raz pierwszy użyty 22 sierpnia 2003 r. w trakcie prezentacji w Centrum Systemów Transportowych Volpe Departamentu Transportu USA w Cambridge. Stan Thompson z firmy AT&T wygłosił wówczas prezentację "*Mooreville Hydrail Initiative*".

Od 2005 r. odbywają się coroczne Międzynarodowe Konferencje na temat Hydrail (*International Hydrail Conference*), organizowane przez Appalachian State University oraz Mooreville South Iredell Chamber of Commerce, we współpracy z uniwersytetami i innymi podmiotami. Mają one na celu gromadzenie naukowców, inżynierów, liderów biznesu, ekspertów przemysłowych i operatorów pracujących z tą technologią lub korzystających z niej, w celu wymiany wiedzy i dyskusji prowadzących do przyspieszenia wdrażania wodorowych rozwiązań, pod kątem ochrony środowiska, klimatu, bezpieczeństwa energetycznego i ogólnego rozwoju gospodarczego.

Początkowo technologia wodorowych ogni paliwowych najbardziej znana i rozpowszechniona była w Japonii oraz w Kalifornii, jednak ostatnio głośniejsze jest o związanych z nią inwestycjach podejmowanych w Niemczech [23].

## **2. Przesłanki wdrażania nowych systemów zasilania napędów trakcyjnych w pojazdach kolejowych**

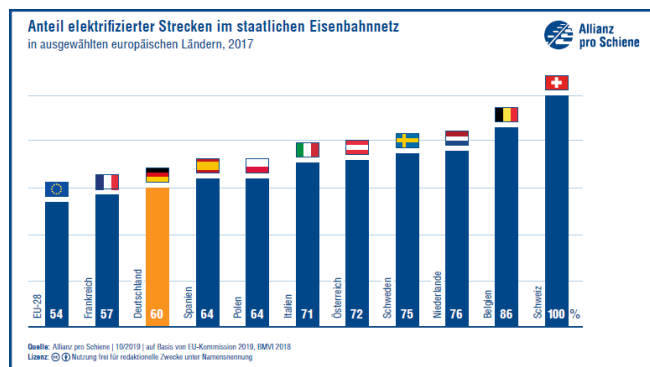
of the hydrail system include all types of the rail transport, i.e. suburban and passenger rail, freight rail, light rail, high speed transit railway, mine rail, industrial rail systems, trams and special park and museum railway lines [13].

Railway is the most ecological form of transportation in the European Union. In 2018, it emitted only 0.5% of greenhouse gases generated by the entire transport sector. Thanks to hydrogen-powered trains, the emission may be reduced virtually to zero. Hydrogen is one of the power-efficient fuels. It is burnt without greenhouse gases emission and, therefore, is considered to be zero emission [19]. The tests carried out by the Polytechnic University of Bari, consisting in simulated driving cycle of a hydrogen-powered train on the route equivalent to the existing rebuilt line section of the length of 23.6 km in the suburban area of the city of L'Aquila, allow to draw the following conclusions:

- zero-emission driving cycles can be attained using no electrochemical batteries for the traction purposes;
- operation of a light hydrogen-powered train enables to save 20.31 gCO<sub>2</sub>/passenger-km compared to the diesel train [3].

In case of the distance from 400 to 800 km, the hydrogen-powered trains provide a reasonable solution allowing to reduce local emission at no high cost incurred for track electrification [20].

For understandable reasons, the hydrogen fueled vehicles should be operated firstly at non-electrified lines. In order to assess the share of non-electrified lines in the Polish rail transport system this parameter should be compared to the ones determined in other European countries. The share of electrified lines is shown in Fig. 1 [6]. According to the Allianz pro Schiene data, the average value of this share in the European Union amounts to 54%, while in Poland, placed at the upper part of this list, it amounts to 64%. Such a large share of non-electrified lines is still conducive to widespread use of the diesel vehicles.



Rys.1. Procentowy udział linii zelektryfikowanych w krajach europejskich

Fig. 1. Percentage share of electrified lines in European countries

Potencjalne korzyści dla środowiska dzięki stosowaniu technologii wodorowej FCH (*Fuel Cell Hydrogen* - wodorowe ogniwa paliwowe) to przede wszystkim brak emisji substancji zanieczyszczających spalin bezpośrednio ze środków transportu oraz zmniejszenie emisji hałasu [17].

Pojazdy określane jako „hyd rail” to zazwyczaj pojazdy hybrydowe z magazynem energii odnawialnej, na przykład w akumulatorach lub superkondensatorach i z hamowaniem odzyskowym. Potencjalne zastosowania systemu hyd rail obejmują wszystkie rodzaje transportu szynowego: kolej podmiejską, kolej pasażerską, kolej towarową, lekką kolej, szybki tranzyt kolejowy, koleje kopalniane, przemysłowe systemy kolejowe, tramwaje oraz specjalne kolejki w parkach i muzeach [13].

Kolej jest najbardziej ekologiczną formą transportu w Unii Europejskiej. W 2018 roku odpowiadała za emisję jedynie 0,5% gazów cieplarnianych generowanych przez cały sektor transportu. Dzięki pociągom z napędem wodorowym emisja może być praktycznie zerowa. Wodór należy do paliw wydajnych energetycznie, a jego spalanie nie emituje gazów cieplarnianych i dlatego uznawane jest jako zero emisyjne [19].

Z badań przeprowadzonych metodą symulacji jazdy pociągiem wodorowym w cyklu jazdy na trasie odpowiadającej przekonstruowanej istniejącej sekcji linii o długości 23,6 km w obszarze podmiejskim miasta L'Aquila wykonanych przez Politechnikę w Bari, wynikają następujące wnioski:

- można uzyskać cykle jazdy z zerową emisją bez użycia baterii elektrochemicznych dla potrzeb trakcji
- stosowanie lekkiego pociągu zasilanego wodorem pozwala zaoszczędzić 20,31 g CO<sub>2</sub> / pasażero-km w porównaniu do pociągu spalinowego [3].

Na dystansach od 400 do 800 km pociągi napędzane wodorem są inteligentnym rozwiązaniem ograniczającym lokalne emisje bez ponoszenia wysokich kosztów elektryfikacji torów” [20].

Pojazdy z napędem zasilanym paliwem wodorowym ze zrozumiałych względów będą w pierwszej kolejności eksploatowane na liniach niezelektryfikowanych. Dla oceny udziału linii niezelektryfikowanych systemie transportu kolejowego w Polsce należy odnieść ten parametr do innych krajów europejskich. Przedstawia to wykres udziału linii zelektryfikowanych na poniższym rys. 1 [6]. Według danych Allianz pro Schiene wartość średnia w Unii Europejskiej to 54%, a w Polsce, która znajduje się w czołówce tej listy, 64%. Tak duży udział linii niezelektryfikowanych jest powodem powszechnego jeszcze stosowania pojazdów spalinowych.

According to the Annual Report of the PKP Group for 2018, the number of traction rolling stock, including the diesel units, was as follows:

- The PKP CARGO Group had 2352 locomotives, including 1286 diesel ones;
- The PKP IC Company owned 363 locomotives (inclusive of seven diesel locomotives rented from the Czech Republic), 74 electric multiple units (20 ED250, 20 ED160, 20 ED161 and 14 ED74), 2114 passenger carriages;
- The PKP LHS Company operated 77 diesel locomotives;
- PKP SKM Group had 13 diesel multiple units, nevertheless, from December 9, 2018, their number was restricted to 10 units.

Entire number of the diesel multiple units operated by domestic carriers amounts to 244. According to Statistics Poland 2149 diesel locomotives were in operation in Poland at the end of 2019, while total number of the manufactured ones was equal to 4152.

According to PKP LHS, the average age of line diesel locomotives is 39 years, while in case of shunters it is 42 years. The average age of diesel locomotives used by Polish passenger traffic operators is also increasing, reaching 41.7 years at the end of 2018.

It should be noted that, both in the case of diesel and electric locomotives, the scope of modernizations and purchases forecasted by state and regional carriers will not significantly affect the average age of the rolling stock [6].

### 3. Characteristics of new energy sources for use in the rail traction vehicles

It should be noticed that safety level of the hydrogen transport means as compared to conventional ones is similar. It should also be highlighted that the refueling duration of the fuel cell electric vehicles at a pressure of 700 bar is practically the same as in the case of usual passenger cars powered by combustion engines, while in the case of buses, e.g. city buses, it amounts approximately to 15-20 minutes. The FCH trains are distinguished by relatively fast refueling, lasting below 20 minutes, that allows to run for 18 hours. Analyses made for the European market have shown that the FCH trains could reach an 11% share by 2030 in case of a so-called low scenario, up to 20% by 2030 in the basic scenario and up to 40% by 2030 in the high scenario [17].

What concerns the hydrogen ratios of calorific value and heat of combustion to mass, they are the highest among fuels. Nevertheless, due to very low density of hydrogen, these ratios are unfavorable as compared to other fuels, when related to volume. Therefore, hydrogen is well suited to the vehicles where mass plays more important role than volume, such as rockets or spacecrafts. These comparison is shown in Table 1 [25].

Według Raportu Roczno Grupy PKP za 2018 r. stan liczbowy taboru trakcyjnego, w tym spalinowego, był następujący:

- Grupa PKP CARGO posiadała 2.352 lokomotywy, w tym 1.286 lokomotyw spalinowych
- Spółka PKP IC roku posiadała 363 lokomotywy (w tym siedem lokomotyw spalinowych wynajętych z kolei ČD), 74 elektryczne zespoły trakcyjne (20 szt. ED250, 20 szt. ED160, 20 szt. ED161 oraz 14 szt. ED74), 2 114 wagonów pasażerskich
- Spółka PKP LHS posiadała 77 lokomotyw spalinowych
- PKP SKM miała na stanie 13 spalinowych zespołów trakcyjnych, jednak od 9 grudnia 2018 roku ich liczba została ograniczona do 10 szt.

Łącznie krajowi przewoźnicy dysponowali 244 spalinowymi zespołami trakcyjnymi. Według GUS pod koniec 2019 r. w Polsce było 2.149 czynnych lokomotyw spalinowych, a łącznie wyprodukowano ich 4.152.

Według danych PKP LHS, średni wiek liniowych lokomotyw spalinowych wynosi 39 lat, natomiast manewrowych 42 lata. Także średni wiek spalinowych lokomotyw używanych przez operatorów przewozów pasażerskich w Polsce rośnie i na koniec 2018 roku wynosił 41,7 lat.

Warto podkreślić, że zarówno w przypadku lokomotyw spalinowych jak i elektrycznych, zakres planowanych modernizacji i zakupów przez przewoźników państwowych i regionalnych nie będzie miał dużego znaczenia dla średniego wieku taboru [6].

### 3. Charakterystyka nowych źródeł energii do zastosowania w kolejowych pojazdach trakcyjnych

Wart odnotowania jest fakt, że poziom bezpieczeństwa wodorowych środków transportu ze stosowanymi konwencjonalnie jest porównywalny. Podkreślenia wymaga również fakt, że czas tankowania elektrycznych samochodów z ogniwami paliwowymi (FCEV - *Fuel Cell Electric Vehicle*) przy ciśnieniu 700 bar, jest praktycznie taki sam jak konwencjonalnych samochodów osobowych napędzanych silnikami spalinowymi i ok. 15÷20 minutowy w przypadku autobusów np. miejskich. Pociągi FCH charakteryzują się relatywnie szybkim napełnianiem wynikającym z czasu krótszego niż 20 min i mogą pracować przez 18 godz. na jednym tankowaniu. Analizy rynku europejskiego ujawniły, że pociągi FCH mogłyby mieć 11 % udziału do 2030 r. wg tzw. scenariusza niskiego, do 20% do 2030 r. wg scenariusza podstawowego i do 40% do 2030 r. w scenariuszu wysokim [17].

Wodór ma w odniesieniu do masy największą wśród paliw wartość opałową i ciepło spalania. Ze względu na bardzo małą gęstość wodoru niekorzystnie prezentuje się na tle innych paliw, jeżeli wartości te zostaną odniesione do objętości. Z tego powodu wodor

#### 4. Implementation of hydrogen-powered rail traction vehicles in the world

The need for new investments related to building a network of hydrogen refueling stations poses an important challenge. A certain lack of up-to-date knowledge related to modern hydrogen technology may be

observed. One should take into consideration a greater energy efficiency of hydrogen as compared to fossil fuels, nevertheless, being lower than that of advanced technological fuel cells, e.g. of electric vehicles. Moreover, the purchase price still remains high. The Directive 2014/94/EU on the development of alternative fuels infrastructure includes recommendations on construction of the hydrogen refueling infrastructure by EU Member States, primarily along the TEN-T Corridors [7].

Porównanie właściwości paliw Comparison of fuel properties

Tabl. 1

Parametr	Benzyna	Metan	Propan	Wodór
Ciepło parowania, kJ/kg	302	577	388	444
Wartość opałowa, MJ/kg	44,4	50,0	46,4	120,0
Ciepło spalania, MJ/kg	46,7	55,5	48,9	141,9
Temperatura samozapłonu, °C	222	534	466	585

observed. One should take into consideration a greater energy efficiency of hydrogen as compared to fossil fuels, nevertheless, being lower than that of advanced technological fuel cells, e.g. of electric vehicles. Moreover, the purchase price still remains high. The Directive 2014/94/EU on the development of alternative fuels infrastructure includes recommendations on construction of the hydrogen refueling infrastructure by EU Member States, primarily along the TEN-T Corridors [7].

Such an infrastructure of the hydrogen refueling stations is already under construction in several countries, among others in Germany, France, Great Britain, Scandinavian countries, USA, Japan and South Korea. As of the end of 2017, already 378 hydrogen refueling stations were operative in the world for motor vehicles and several ones intended for railway transport means. The problem that needs to be solved with a view to make implementation of hydrogen cells in rail transport more effective resolves itself to quick launch of a reasonable, safe and easily accessible hydrogen filling system designed for rail vehicles at their service points.

In 2018, a successful study of the FCH idea was carried out. In result two hydrogen-powered trains were put in operation on an approximately 100 km route in Lower Saxony, Germany. It is planned to increase their number to 14 by 2021.

Toyota recently declared a partnership with the Japanese Eastern Railways in order to develop hydrogen trains in Japan.

A few selected examples presented below show a brief history of hydrogen technology development in rail transport:

- In 2002, a hydrogen-powered mine locomotive was demonstrated in Val-d'Or (Quebec - Canada).
- In 2006, the world's first hydrogen wagon was developed by the East Japan Railway Company.
- In 2007, a mini hydrogen train was designed at the Taiwan National Science and Technology center.

#### 4. Wdrożenia szynowych pojazdów trakcyjnych zasilanych wodorem na świecie

Konieczność nowych inwestycji związanych z budową sieci stacji tankowania wodoru stanowi istotne wyzwanie. Zauważalny jest pewien brak zaktualizowanej wiedzy na temat nowoczesnej technologii wodorowej. Trzeba też zwrócić uwagę na większą efektywność energetyczną wodoru niż paliw kopalnych, ale mniejszą niż zaawansowanych technologicznych ogniw paliwowych w przypadku np. pojazdów elektrycznych (EV – *Electric Vehicles*) oraz na wysoką jeszcze cenę ich zakupu. Dyrektywa 2014/94/UE w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych zawiera zalecenia dotyczące budowy infrastruktury tankowania wodoru przez kraje członkowskie UE, przede wszystkim wzdłuż korytarzy TEN-T [7].

Taka infrastruktura stacji tankowania wodoru budowana jest już w kilku krajach, m.in. w Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii, krajach skandynawskich, USA, Japonii i Korei Płd. Według stanu na koniec 2017 r. na świecie funkcjonowało już 378 stacji tankowania wodoru (HRS - *Hydrogen Refuelling Station*), dla pojazdów samochodowych i kilka bezpośrednio dla środków transportu kolejowego.

Problemem, który należy rozwiązać dla efektywniejszego wdrażania ogniw wodorowych w transporcie szynowym, jest szybkie uruchomienie racjonalnego, bezpiecznego i łatwo dostępnego systemu napełniania wodorem zbiorników pojazdów szynowych w punktach ich obsługi technicznej.

W roku 2018 przeprowadzono udane badanie pomysłu FCH i wprowadzono dwa pociągi na około 100 km trasie w Dolnej Saksonii w Niemczech i planuje się zwiększenie ich liczby do 14 pociągów do 2021 r.

Toyota ostatnio ogłosiła partnerstwo z Japońskimi Kolejami Wschodnimi dla rozwijania pociągów wodorowych w Japonii.

Kilka wybranych przykładów przedstawia poniżej skróconą historię rozwoju technologii wodorowej w transporcie kolejowym:

- In 2010, the University of Southwest Jiaotong in China presented a prototype of its first hydrogen train.
- In 2012 an attempt was made in Denmark (Hydrogen Train Project) to build the first European train using hydrogen as a fuel of an internal combustion engine.
- In 2012, the University of Birmingham introduced a novel hydrogen mini train.
- In September 2018, the world's first zero-emission commercial passenger train was put into service in Lower Saxony.
- In November 2019, the first train provided with hydrogen fuel cells, to be operated in the USA, was ordered from the Stadler Railfor Factory (Switzerland) intended for the future Arrowrail line between Redlands and San Bernardino, California.

Rhein-Main Transport (Germany) in May 2019 ordered 27 units for the northern lines in Frankfurt, that are currently served by diesel traction. In the UK a gradual withdrawal of all diesel trains by 2040 was declared in 2018.

Moreover, SNCF in France, commissioned in Alstom construction of the first hydrogen multiple unit designed for the Auxerre and Auvergne-Rhone-Alps lines. It is intended to be fitted with 200 kW fuel cells from Ballard, currently used in the Mireo units.

The number of the examples of implementation of the hydrogen-powered trains in Europe is constantly growing.

In Romania an interesting hydrogen train intended to operate on the line from Otopeni airport to the Bucharest centre was presented [17].

A few years ago, Alstom's hydrogen-powered locomotives began trial operation of the route Cuxhaven – Buxtehude. The North Sea routes will be served by 14 Alstom Coradia iLint hydrogen rail buses, belonging to the Lower Saxony EVB railways. Moreover, in 2022 27 hydrogen-powered rail buses will be used by the local government company HLB Railways in Hesse, operating them on the lines around Frankfurt am Main and Wiesbaden. [27].

The train, referred to as Coradia iLint, was built at the Alstom plant in Salzgitter, Germany. It runs with the speed up to 140 km/h. A single refueling is sufficient for a whole working day. Its full autonomy allows to cover a distance of 1,000 km. The train is refueled at a mobile hydrogen refueling station, located just next to the tracks. A stationary refueling station will be launched in 2021 at which time Alstom will supply the German LNVG Railway Office with another fourteen Coradia iLint trains.

News also emerged that Alstom will produce another 27 hydrogen trains for the RMV Association, intended to operate in the Rhine-Main region as part of a long-term infrastructure project to be launched in 2022.

- w 2002 r. w Val-d'Or (Quebec – Kanada) została zademonstrowana lokomotywa kopalniana zasilana wodorem
- w 2006 r. pierwszy na świecie wodorowy wagon został opracowany przez East Japan Railway Company
- w 2007 r. powstał mini pociąg wodorowy w ośrodku Taiwan National Science and Technology
- w 2010 r. Uniwersytet Southwest Jiaotong w Chinach zademonstrował prototyp swojego pierwszego pociągu wodorowego
- w 2012 r. w Danii (Hydrogen Train Project) podjęto próbę budowy pierwszego europejskiego pociągu zasilanego wodorem z zastosowaniem wodoru w silniku spalinowym z wewnętrznym spalaniem
- w 2012 r. Uniwersytet w Birmingham przedstawił pionierski mini pociąg wodorowy
- w 2018 r. we wrześniu wszedł do eksploatacji w Dolnej Saksonii pierwszy na świecie komercyjny pociąg pasażerski zasilany wodorem, które nie emitują dwutlenku węgla
- w 2019 r. w listopadzie został zamówiony w fabryce Stadler Railfor (Szwajcaria) pierwszy dla USA pociąg z wodorowymi ogniwami paliwowymi dla przyszłej linii Arrowrail między Redlands i San Bernardino w Kalifornii.

Rhein-Main Transport w Niemczech w maju 2019 r. zamówił 27 jednostek dla północnych linii Frankfurtu, obecnie obsługiwanych pojazdami spalinowymi. UK zapowiedziało w 2018 r. stopniowe wycofywanie wszystkich pociągów spalinowych do 2040 r.

Ponadto we Francji rozpoczęto na zamówienie SNCF w firmie Alstom budowę pierwszego wodorowego zespołu trakcyjnego dla linii regionu Auxerre i Auvergne-Rhone-Alps. Wykorzystano stosowane w jednostkach Mireo ogniwa paliwowe 200 kW z firmy Ballard.

Przykładów wdrażania pociągów z napędem zasilanym wodorem w Europie jest coraz więcej.

Rumunia pokazała interesujący pociąg wodorowy dla linii z lotniska Otopeni do centrum Bukaresztu [17].

Kilka lat temu zasilane wodorem lokomotywy firmy Alstom zaczęły pilotażowo kursować na trasie między Cuxhaven a Buxtehude. Na trasy położone nad Morzem Północnym wjedzie 14 wodorowych autobusów szynowych Alstom Coradia iLint i będą nimi dysponowały koleje EVB należące do Dolnej Saksonii. Natomiast w 2022 r. autobusy szynowe zasilane wodorem (27 pojazdów) zaczną wykorzystywać samorządowa spółka Koleje HLB w Hesji, obsługując nimi linie wokół Frankfurtu nad Menem i Wiesbaden [27].

Pociąg o nazwie Coradia iLint zbudowany został w zakładach Alstom w Salzgitter w Niemczech. Osiąga prędkość 140 km/h, a jedno tankowanie wystarcza na cały dzień pracy. Dzięki pełnej autonomii może poko-

The contract for the supply and maintenance of the trains provided with the cells accounts for € 500 million for a period of 25 years. Infraser GmbH & Co Höchst KG will be liable for hydrogen supplies. A hydrogen refueling installation is to be established in Höchst near Frankfurt am Main. The German Federal Government shall support financing of the station construction and 40% of the hydrogen purchase.

The train referred to as Vittal-One, developed by Talgo, will serve as a basis for implementation of the hydrogen technology in the southwest of Iberia. The Hexagon Purus Company was chosen to provide the high-pressure cylinders for the prototype train.

Another example is the Mireo Plus H train, consisting of two passenger carriages. It will be powered by a battery and fuel cells that generate electric power from hydrogen and oxygen. The train will enable travelling at a distance of 600 kilometers (373 miles). Moreover, Siemens also declared developing a three-carriage version with a range of up to 1,000 kilometers (621 miles) [14].

There are still more than 10,000 diesel trains in service in Europe. Some of them are planned to be replaced within the next 15 years [20].

In 2010, the fuel cells and the devices designed for hydrogen production were used by several transport operators in a number of countries, such as China, Germany, Japan, Taiwan, the United Kingdom and the United States. Many of these technologies, suitable for use in the hydrail vehicles, may also be applied to other transport means, as e.g. road vehicles. This shall be conducive to more dynamic development of these technologies [13].

British Railways will endeavour to achieve zero CO<sub>2</sub> emission in rail transport by 2040. This goal should be facilitated by cooperation with the manufacturer of new hydrogen-fueled vehicles. They are to be put into operation from 2022 [19].

According to Jastrzębska Spółka Węglowa (JSW), there are already hundreds hydrogen stations all over the world, approximately 150 of which in Europe. However, there is not a single station in Poland so far, while the first ones are to be built by Grupa Lotos in Warsaw and Gdańsk by the end of 2021 within the framework of the already inaugurated Pure H2 project [15].

Figure 2 presents the architecture of a novel light hybrid vehicle provided with two motor carriages and a trailer. Each motor carriage is equipped with an electric traction motor powered by a hybrid power unit consisting of a hydrogen cell connected to the flywheel energy storage system, used when no driving force is needed or in order to recover the energy while braking [3].

nać 1.000 km. Tankowanie odbywa się na mobilnej stacji tankowania wodoru, która znajduje się tuż obok torów, a stacjonarna stacja tankowania zostanie uruchomiona w 2021 roku i wtedy też Alstom dostarczy kolejne czternaście pociągów Coradia iLint do niemieckiego urzędu kolejowego LNVG.

Pojawiły się też doniesienia, że Alstom wyprodukuje następnych 27 pociągów wodorowych dla operatora RMV, które będą poruszały się w regionie Ren-Men w ramach długofalowego projektu infrastrukturalnego, który ruszy w 2022 r.

Umowa na dostawę i utrzymanie pociągów z ogniwami opiewa na 500 mln € przez okres 25 lat. Za dostawę wodoru odpowiedzialna będzie firma Infraser GmbH & Co Höchst KG. W Höchst pod Frankfurt nad Menem ustawiona zostanie instalacja tankowania wodoru. Wsparcia udzieli rząd federalny Niemiec dofinansując budowę stacji i w 40% zakup wodoru.

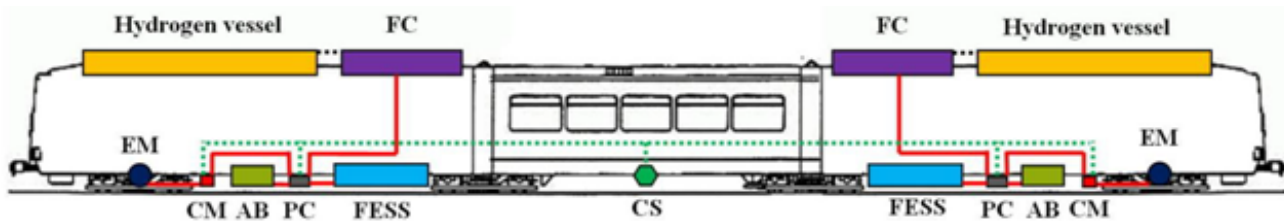
Pociąg opracowany przez producenta Talgo i nazwany Vittal-One posłuży jako plan wdrożenia technologii wodorowych na południowym zachodzie Iberii. Jako dostawca wysokociśnieniowych butli do prototypowego pociągu została wybrana firma Hexagon Purus. Kolejnym przykładem jest składający się z dwóch wagonów pociąg Mireo Plus H. Będzie on zasilany baterią i ogniwami paliwowymi, które zamieniają wodór i tlen w energię elektryczną. Pociąg będzie miał zasięg 600 kilometrów (373 mil), a ponadto Siemens zapowiedział również, że opracuje wersję trzywagonową o zasięgu do 1.000 kilometrów (621 mil) [14].

W całej Europie jeździ nadal ponad 10.000 pociągów z silnikiem wysokoprężnym i co do niektórych z nich są plany ich wymiany w ciągu najbliższych 15 lat [20].

W 2010 roku zarówno ogniwa paliwowe, jak i urządzenia do wytwarzania wodoru, zostały wykorzystane przez kilku operatorów transportowych w różnych krajach, takich jak Chiny, Niemcy, Japonia, Tajwan, Wielka Brytania i Stany Zjednoczone. Wiele z tych technologii, które można zastosować w pojazdach hydrail, będzie można zastosować również w innych środkach transportu, takich jak pojazdy drogowe, co przyczyni się do bardziej dynamicznego rozwoju tych technologii [13].

Koleje brytyjskie będą dążyły do osiągnięcia zerowej emisji CO<sub>2</sub> w transporcie szynowym w 2040 roku. Osiągnięcie tego celu ma ułatwić współpraca z producentem nowych pojazdów zasilanych paliwem wodorowym. Mają być one wprowadzane do eksploatacji od 2022 roku [19].

Według informacji Jastrzębskiej Spółki Węglowej (JSW) na świecie działa już kilkaset stacji wodorowych, z czego ok. 150 w Europie. W Polsce nie ma dotąd ani jednej stacji, a pierwsze w ramach zainaugurowanego projektu Pure H2 zamierza do końca 2021



Rys. 2. Konfiguracja systemu zasilania i sterowania pociągu

Fig. 2. Configuration of the power supply and train control system

Hydrogen vessel – zbiornik wodoru, FC – ogniwo paliwowe, FESS – system magazynowania energii koła zamachowego, PC – przekształtnik mocy, CM – przekształtnik silnika trakcyjnego, AB – bateria pomocnicza, EM – silnik elektryczny, CS – system sterow

— szyna mocy, - - - - - szyna komunikacyjna

FC – fuel cell, FESS – flywheel energy storage system, PC – power converter, CM – traction motor converter, AB – auxiliary battery, EM – electric motor, CS – control system, szyna mocy – power bus, szyna komunikacyjna – communication bus

The Coradia iLint trains from Alstom (Figure 3), provided with fuel cells, appeared on the tracks in Lower Saxony, Germany, already in September 2018, replacing the diesel trains being in use there before. The first line served by hydrogen-powered trains was nearly 100 km long and ran through Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde and Buxtehude.



Rys. 3. Pociąg Coradia iLint [23]  
Fig. 3. The Coradia iLint train [23]

The trains are refueled at a mobile hydrogen refueling station. The gaseous hydrogen will be pumped into the tanks from a steel container of the height exceeding 12 m, located beside the tracks at the Bremervörde station.

In Great Britain, Alstom, together with the local carrier Eversholt Rail, plans to adapt the 321 class trains to hydrogen propulsion, ensuring them a 1,000 km range and a maximum speed of 140 km/h. The first batch of modernized vehicles of this type is to be finalized and operational in early 2021. Another design of a fuel cell train is also presented by the British manufacturer Vivarail.

The French railway company SNCF postulates elimination of diesel-powered trains by 2035. SNCF, in the framework of this plan, intends to begin testing of the hydrogen fuel cell rail vehicles in 2021 and expects their full validation by 2022.

In the United States and Canada, the research devoted to hydrogen trains has been carried out for many years. The use of locomotives of this type was considered for example in shipyards for transport purposes. In 2009-2010 they were tested by BNSF – the local

postawić Grupa Lotos w Warszawie i Gdańsku [15]. Na rysunku 2 przedstawiono architekturę nowatorskiego lekkiego hybrydowego pojazdu z dwoma wagonami silnikowymi i wagonem doczepnym. W każdym wagonie silnikowym zabudowano elektryczny silnik trakcyjny zasilany z hybrydowej jednostki mocy składającej się z wodorowego ogniwa wodorowego połączonego z systemem magazynowania energii koła zamachowego, który jest wykorzystywany, gdy nie jest potrzebna siła napędu lub do odzyskania energii w fazie hamowania [3].

Pociągi Coradia iLint (rys. 3) firmy Alstom wyposażone w ogniwa paliwowe wyjechały na tory w niemieckiej Dolnej Saksonii już we wrześniu 2018 r. zastępując eksploatowane tam pociągi spalinowe. Pierwsza linia obsługiwana przez napędzane wodorem składy liczyła prawie 100 km i biegła przez Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde i Buxtehude.

Pociągi uzupełniają paliwo w mobilnej stacji tankowania wodoru. Gazowy wodór będzie wpompowywany do zbiorników ze stalowego kontenera o wysokości ponad 12 m, znajdującego się obok torów na stacji Bremervörde.

W Wielkiej Brytanii firma Alstom zamierza razem z miejscowym przewoźnikiem Eversholt Rail przystosować pociągi klasy 321 do napędu wodorowego, o zasięgu do 1.000 km i na maksymalną prędkość 140 km/godz. Pierwsza partia zmodernizowanych pojazdów tego typu ma być ukończona i gotowa do eksploatacji na początku 2021 r. Swój projekt pociągu na ogniwa paliwowe zaprezentował też brytyjski producent Vivarail.

Francuskie przedsiębiorstwo kolejowe SNCF zakłada wyeliminowanie do 2035 r. pociągów napędzanych silnikami diesla. W ramach tego planu SNCF planuje rozpocząć w 2021 r. testowanie pojazdów szynowych napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi i oczekuje, że do 2022 r. będą one w pełni sprawdzone.

W Stanach Zjednoczonych i w Kanadzie od wielu lat prowadzi się badania nad pociągami wodorowymi. Rozważano np. wykorzystanie lokomotyw tego typu do transportu w stocznjach. W latach 2009-2010 testował je lokalny przewoźnik BNSF w Los Angeles (rys. 4). Niedawno kontrakt na stworzenie pierwszego



carrier from Los Angeles (Fig. 4). The contract for the first passenger train in the USA powered by hydrogen was recently granted to the Stadler Company.



Rys. 4. Hybrydowa wodorowa lokomotywa, testowana w Los Angeles [23]

Fig. 4. A hybrid hydrogen-powered locomotive subjected to the tests in Los Angeles [23]

The contract involves possibility of launching four more vehicles. Hydrogen-powered Flirt H2 is to be put into operation in 2024 on a 14.5 km line between Redlands and Metrolink Station in San Bernardino, California, within the Redlands Passenger Railroad project.

According to the agreement, Stadler shall develop a hydrogen-powered train composed of two carriages on either side of the drive unit that contains fuel cells and hydrogen tanks. Such a trainset traveling at a maximum speed of up to 130 km/h shall carry a maximum of 108 passengers, providing additional space for standing persons. Hyundai Motor Group in South Korea is currently working on a fuel cell train, the first prototype of which was planned to be manufactured in 2020. The project assumes its range reaching 200 km between the refueling operations, at a speed of up to 70 km/h. Meanwhile, in Japan, the East Japan Railway Co has declared testing of new hydrogen-powered trains starting from 2021. The trains shall travel at maximum speed of 100 km/h and allow to run approximately 140 km with one hydrogen refueling [23].

Another examples of European multiple units provided with hydrogen propulsion are shown in the figures 5÷8 below.



Rys.7. Mireo Plus H firmy Siemens [5]  
Fig. 7. Mireo Plus H from Siemens [5]

pasażerskiego pociągu w USA napędzanego wodorem otrzymała firma Stadler.

Umowa przewiduje możliwość uruchomienia czterech kolejnych pojazdów. Zasilany wodorem Flirt H2 ma zostać uruchomiony w 2024 r. na linii o długości 14,5 km między Redlands a stacją Metrolink w San Bernardino w Kalifornii, jako element projektu kolei pasażerskiej Redlands.

Zgodnie z umową Stadler opracuje pociąg napędzany wodorem, który będzie składał się z dwóch wagonów po obu stronach zespołu napędowego, mieszczącego ogniwa paliwowe i zbiorniki wodoru. Przewiduje się, że taki skład przewiezie maksymalnie 108 pasażerów, zapewniając też dodatkową przestrzeń dla podróżnych stojących i będzie przemieszczał się z maksymalną prędkością do 130 km/godz.

W Korei Południowej Hyundai Motor Group opracowuje obecnie pociąg z ogniwami paliwowymi, którego pierwszy prototyp miał być wyprodukowany w 2020 r. Plany zakładają, że będzie on w stanie przejechać 200 km między tankowaniem paliwem, z prędkością do 70 km/godz. Z kolei w Japonii firma East Japan Railway Co ogłosiła plan testowania nowych składów napędzanych wodorem od 2021 r. Pociągi zapewnią maksymalną prędkość 100 km/godz. i oczekuje się, że będzie pokonywał ok. 140 km na jednym tankowaniu wodoru [23].

Inne przykłady europejskich zespołów trakcyjnych napędzanych wodorem przedstawiono na poniższych rysunkach 5÷8.



Rys. 5. Pociąg napędzany wodorem stoi 1.02.2019 przed pierwszą jazdą między Lipskiem a Grimma [1]

Fig. 5. The hydrogen-powered train standing in the station before its first travel from Leipzig to Grimma on 01/02/2019 [1]



Rys. 6. Debiut pociągu pasażerskiego Coradia iLint Alstom napędzanego wodorem na Targach InnoTrans 2016 [4]

Fig. 6. Debut of the hydrogen-powered Coradia iLint Alstom passenger train at InnoTrans 2016



Rys. 8. Pierwszy hiszpański pociąg wodorowy w technologii Hexagon Purus [6]

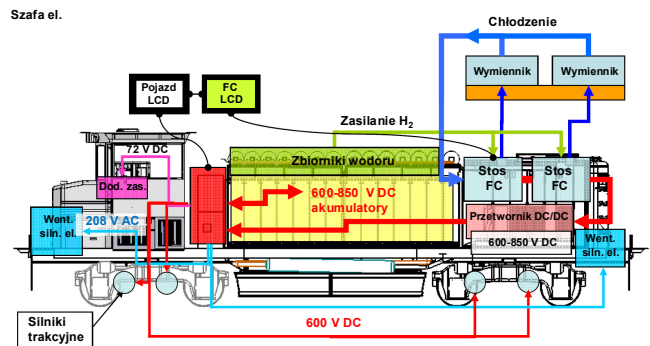
Fig. 8. The first Spanish hydrogen train designed with the Hexagon Purus technology

The American project of a locomotive (Fig. 9) provided with fuel cells was presented by Vehicle Projects LCC. The 127-ton locomotive was furnished with low-temperature PEM-type fuel cells (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) with available capacity of 250 kW. The total locomotive power, considering the batteries, amounts to 1 MW [17].

The fuel cell stack (Ballard Power System - Mk902) provides a voltage of 600 V. The cells are supplied with hydrogen (pressurized up to 1.2 MPa) from two 70 kg cylinders, where hydrogen is stored at a pressure of 35 MPa. This allows for 8-10 hours operation of the locomotive. Despite high values of momentary power (600–1000 kW) that occur during a typical locomotive load test, the average power amounts only to 40÷100 kW. This is due to long working periods under no-load condition, thus increasing possible use of the fuel cells in such rail vehicles.

Proposal of a propulsion system of the Light Hybrid Electric Train is shown below in Fig. 10.

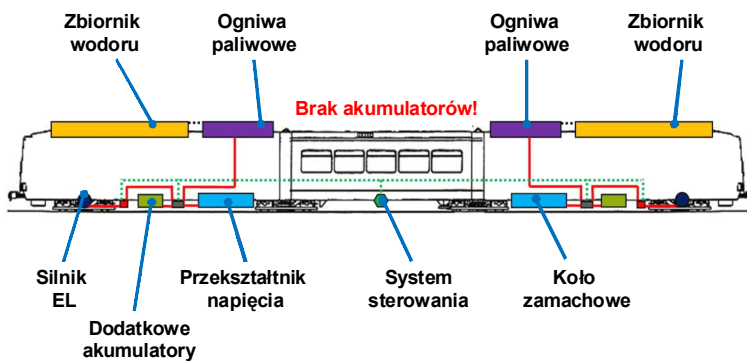
Amerykański projekt lokomotywy (rys. 9) wyposażonej w ogniwa paliwowe zaprezentowany został przez Vehicle Projects LCC. Lokomotywę o masie 127 ton wyposażono w niskotemperaturowe ogniwa paliwowe typu PEM (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) o mocy 250 kW. Moc całkowita lokomotywy, przy uwzględnieniu akumulatorów wynosi 1 MW [17]. Stos ogniw paliwowych (*Ballard Power System – Mk902*) generuje napięcie 600 V przy zasilaniu wodorem (do 1,2 MPa) z dwóch butli 70 kg, w których wodór jest przechowywany przy ciśnieniu 35 MPa. Pozwala to na eksploatację lokomotywy w czasie 8÷10 h. Mimo dużych wartości mocy chwilowych (600÷1000 kW) w typowym teście obciążenia lokomotywy moc średnia wynosi tylko 40÷100 kW. Wynika to z długich czasów pracy układu bez obciążenia, co zwiększa możliwości wykorzystania ogniw paliwowych w takich pojazdach szynowych.



Rys. 9. Lokomotywa spółki Vehicle Projects LCC wyposażona w ogniwa paliwowe

Fig. 9. A locomotive from Vehicle Projects LCC furnished with fuel cells

Propozycję systemu napędowego lekkiego pojazdu szynowego (*Light Hybrid Electric Train*) przedstawiono poniżej na rys. 10.



**Koło zamachowe:**

- podłączone do ogniwa paliwowego
- stanowi akumulator energii dla ogniwa
- używane podczas hamowania regeneracyjnego

	Hydrogen container	Fuel cells	<b>Without batteries!</b>	Fuel cells	Hydrogen container	<b>Flywheel:</b>
Electric motor	Additional batteries	Voltage converter	Control system	flywheel		<ul style="list-style-type: none"> <li>• connected to the fuel cell</li> <li>• is a power accumulator of the cell</li> <li>• used while regenerative braking</li> </ul>

Rys. 10. Elementy wyposażenia lekkiego pojazdu szynowego z hybrydowym układem napędowym

Fig. 10. The equipment parts of a light rail vehicle provided with a hybrid drive system

The hydrogen-powered fuel cells were used in it, using no electrochemical batteries. The use of flywheels in a hybrid system was found to be sufficient to accumulate the kinetic energy. Flywheels (8 pcs.) store energy while braking, allowing its reuse for acceleration of the rail vehicle.

The vehicle is composed of two rail motor coaches and a 73-ton trailer. Output power of the trainset amounts to 400 kW, while its maximum torque is equal to 1,600 Nm. The system of mechanical energy storage contains the 27-kg flywheels the rotational speed of which varies from 15,000 to 60,000 rpm. Each of these systems, storing the energy of 6.66 MJ, offers a power of 67.5 kW. Each of the two fuel cells stacks has a power of 110 kW [18].

The hydrogen-powered traction is already used also in trams. Widespread implementation of this technology shall enable opening new planned tram lines, without overhead contact line on many sections. This might be important in many cities, resulting not only in better air quality, but also avoiding the overhead traction that disturbs architectural look of historic parts of the cities in large agglomerations.

In China a hybrid tram has been presented already in 2015. It was designed by the China South Rail Corp (CSR) – a rolling stock manufacturer. A year later another Chinese electric and hydrogen hybrid tram left the assembly line at Tangshan Railway Vehicle Co Ltd (TRC) in Hebei, China's northern province. The work, carried out in TRC Company (with state capital) and Southwest Jiaotong University, took four years. It is a fully "green" tram, emitting no exhaust fumes, but only water, discharged at the terminal stop. The tram carries 336 passengers. The hydrogen cells allow to travel at the distance of 40 km with maximum speed of 70 km/h. It is powered by the energy of hydrogen cells (as supercapacitors), therefore, the tram needs no overhead contact line [12].

Wykorzystano ogniwa paliwowe zasilane wodorem, jednak bez użycia akumulatorów elektrochemicznych. Stwierdzono, że zastosowanie kół zamachowych w układzie hybrydowym będzie wystarczającym kinetycznym układem akumulacji energii. Koła zamachowe (8 szt.) gromadzą energię podczas hamowania oraz pozwalają na jej wykorzystanie podczas przyspieszania pojazdu szynowego.

Pojazd tworzą dwa wagony napędne i wagon doczepny o masie 73 t. Moc układu wynosi 400 kW, a maksymalny moment obrotowy 1.600 Nm. Układ mechanicznego gromadzenia energii stanowią koła zamachowe o masie 27 kg, których zakres prędkości obrotowej wynosi 15 ÷ 60 tys. obr/min). Moc każdego układu wynosi 67,5 kW, przy zgromadzonej energii 6,66 MJ. Każdy z dwóch stosów ogniw paliwowych ma moc 110 kW [18].

Napędy trakcyjne zasilane wodorem są już także stosowane w tramwajach. Powszechne wdrożenie tej technologii umożliwi uruchamianie nowych planowanych linii tramwajowych z odcinkami bez sieci trakcyjnej. Może mieć to istotne znaczenie w wielu miastach, nie tylko z powodu lepszej jakości powietrza, ale także dlatego, że napowietrzne sieci trakcyjne zakłócałyby wystrój architektoniczny zabytkowych części miast w dużych aglomeracjach.

Chiny już w 2015 roku przedstawiły tramwaj z napędem hybrydowym. Skonstruował go producent kolejowy China South Rail Corp (CSR). Kolejny chiński tramwaj z napędem hybrydowym (elektrycznym i wodorowym) zjechał rok później z linii montażowej zakładów Tangshan Railway Vehicle Co Ltd (TRC) w Hebei w północnej prowincji Chin. Prace nad tą konstrukcją zajęły spółce TRC (z kapitałem państwowym) oraz Southwest Jiaotong University cztery lata. Jest to w pełni „zielony” tramwaj, bowiem nie emituje żadnych spalin, a jedynie wodę, odprowadzaną na przystanku końcowym.

Tramwaj może przewozić 336 pasażerów. Ogniwa wodorowe zapewniają przejazd na dystansie 40 km z maksymalną prędkością 70 km/h. Zasilany jest energią z ogniw wodorowych (jako superkondensatorów), zatem tramwaj nie musi korzystać z napowietrznej linii zasilającej [12].

## 5. Bibliography / Bibliografia

- [1] *Are hydrogen-powered trains the future?* <https://www.independent.co.uk/news/science/hydrogen-powered-trains-transport-future-transport-diesel-cost-uk-a8786306.html>
- [2] *Biowódór może zwiększyć udział OZE w transporcie.* <https://wysokienapiecie.pl/15922-biowodor-moze-zwiekszyc-udzial-oze-w-transporcie/>
- [3] *D'Ovidio G., Carpenito A., Masciovecchio C., Ometto A.: Preliminary analysis on advanced technologies for hydrogen light-rail train application in sub-urban non electrified routes. National Scientific Seminar SIDT. Politecnico Di Bari. 14-15.09.2017. University of L'Aquila ITALY*
- [4] *Droga droga do samochodów wodorowych w Polsce. 4.03.2019.* <https://wysokienapiecie.pl/17436-samochody-wodorowe-w-polsce-ceny-tankowanie/>
- [5] *Durzyński Z., Orczyk M.: Tram-train elementem proekologicznego systemu transportu zbiorowego w aglomeracji poznańskiej. Pojazdy Szynowe nr 4/2019*
- [6] *Durzyński Z.: Stan obecny i perspektywy nieelektryfikowanego transportu kolejowego w Polsce. Pojazdy Szynowe nr 1/2020*

- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych - 2014/94/UE
- [8] [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport\\_pl](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_pl)
- [9] [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pl/fs\\_19\\_6726](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pl/fs_19_6726)
- [10] <https://elektrosystemy.pl/?p=31955>
- [11] <https://www.nakolei.pl/wielkopolska-zainteresowana-kupnem-pociagow-wodorowych-i-hybrydowych/>
- [12] <https://www.wnp.pl/logistyka/chinczycy-prezentuja-drugi-tramwaj-z-napedem-wodorowym,272461.html>
- [13] Hydrail. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrail>
- [14] Hydrogen-powered trains could replace diesel engines in Germany. <https://edition.cnn.com/2020/11/23/business/hydrogen-train-siemens/index.html>
- [15] JSW chce być czołowym producentem wodoru. 10.12.2018. <https://niezalezna.pl/249644-jsw-chce-byc-czolowym-producentem-wodoru>
- [16] Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności. Projekt. Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej. Warszawa, kwiecień 2021 r.
- [17] Orczyk M. i inni: Circumstances of Railway Transport Hydrogenization in Poland. SAE Technical Paper 2020-01-2131, 2020, doi:10.4271/2020-01-2131
- [18] Pielecha i inni: Ultrakondensatory i ogniwa paliwowe w układach napędowych pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe nr 2/2019
- [19] Radomski M.: Pociągi wodorowe na polskich torach? To możliwe już w 2022 roku, ale do rozwiązania jest kilka problemów. Fleetguru. 12.09.2018
- [20] Spain's first hydrogen train to feature Hexagon Purus technology. <https://www.h2-view.com/story/spains-first-hydrogen-train-to-feature-hexagon-purus-technology/>
- [21] Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.). Warszawa 2017
- [22] Uchwała nr 110/2019 Rady Ministrów z dnia 17 września 2019 r. zmieniająca Uchwałę w sprawie ustanowienia Krajowego Programu Kolejowego do 2023 roku
- [23] Usidus. M.: Wsiąść do pociągu... wodorowego. <https://mlodytechnik.pl/technika/30054-wsiasc-do-pociagu-wodorowego>
- [24] Wodór – samorzady potrzebują systemowego wsparcia finansowego i nowego modelu współpracy. <https://www.rynekinfrastruktury.pl/mobile/wodor--samorzady-potrzebuj-systemowego-wsparcia-finansowego-i-nowego-modelu-wspolpracy-74524.html>
- [25] Wodór jako paliwo konwencjonalne. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Wod%C3%B3r\\_jako\\_paliwo\\_konwencjonalne](https://pl.wikipedia.org/wiki/Wod%C3%B3r_jako_paliwo_konwencjonalne)
- [26] Wodór, prąd, biopaliwa. Dekarbonizacja transportu będzie kosztowna. <https://wysokienapiecie.pl/19529-wodor-prad-biopaliwa-dekarbonizacja-transportu-bedzie-kosztowna/>
- [27] Woźniak. A.: Transport zamierza tankować wodór. 15.10.2020. <https://energia.rp.pl/nowa-energia/elektromobilnosc/24738-transport-zamierza-tankowac-wodor>