

Dagmara Uhl, UAVS Poland sp. z o.o.

Tomasz Siwek, UAVS Poland sp. z o.o., Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Wojciech Kalawa, Magdalena Dudek, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

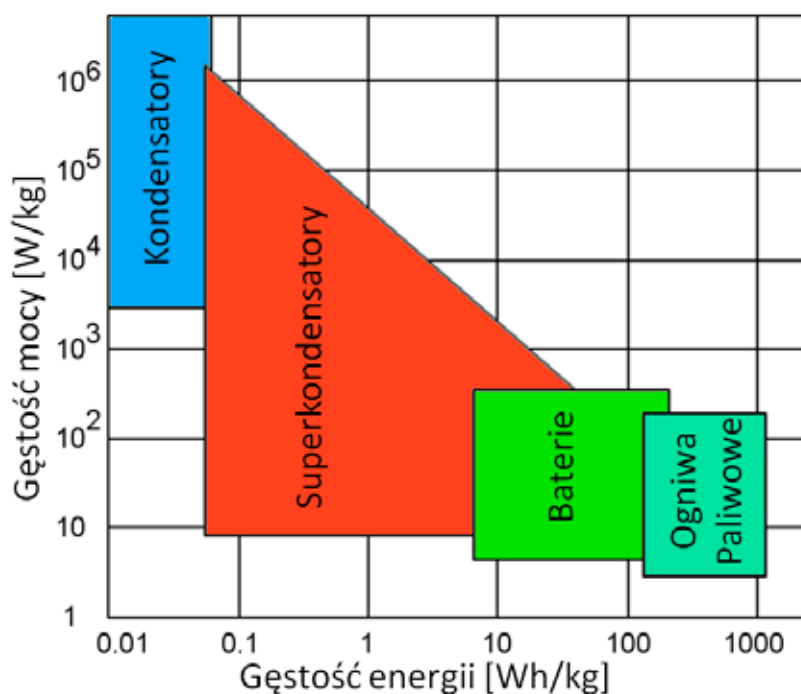
Pierwsza polska mobilna stacja tankowania wodoru

W artykule przedstawiono pierwszą w Polsce mobilną stację tankowania wodoru, będącą propozycją rozwiązania problemu braku infrastruktury tankowania wodoru w Polsce. W oparciu o analizę stanu techniki i aktualnych potrzeb w zakresie rozwoju elektromobilności, podjęto próbę zbudowania innowacyjnej instalacji. Opisano koncepcję konstrukcji stacji, zasadę działania stacji, wyniki testów oraz osiągnięte parametry pracy. Przedstawiono proces tankowania wodoru i obsługi stacji.

Nieustanny rozwój gospodarczy społeczeństw pociąga za sobą coraz większą konsumpcję energii pierwot-

nej, a produkcja energii elektrycznej na mieszkańca stała się jednym ze wskaźników postępu gospodarczego

kraju. Z drugiej strony, świadomość ekologiczna i ekonomiczna wymusza redukcję energochłonnych procesów, bądź ich optymalizację w celu racjonalizacji wykorzystania źródeł energii i ograniczenia ich wpływu na środowisko. Szczególnie ważną, a jednocześnie niezwykle „wrażliwą” gałęzią gospodarki zarówno w aspekcie ekologiczno-energetycznym, jak i społecznym jest transport. Naturalną konsekwencją rozwoju gospodarczego jest wzrost liczby samochodów, szczególnie widoczne jest to w dużych aglomeracjach miejskich. Koncentracja środków transportu na stosunkowo małym obszarze powoduje wzrost niskiej emisji, która sumarycznie prowadzi do nawet kilkusetkrotnych przekroczeń norm substancji niepożądanych w powietrzu. Strefy emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych silnie korespondują z przemysłowo-usługowymi obszarami miast, o wzmożonej obecności ludzi. Zawieszone pyły i zanieczyszczenia gazowe negatywnie wpływają na zdrowie osób przebywających w tych strefach.



Rys. 1. Zależność gęstości mocy od gęstości energii - porównanie wybranych źródeł energii elektrycznej [2]

Jednym ze sposobów ograniczenia emisji zanieczyszczeń pochodzenia mobilnego jest eliminowanie z ruchu samochodów o niskich parametrach ekologicznych i zastępowanie ich jednostkami spełniającymi wyższe normy. W przypadku samochodów z silnikami spalinowymi działanie to prowadzi do skomplikowania ich budowy, poprzez dopo-

sażanie w systemy proekologiczne, takie jak: instalacje recyrkulacji spalin, katalizatory i filtry spalin oraz zastosowanie rozwiązań hybrydowych. Obecnie promowaną alternatywą dla skomplikowanych napędów spalinowych lub hybrydowych są napędy elektryczne. Zarówno samochody spalinowe, jak i elektryczne posiadają liczne wady. Pierwsza grupa sa-

mochodów cechuje się stosunkowo niską niezawodnością, ze względu na złożoną konstrukcję. Druga - niskim zasięgiem i dużymi kosztami wymiany baterii. Jedną z alternatyw nie posiadających wymienionych wyżej wad, są samochody elektryczne oparte o ogniwa wodorowe. Stosowane w napędach samochodowych stopy ogniwa wodorowo-tlenowych niskotemperaturowych z protonowo wymienną membraną PEMFC (ang. *Polymer Exchange Membrane Fuel Cell*), charakteryzują się wysoką sprawnością konwersji energii (powyżej 50%) oraz zerową emisją zanieczyszczeń (produktem reakcji jest czysta chemicznie woda) [1]. Wymagają jednak zastosowania wodoru piątej klasy czystości. Ze względu na dużą gęstość magazynowania energii w wodorze, wyższą niż w przypadku klasycznych baterii litowo-jonowych, co schematycznie pokazano na rys. 1. Samochody wykorzystujące ogniwa paliwowe z sukcesem konkurują, co do zasięgu na jednym tankowaniu, z samochodami o napędach spalinowych. Pewnym ograniczeniem w ich powszechnym zastosowaniu jest brak infrastruktury tankowania wodoru.

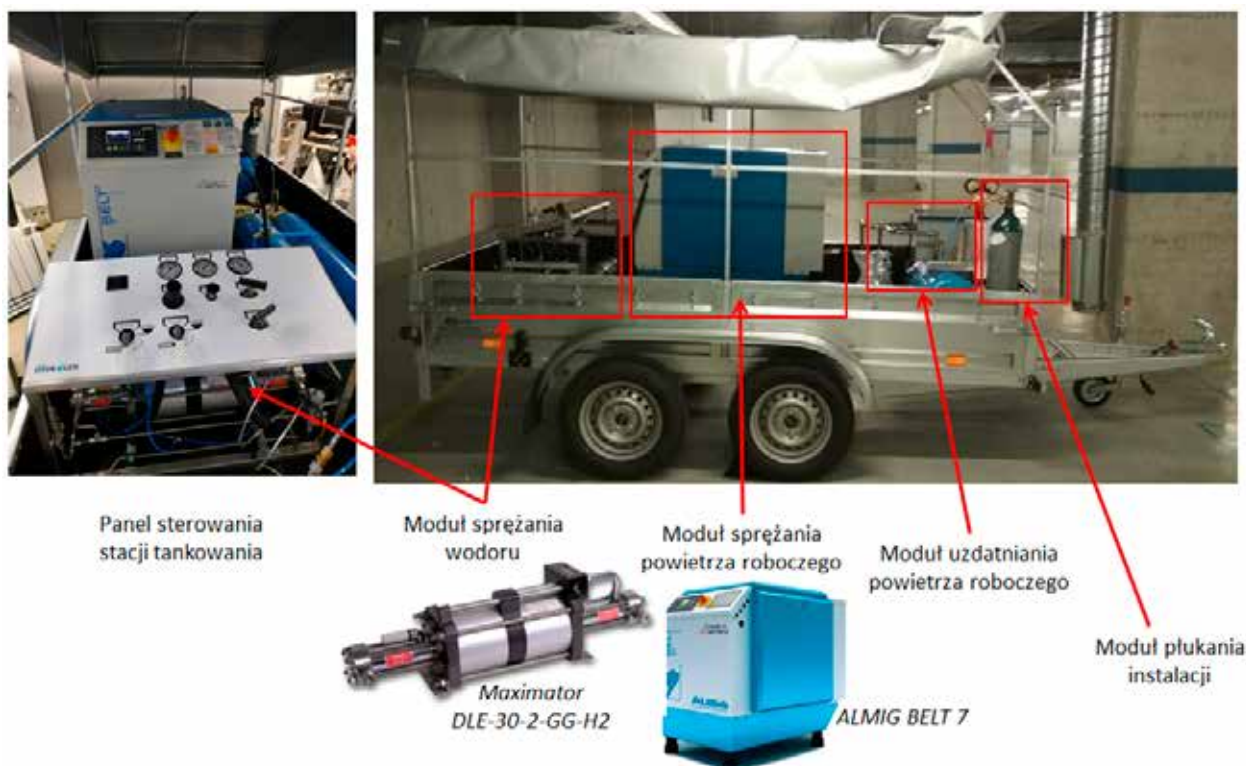
Autorzy niniejszego artykułu od wielu lat prowadzą badania nad zastosowaniem wodoru dla celów energetycznych [5, 6, 7].



Rys. 2. Rozmieszczenie stacji ładowania wodorem w Europie [4]

Producent	Nazwa modelu	Maksymalne ciśnienie wyjściowe	Wydajność H2
Resato	FOS - H2Refuel Fleet Owner Station	350bar/700bar	4kg/h
Nel Hydrogen	H2Station®	350bar/700bar	120kg/h (do 350bar)
Pure Energy Centre	Hydrogen fueling station	350bar/700bar	20kg/h
Hydrogenics	HySTAT™	350bar/700bar	≈40kg/h

Tab. 1. Przegląd stacjonarnych systemów stacji ładowania pojazdów



Rys. 3. Mobilna stacja ładowania butli wodorem konstrukcji firmy UAVS Poland

■ Stan infrastruktury wodorowej w Europie

Realizacja transportu w oparciu o technologię wodorową wydaje się pewnym rozwiązaniem dla obniżenia niskiej emisji. Niestety technologia ta ma ogromną barierę w postaci braku infrastruktury dystrybucji wodoru dla e-mobility. W całej Europie jest około 82 stacje tankowania wodoru, co w porównaniu z gęstością stacji tankowania klasycznego paliwa jest liczbą bardzo małą. W Polsce na obecną chwilę nie ma żadnej stacji tankowania wodoru [3]. Rozkład geograficzny stacji tankowania wodoru w Europie przedstawiono na rys. 2.

Istniejące stacje tankowania bazują na gotowych stacjonarnych systemach sprężania wodoru, dostarczanych przez kilku wiodących producentów. Przegląd i porównanie parametrów najczęstszych konstrukcji przedstawiono w tab. 1.

Na terenie Polski obecnie z powodu braku stacji tankowania wodoru nie jest możliwe korzystanie z transportu wodorowego. Co więcej, w znaczący sposób ograniczona jest promocja wykorzystania wodoru w e-mobility, gdyż tankowanie jednostek pokazowych do ciśnienia roboczego rzędu 350 lub 700 bar jest możliwe tylko zagranicą (najbliższa stacja tankowania wodoru jest w Berlinie). Z problemem braku infrastruktury tankowania wodoru w Polsce zmierzyła się firma UAVS Poland podczas realizacji projektu POIR.01.01.01-00-0682/17 „Zwiększenie czasu lotu bezzałogowego aparatu latającego (UAV) poprzez zastosowanie hybrydowego źródła energii”. W związku z zastosowaniem ogniwa paliwowego jako źródła energii elektrycznej w proponowanym rozwiązaniu, firma opracowała własną konstrukcję innowacyjnej mobilnej stacji tankowania wodoru.

Konstrukcja stacji jest autorskim rozwiązaniem firmy.

■ Konstrukcja i parametry

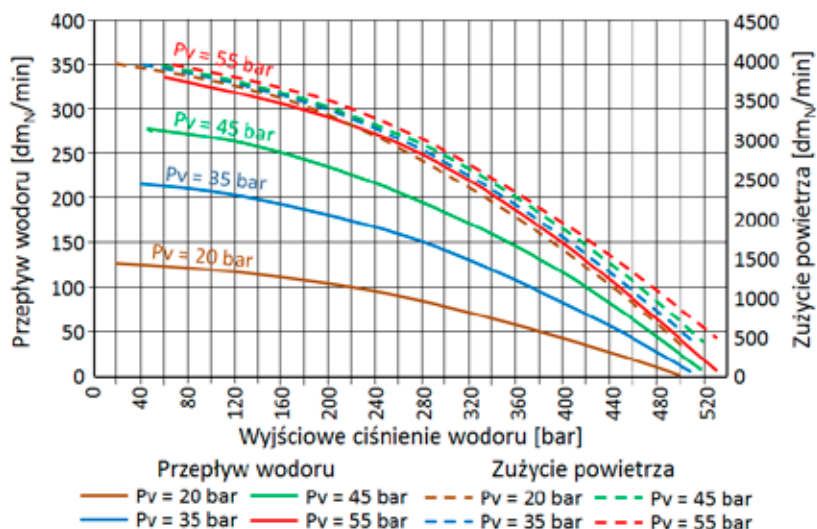
Stacja została zaprojektowana i zbudowana jako mobilna platforma umożliwiająca przemieszczanie za samochodem prowadzonym przez kierowcę z prawo jazdy kategorii B, bowiem jej masa całkowita nie przekracza 750 kg. Stacja umożliwia ładowanie docelowych mobilnych dedykowanych zbiorników wodorem do ciśnienia 450 bar. Zbudowana instalacja składa się z czterech zintegrowanych ze sobą podstawowych modułów (rys. 3):

1. modułu wodorowego - zapewniającego przetłoczenie wodoru z transportowego magazynu wodoru do butli przy jednoczesnym podniesieniu jego ciśnienia,
2. modułu sprężania powietrza roboczego - zapewniającego wytwo-

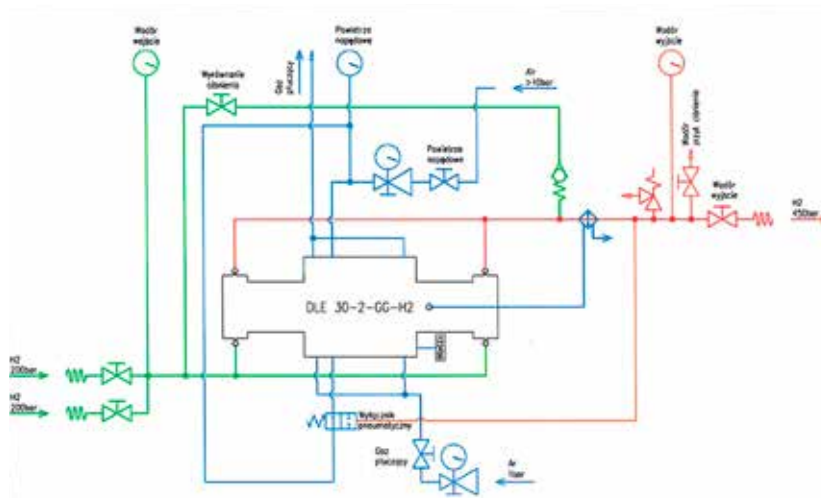
- rzenie sprężonego powietrza na potrzeby napędu modułu wodowego - boostera wodoru,
- 3. modułu uzdatnia powietrza roboczego,
- 4. modułu płukania instalacji.

Ze względu na przeznaczenie instalacji kluczowym jej układem jest moduł sprężania wodoru, którego podstawowym elementem jest booster, czyli bezolejowy wzmacniacz ciśnienia gazu wstępnie sprężonego do ciśnienia dedykowanego w instalacji lub w zbiornikach na tłoczeniu maszyny. Booster to maszyna tłokowa działająca w oparciu o przełożenie ciśnień proporcjonalne do powierzchni tłoków. Z jednej strony działamy na dużą powierzchnię tłoka czynnikiem napędowym (roboczym, w przypadku prezentowanej konstrukcji sprężonym powietrzem). Z drugiej strony - mała powierzchnia tłoka działa na czynnik sprężany, tj. wodór. W pilotażowej instalacji zastosowano booster DLE-30-2-GG-H2 firmy Maximator o stopniu sprężania 1:20 i stopniu przełożenia 1:60. Szczegółowe charakterystyki pracy boostera przedstawiono na rys. 4.

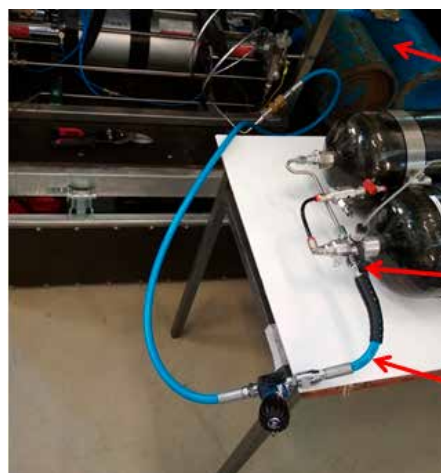
Przytoczona charakterystyka pracy boostera jest jednocześnie charakterystyką pracy stacji napełniania wodorem. Na jej podstawie jesteśmy w stanie określić strumień sprężonego wodoru (Outlet Flow) przy danym minimalnym ciśnieniu wejściowym P_v i ciśnieniu docelowym po sprężaniu (Outlet Pressure). Jednocześnie dla danego punktu pracy stacji na podstawie prezentowanej charakterystyki można ocenić strumień powietrza roboczego koniecznego do napędu boostera. Zastosowanie boostera jako sprężarki wodoru jest rozwiązaniem optymalnym ze względu na kilka czynników. Po pierwsze, gwarantuje bezpieczeństwo użytkownika poprzez



Rys. 4. Charakterystyka pracy boostera DLE-30-2-GG-H2 firmy Maximator [6]



Rys. 5. Schemat modułu wodorowego



Butle transportowe
2x 50 litrów 200bar

Szybkozłącze

Przewód do tankowania
wodoru z zaworem
i odpowietrznikiem

Rys. 6. Tankowanie butli wodorem ze stacji



Rys. 7. Panel sterowania pracą stacji tankowania wodoru

galwaniczną izolację części wodorowej od pozostałych urządzeń, gdyż napęd i sterowanie boostera oparte jest tylko i wyłącznie na rozwiązaniach pneumatycznych. Po drugie, urządzenie jest bezolejowe co pozwala zachować wysoką klasę czystości wodoru (minimum 5 klasę - 99,999%) wymaganą do zasilania ogniw paliwowych typu PEMFC. Po trzecie, prosta budowa gwarantuje wysoką niezawodność urządzenia i długi okres jego bezobsługowej eksploatacji. Booster zintegrowano z pozostałymi podzespołami stacji roboczej zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 5.

Ciśnienie wyjściowe wodoru po sprężaniu wynika bezpośrednio z ciśnienia powietrza roboczego i stałego przełożenia boostera. Operator stacji jest więc w stanie poprzez reduktor ciśnienia roboczego na zasilaniu boostera kontrolować pracę stacji napełniania i dostosować maksymalne ciśnienie wodoru na wyjściu do parametrów zastosowanych zbiorników w jednostce mobilnej. Możliwość kontroli ciśnienia powietrza roboczego na

wejściu do boostera jest więc pierwszym poziomem zabezpieczenia instalacji i tankowanej jednostki przed nadmiernym ciśnieniem wodoru. Ze względu na podniesienie bezpieczeństwa użytkownika stację dodatkowo wyposażono w wyłącznik pneumatyczny boostera, który mechanicznie ustawiamy na daną wartość ciśnienia progowego wodoru. Po przekroczeniu zadanego ciśnienia odcięte zostaje powietrze napędowe i stacja przestaje sprężać wodór. Trzeci i ostatni poziom zabezpieczenia przed przeciążeniem mechanicznym stanowi zawór bezpieczeństwa zamontowany w linii wyjściowej wodoru z boostera. Zamontowany w stacji zawór umożliwia zadanie ciśnienia zadziałania, którego wartość determinowana jest wytrzymałością tankowanych zbiorników wodoru. Podczas użytkowania stacji niezbędne jest więc prawidłowe skonfigurowanie systemu bezpieczeństwa, tak aby progi ciśnień ustawić w odpowiedniej kolejności według zalecanych poziomów zabezpieczeń.

Celem przyspieszenia tankowania i optymalizacji zużycia energii na ten proces moduł wodorowy umożliwia przetwarzanie gazu bezpośrednio z magazynu wodoru do zbiorników docelowych za pomocą bajpasu, aż do wyrównania ciśnień. Proces ładowania przez bajpas kontrolowany jest zaworem wyrównania ciśnień co pokazano schematycznie na rys. 5.

Napęd boostera realizowany jest przez sprężone powietrze robocze, które wytwarzane jest w module sprężania powietrza roboczego. Moduł ten oparto o wysokiej klasy sprężarkę śrubową chłodzoną cieczą BELT 7-8 firmy Almig. Sprężarka współpracuje z zbiornikiem buforowym o pojemności 20 litrów stabilizującym ciśnienie na poziomie 8 bar w instalacji zasilającej booster (przed reduktorem).

Po procesie sprężania, powietrze robocze jest oczyszczane i osuszane w module uzdatniania powietrza roboczego. Usunięcie zanieczyszczeń i wilgoci gwarantuje niezawodną pracę boostera oraz utrzymanie sprę-



Modułowa budowa stacji gwarantuje możliwość jej łatwej konfiguracji pod indywidualne potrzeby klienta, a montaż na platformie mobilnej dopuszczonej do ruchu drogowego zapewnia nieorganiczny zasięg jej wykorzystania

zanego wodoru w wysokiej klasie czystości. Szczególnie ważne jest całkowite wyeliminowanie węglowodorów (głównie chodzi o usunięcie CO) z instalacji sprężania wodoru, gdyż prowadzą one do zniszczenia katalizatora w ogniwie PEMFC, a w konsekwencji awarii ogniwa. Powietrze robocze po rozprężeniu w boosterze obniża swoją temperaturę, dodatkowo jego strumień jest około 10-krotnie większy od strumienia wodoru, dlatego powietrze wykorzystano jako czynnik chłodzący wodór po procesie sprężania. Umieszczenie chłodnicy wodoru pokazano na rys. 5.

Ostatnim modułem proponowanego rozwiązania jest system płukania stacji. Moduł ten gwarantuje bezpieczeństwo transportu stacji po procesie sprężania wodoru. Gazem płuczącym jest chemicznie obojętny gaz - argon, który przepływa przez instalację wypierając z niej wodór i powietrze. Przepływ argonu indukowany jest poprzez jego rozprężanie z wymiennej butli montowanej w stacji tankowania, co widoczne jest na rys. 3.

■ Proces tankowania wodoru

W założeniach projektu dla prezentowanej w niniejszym artykule konstrukcji stacji było osiągnięcie maksymalnej jej mobilności. Stacja stanowi bowiem źródło wodoru do tankowania ultralekkich zbiorników dedykowanych do zasilania bezzałogowego aparatu latającego UAV.

Operator UAV może zabrać stację w dowolne miejsce odbywania lotów i realizować tankowania wodoru w terenie podczas wykonywania misji. W aktualnej konfiguracji stacja umożliwia podpięcie poprzez dedykowane porty dwóch butli stalowych o pojemności 50 litrów każda, pod standardowym ciśnieniem magazynowania wodoru, tj. 200 bar (rys. 6). Stacja wyposażona jest w łoża umożliwiające bezpieczny transport podłączonych butli wodorowych. Stacja umożliwia przekonfigurowanie źródła zasilania w wodór, np. na wiązkę butli, bądź dedykowany trailer.

Podłączenie stacji do tankowanych zbiorników odbywa się przez elastyczny przewód zakończony hermetycznym szybkozłączem. W pierwszej fazie tankowanie odbywa się przez bajpas, aż do wyrównania ciśnienia pomiędzy zbiornikami. W fazie drugiej uruchamiany jest booster wodoru. Po osiągnięciu ciśnienia dedykowanego w tankowanych butlach, stacja automatycznie kończy proces tankowania poprzez odłączenie powietrza roboczego.

W trakcie tankowania operator monitoruje parametry pracy urządzenia na panelu kontrolnym. Dysponuje danymi o aktualnych wartościach ciśnienia powietrza napędowego, ciśnienia wodoru wejściowego (w zbiornikach źródłowych) oraz ciśnienia wodoru wyjściowego. Panel operatorski pokazano na rys. 7.

Do zasilania stacji wymagane jest przyłącze elektryczne trójfazowe o zabezpieczeniu prądowym 32 A.

■ Wnioski

Firma UAVS Poland zbudowała pierwszą w Polsce innowacyjną stację tankowania wodoru. Opracowana instalacja jest realną alternatywą dla rozwiązań stacjonarnych. Modułowa budowa stacji gwarantuje możliwość jej łatwej konfiguracji pod indywidualne potrzeby klienta, a montaż na platformie mobilnej dopuszczonej do ruchu drogowego zapewnia nieorganiczny zasięg jej wykorzystania. Zbudowana stacja jest ważnym krokiem w kierunku wdrażania e-mobilności na terenie Polski, eliminuje bowiem ograniczenia związane z brakiem infrastruktury technicznej związanej z tankowaniem wodoru do ciśnienia powyżej 200 bar.

■ Podziękowanie

Opisana konstrukcja stacji tankowania wodoru powstała dzięki wsparciu NCBiR w ramach projektu PO-IR.01.01.01-00-0682/17.

Literatura

- [1] Raźniak A., Dudek M., Siwek T., Dudek P., Kalawa W., *Determination of Electrical and Efficiency Parameters of Air Cooling of Low-Temperature PEM Fuel Cell Stack with Power of 5kW, Przegląd Elektrotechniczny*, Nr. 4., 140-147 (2018).
- [2] Kotz, M., Carlen, *Principles and applications of electrochemical capacitors. Electrochim Acta* 45, 2483-2498 (2000).
- [3] <https://autokult.pl/26711,do-2030-roku-powstanie-siec-stacji-wodorowych-w-polsce> (dostęp online 07.11.2018).
- [4] <https://www.tuev-sued.de> (dostęp online 07.11.2018).
- [5] Katalog produktów firmy MAXIMATOR www.maximator.de (dostęp online 07.11.2018).
- [6] Uhl T., Kaliski M., Sękiewicz Ł.: *Zastosowanie ogniw paliwowych do wytwarzania energii w gospodarstwach domowych, Świat Nieruchomości*, nr 59-60, 43-47 (2007).

