

Perspektywy zastosowania technologii wodorowych w lotnictwie komunikacyjnym

Prospects for the use of hydrogen technologies in commercial civil aviation



Jacek Nowicki

Dr inż.

Sekretarz Generalny
Stowarzyszenia Elektryków
Polskich

Streszczenie: Zastosowanie technologii wodorowych stanowi najskuteczniejszą drogę dla dekarbonizacji transportu dalekiego zasięgu – w tym lotnictwa komunikacyjnego. Dwa wiodące rozwiązania techniczne wprowadzające wodór do napędów cywilnych samolotów komunikacyjnych to ogniwa paliwowe z silnikami elektrycznymi dla napędu śmigłowego oraz silniki turbośmigłowe lub turbowentylatorowe na paliwo wodorowe. Kilkanaście firm i ośrodków badawczych na całym świecie prowadzi prace służące wprowadzeniu do eksploatacji samolotów komunikacyjnych napędzanych wodorem już do 2035 r.

Słowa kluczowe: Lotnicze technologie wodorowe; Wodorowe napędy lotnicze; Lotnicze napędy elektryczne; Ogniwa paliwowe; Silniki turbośmigłowe; Silniki turbowentylatorowe

Abstract: The use of hydrogen technologies is the most effective way to decarbonise long-haul transport - including commercial aviation. Two leading technical solutions introducing hydrogen into the propulsion systems of civil airliners are the use of fuel cells generating electricity to power electric motors for propeller propulsion, as well as turboprop and turbojet/turbofan engines using hydrogen fuel. More than a dozen companies and research centers around the world are carrying out works aimed at introducing hydrogen-powered communication aircraft into operation by 2035.

Keywords: Aviation hydrogen technologies; Hydrogen aviation propulsion; Aviation electric propulsion; Fuel cells; Turboprop engines; Turbofan engines

Droga do bezemisyjnej, zdekarbonizowanej gospodarki przyszłości oparta ma być przede wszystkim na szybkim odejściu od węglowodorowych paliw kopalnych oraz na elektryfikacji większości dziedzin ludzkiej działalności. Działania te służące ochronie klimatu i środowiska naturalnego dotyczyć będą również wszystkich dziedzin transportu (bliisko- i dalekosiężnego): drogowego, kolejowego, wodnego i lotniczego. W wachlarzu już dostępnych i dopiero rozwijanych technologii poczesne miejsce zajmują rozwiązania wodorowe, wykorzystujące uzyskiwany w sposób ekologicznie czysty wodór „zielony” – wytwarzany w elektrolizerach zasilanych z odnawialnych źródeł energii lub „różowy” z elektrolizerów zasilanych przez energetykę jądrową.

Obecnie prowadzone są intensywne prace badawczo-rozwojowe, które w optymistycznym scenariuszu już przed końcem obecnej dekady pozwolą na wprowadzenie do eksploatacji samolotów komunikacyjnych napędzanych wodorem zamiast stosowanych dotąd paliw: nafty lotniczej (silniki turbowentylatorowe i turbośmigłowe) i benzyny wysokooktawowej (silniki tłokowe). Amerykańska firma McKinsey & Company zajmująca się doradztwem w zakresie zarządzania strategicznego prognozuje, że samoloty komunikacyjne napędzane wodorem wejdą na rynek pod koniec lat trzydziestych obecnego stulecia, a w 2050 r. przejmą one około jednej trzeciej światowych przewozów lotniczych.

Wodór w lotnictwie? – nic nowego pod słońcem...

Wodór towarzyszył narodzinom lotnictwa, pozwalając początkowo na zbudowanie aerostatów – statków powietrznych napełnionych gazem lżejszym od powietrza, unoszących się w powietrzu dzięki sile wyporu, o której mówi prawo Archimedesesa. Ponad dwa stulecia temu francuski wynalazca Jacques Charles skonstruował balon napełniony wodorem, który wzniósł się do pierwszego lotu w dniu 27 sierpnia 1783 roku w Paryżu. Balony wodorowe, nazywane od nazwiska swego twórcy „charlierami” znalazły szybko zastosowanie w wojsku do obserwacji i korygowania ognia artylerii. Na początku XX wieku pojawiły się sterowce – balony wyposażone

w napęd wykorzystujący silniki spalinowe. „Zeppelin” (nazywane tak od nazwiska niemieckiego konstruktora) przez trzy dekady ubiegłego wieku rozwijano i stosowano zarówno w lotnictwie wojskowym jak i cywilnym. Karierę wodorowych sterowców zakończyła katastrofa najsłynniejszego spośród nich: niemieckiego „Hindenburga” który po transatlantyckim locie eksplodował 6 maja 1937 r. podczas cumowania do stalowej wieży na lotnisku w Lakehurst w stanie New Jersey w USA.

Wodór rozpoczął swój powrót do lotnictwa dwadzieścia lat później – tym razem jednak jako paliwo. W 1957 r. Amerykanie przeprowadzili próby odpowiednio zmodyfikowanego samolotu wojskowego Martin B-57B, którego jeden z dwóch silników turbodozrutowych typu Wright J65 mógł być przełączany w locie na zasilanie paliwem wodorowym zamiast naftą lotniczą. W pierwszej próbie czas pracy silnika zasilanego wodorem wyniósł 20 minut.

Technologie wodorowe dla napędów lotniczych

Istnieją dwa podstawowe rodzaje aplikacji wodoru do napędów lotniczych:

- silniki turbowentylatorowe, turbośmigłowe lub (znacznie rzadziej) tłokowe spalające sprężony / ciekły wodór zamiast nafty lot-

niczej lub benzyny w powietrzu atmosferycznym;

- silniki elektryczne (poruszające śmigła) zasilane energią elektryczną wytwarzaną w ogniwach paliwowych zasilanych sprężonym / ciekłym wodorem i powietrzem atmosferycznym.

Wodór ma niezwykle wysoką wartość opałową wynoszącą 119,9 MJ/kg (dla porównania: benzyna ok. 43 MJ/kg) i ciepło spalania wynoszące 141,9 MJ/kg. Parametr ten każe zatem uznać go za paliwo niemalże idealne [1]. Jednak gęstość energii niesprężonego, gazowego wodoru wynosi 10,05 kJ/litr przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze, w porównaniu z 31293 kJ/litr dla węglowodorowych paliw płynnych, a zatem jest ona aż 3114 razy niższa. Po sprężeniu do ciśnienia do 690 barów gęstość energii osiąga 4500 kJ/litr, czyli jest wciąż siedem razy mniejsza niż w przypadku klasycznych paliw płynnych. Ciekły wodór schłodzony do 20 K (minus 253 °C) ma gęstość energii 8491 kJ/litr, czyli już tylko 3,7 razy niższą niż paliwa płynne.

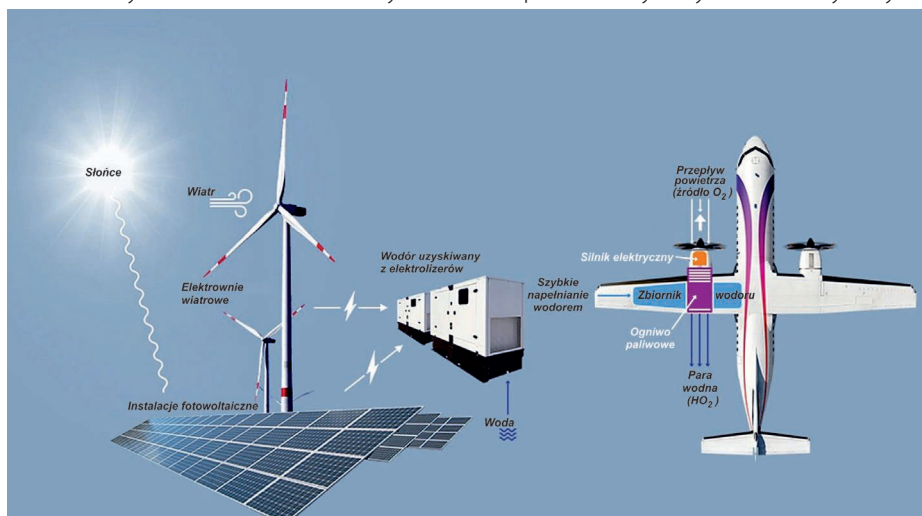
Jednym z poważniejszych problemów w konstrukcji samolotu wodorowego jest zatem zapewnienie w konstrukcji płatowca odpowiedniego miejsca do pomieszczenia zbiorników wodoru, których objętość musi być kilkakrotnie większa niż w przypadku paliw klasycznych. W klasycznych

rozwiązaniach współczesnych samolotów komunikacyjnych zbiorniki paliwa węglowodorowego umieszcza się wewnątrz skrzydeł. Dla samolotu wodorowego konieczne jest pomieszczenie znacznie większych zbiorników paliwa w kadłubie albo nadanie płatowcowi kształtu integrującego funkcje kadłuba i skrzydła (tzw. kadłub nośny). Dodatkowe wymaganie zwiększające objętość stanowi konieczność zapewnienia odpowiedniej izolacji cieplnej dla zbiorników kriogenicznych.

W przypadku spalania wodoru w powietrzu atmosferycznym w silniku turbinowym produktem spalania jest woda, choć istotnym zagrożeniem jest tu możliwość termicznego powstawania szkodliwych tlenków azotu poprzez mechanizm, który występuje także przy spalaniu węgla i paliw węglowodorowych. Produktem reakcji tlenu z wodorem w ogniwach paliwowych jest wyłącznie czysta woda – wytwarzana w nich energia elektryczna nie jest zatem obciążona szkodliwymi emisjami substancji szkodliwych.

Pionierskie prace w dziedzinie projektowania dużych samolotów komunikacyjnych z napędem wodorowym wykonała w 1975 r. amerykańska firma Lockheed na zamówienie centrum badawczego NASA w Langley. Projekt studialny obejmował samoloty komunikacyjne przeznaczone do przewozu 130 pasażerów na odległość do 2780 km, 200 pasażerów na odległość do 5560 km i 400 pasażerów na odległość do 9265 km [2].

Nieco ponad dekadę później w ZSRR zmodyfikowano trójsilnikowy samolot komunikacyjny Tupolew Tu-154 dostosowując jeden z jego silników do pracy na wodrze. Prototyp nazwany Tu-155 wykonał pierwszy lot próbny w dniu 15 kwietnia 1988 r. Załamanie się gospodarki radzieckiej pod koniec lat osiemdziesiątych spowodowało wstrzymanie dalszych prób.



1. Schemat bezemisyjnego wykorzystania paliwa wodorowego w lotnictwie komunikacyjnym w układzie napędowym samolotu do komunikacji regionalnej z ogniwami paliwowymi zasilającymi silniki elektryczne napędzające śmigła. Paliwo wodorowe uzyskiwane jest z elektrolizerów zasilanych „zielonym” wodorem ze źródeł odnawialnych: fotowoltaiki i elektrowni wiatrowych (rys. ZeroAvia)

Prototypy i testy w pierwszych dekadach XXI wieku

Wzmoczone zainteresowanie lotniczymi napędami wodorowymi powróciło pod koniec pierwszej dekady XXI stulecia. Zaczęły powstawać pierwsze prototypowe wodorowe systemy napędowe i napędzane nimi samoloty. Amerykańska firma Boeing zmodyfikowała mały dwumiejscowy samolot sportowy Diamond DA20 na napęd elektryczny zasilany ogniwami paliwowymi zaprojektowanymi i wyprodukowanymi przez przedsiębiorstwo Intelligent Energy. Samolot wykonał pierwszy lot próbny w dniu 3 kwietnia 2008 r.

Równolegle w Niemczech przystąpiono do prób samolotu Antares DLR-H2 wyposażonego w śmigłowy napęd elektryczny zasilany z ogniw paliwowych. Do pierwszego lotu wystartował on z lotniska w Hamburgu 7 lipca 2009 r. W listopadzie tegoż roku samolot wykonał lot na pułapie powyżej 2500 m nad poziomem morza służący wykazaniu sprawności pracy pokładowych ogniw paliwowych w warunkach obniżonego ciśnienia na tej wysokości. Układ napędowy samolotu został opracowany w Instytucie Termodynamiki Technicznej DLR w Stuttgarcie we współpracy z partne-

rem projektu Lange Aviation.

W 2010 r. firma Boeing zaprezentowała bezzałogowy samolot Phantom Eye z napędem wodorowym. Wysokościowy samolot rozpoznawczy przeznaczony do rozpoznania, obserwacji i wsparcia systemów łączności mógł utrzymywać się w powietrzu nawet przez cztery dni z ładunkiem użytecznym (aparaturą obserwacyjną i elektroniczną) o masie ok. 200 kg. Phantom Eye został wyposażony w zespół napędowy złożony z dwóch silników tłokowych o pojemności 2,3 dm³ każdy, napędzających czteropłatowe śmigła poprzez przekładnie redukcyjne. Zastosowano odpowiednio zmodyfikowane benzynowe silniki samochodowe, zastosowane pierwotnie w samochodzie Ford Fusion, które dostosowano do spalania wodoru. Zasilanie w niezbędny do spalania tlen z powietrza atmosferycznego zapewniały w locie na dużej wysokości (pułap do nawet 20 tysięcy metrów) wielostopniowe turbosprężarki.

Również w 2010 r. rozpoczęto próby w locie samolotu wodorowego Rapid 200FC powstałego w ramach projektu Politechniki Turyńskiej z Włoch finansowanego ze środków Unii Europejskiej. Wodór sprężony w zbiornikach do ciśnienia 350 bar dostarczany jest do ogniwa paliwowego

zasilającego silnik elektryczny o mocy znamionowej 40 kW. Dodatkowe źródło zasilania elektrycznego stanowi obok ogniwa paliwowego akumulator litowo-polimerowy.

Tymczasem Amerykanie kontynuowali rozwój wysokościowych samolotów rozpoznawczych przeznaczonych do długotrwałych lotów w stratosferze. 11 stycznia 2011 r. bezzałogowy samolot AeroVironment Global Observer wykonał swój pierwszy lot napędzany wodorowym układem napędowym z ogniwami paliwowymi zasilającymi cztery silniki elektryczne o wysokiej sprawności. Wcześniejsze loty testowe wykonano z wykorzystaniem zasilania z akumulatorów.

W 2016 r. w Niemieckim Centrum Badawczym Lotnictwa i Astronautyki DLR (niem. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) rozpoczęto próby w locie samolotu doświadczalnego HY4 napędzanego silnikami elektrycznymi zasilanymi z ogniw paliwowych. Samolot został wyposażony w zbiornik zawierający 9 kg sprężonego wodoru, czterech ogniw paliwowych o mocy 11 kW każde i dwóch akumulatorów o pojemności 10 kWh każdy.

Cel: napęd wodorowy dla transportu lotniczego

Na początku bieżącego stulecia: w latach 2000 – 2002 przedsiębiorstwo Airbus będące europejskim liderem w dziedzinie lotnictwa komunikacyjnego przeprowadziło w ramach projektu nazwanego Cryoplane prace studialne przyszłych samolotów pasażerskich napędzanych silnikami turbowentylatorowymi na paliwo wodorowe obejmujące m.in. konfiguracje aerodynamiczne, instalacje pokładowe, zespół napędowy, infrastrukturę lotniskową, kwestie bezpieczeństwa, kompatybilność środowiskową i scenariusze wprowadzenia na rynek. Projekt ten był finansowany ze środków Unii Europejskiej. W jego ramach przeanalizowano następujące potencjalne konstrukcje: 12-miejscowy samolot dyspozycyjny o zasięgu 6500 km, samolot komunikacyjny dla linii regionalnych dla 44 pasażerów o



2. Trzy projekty koncepcyjne wodorowych samolotów komunikacyjnych Airbusa opracowane w ramach programu ZEROe, które mogą zostać wprowadzone do eksploatacji do 2035 r.: samolot turbośmigłowy krótkiego zasięgu dla 100 pasażerów, samolot z napędem turbowentylatorowym – średniego zasięgu dla 200 pasażerów i samolot o niekonwencjonalnej – futurystycznej konfiguracji aerodynamicznej bazującej na wykorzystaniu kadłuba nośnego łączącego cechy klasycznego kadłuba, skrzydeł i usterzenia (rys. Airbus)



3. Samolot-laboratorium na bazie przebudowanego Airbusa A380 będzie wykorzystywany do testów przyszłościowych wodorowych systemów napędowych dla lotnictwa komunikacyjnego (rys. Airbus)

zasięgu do 2800 km i dla 70 pasażerów o zasięgu do 3700 km, samolot średniego zasięgu dla 185 pasażerów o zasięgu do 7400 km) i samolot dalekiego zasięgu dla od 380 do 550 pasażerów o zasięgu do 15 700 km.

We wrześniu 2020 r. Airbus przedstawił trzy projekty koncepcyjne wodorowych samolotów komunikacyjnych opracowane w ramach programu ZEROe, które jak zapowiedziała firma mogą zostać wprowadzone do eksploatacji do 2035 r.: samolot turbośmigłowy krótkiego zasięgu dla 100 pasażerów, samolot z napędem turbowentylatorowym - średniego zasięgu dla 200 pasażerów i samolot o niekonwencjonalnej – futurystycznej konfiguracji aerodynamicznej bazującej na wykorzystaniu kadłuba nośnego łączącego cechy klasycznego kadłuba, skrzydeł i usterzenia [3]. Wszystkie trzy projekty firmy zakładają zastosowanie silników turbinowych zasilanych paliwem wodorowym.

W ubiegłym roku okazało się, że Airbus ma również plany wykorzystania w samolotach komunikacyjnych śmigłowych napędów elektrycznych zasilanych z ogniw paliwowych. 30 listopada 2022 r. podczas konferencji prasowej przedstawiciele Airbus ogłosili, że w ramach programu ZEROe pracują nad takim właśnie systemem napędu lotniczego i planują przetestować go na samolocie-hamowni – latającym laboratorium zbudowanym na bazie Airbusa A380 – największego samolotu komunikacyjnego, jaki

kiedykolwiek wzbił się w powietrze. Loty próbne z nowym silnikiem zaplanowano na rok 2026. Europejski concern spodziewa się, że nowy samolot będzie mógł wejść do eksploatacji do 2035 r. Jak stwierdził Mathias Andriamisaïna – szef programu testowego ZEROe, A380 jest bardzo stabilnym samolotem pod względem aerodynamiki i gondola z testowanym silnikiem umocowana do tylnej części kadłuba nie powinna przysparzać problemów pozwalając jednocześnie na wszechstronne sprawdzenie nowej jednostki napędowej. Wiceprezes działu Zero-Emission Aircraft Glenn Llewellyn stwierdził, że pomyślny program prób nowego silnika uturjuje drogę dla skonstruowania 100-miejscowego samolotu wodorowego o zasięgu 1600 km.

Podobne jak Airbus plany mają jednak i inni. W grudniu 2021 r. brytyjski Instytut Technologii Lotniczych (ATI – ang. *Aerospace Technology Institute*) zaprezentował swe studium badawcze nazwane „FlyZero” dotyczące przyszłej budowy dużego samolotu komunikacyjnego z miejscami dla 279 pasażerów, dalekiego zasięgu (5250 km) napędzanego silnikami turbowentylatorowymi zasilanymi ciekłym wodorem ze zbiorników kriogenicznych [4]. Prace badawczo-rozwojowe instytutu ATI intensywnie wspiera przemysł lotniczy a w szczególności firmy: Airbus, Rolls-Royce, GKN, Spirit, General Electric, Reaction Engines, Easyjet, NATS, Belcan, Eaton, Mott MacDonald i MTC.

W marcu 2022 roku zaprezentowano trzy koncepcje samolotów opracowanych w ramach programu „FlyZero”:

- Regionalny samolot pasażerski typu FZR-1E, 75-miejscowy, wyposażony w sześć silników elektrycznych zasilanych ogniwami paliwowymi. Ma on mieć wymiary porównywalne ze współczesnym samolotem do transportu regionalnego ATR 72, jednak ze średnicą kadłuba wynoszącą 3,5 m w porównaniu do 2,8 m dla zwiększenia objętości do pomieszczenia zbiorników wodoru. Samolot ma rozwijać prędkość przelotową ok. 601 km/h i zasięg 1480 km;
- Samolot pasażerski średniego zasięgu FZN-1E ma mieć zespół napędowy zainstalowany w tyle kadłuba. Będzie on złożony z 2 silników turbowentylatorowych spalających paliwo wodorowe. Przewidziano zastosowanie usterzenia w układzie T i dodatkowe usterzenie poziome w części dziobowej. Jego kadłub ma być dłuższy o 10 m niż w przypadku współczesnego Airbus A320neo. W tyle kadłuba poszerzonego w tym miejscu o około 1 m. Samolot ma być wyposażony w składane końcówki skrzydeł (dla zmieszczenia się w standardowej szerokości miejsc postojowych przy bramkach terminali dworców lotniczych). Prędkość przelotowa wynosić ma 830 km/h a zasięg 4400 km.
- Szerokokadłubowy samolot pasażerski dalekiego zasięgu typu FZM-1G będzie porównywalny ze współczesnym Boeingiem 767-200ER, przewożąc 279 pasażerów na dystansie 10 650 km. Jego kadłub ma mieć szerokość 6 m, a więc będzie zbliżony do średnicy kadłuba Airbusa A350 lub Boeinga 777. Rozpiętość skrzydeł wyniesie 52 m (171 stóp). Dwa wodorowe silniki turbowentylatorowe będą zainstalowane pod skrzydłami. Samolot ma mieścić się w standardowej szerokości dla postoju przy dworcach lotniczych. Zbiorniki wodoru mają być



4. Jedna z koncepcji samolotu wodorowego opracowana przez brytyjski Aerospace Technology Institute (rys. ATI)

umieszczone w kadłubie, przed skrzydłem. rozpiętość skrzydeł w granicach limitów miejsc postojowych przy terminalach, silniki pod skrzydłami i zbiorniki przed skrzydłem.

Szwedzka firma GKN Aerospace zainicjowała w 2021 r. program współpracy mający na celu opracowanie rozwiązań technicznych dla trzech ważnych podsystemów silnika do napędzania wodorem samolotów pasażerskich średniego zasięgu. Projekt H2Jet o wartości 2,8 miliona dolarów obejmuje grupę producentów systemów lotniczych współpracującą ze Szwedzką Agencją ds. Energii, Chalmers University of Technology, Lund University, KTH Royal Institute of Technology, University West, Research Institutes of Sweden (RISE) i Oxeon. Prace skupiają się na silnikach turbowentylatorowych i turbośmigłowych spalających wodór. Równolegle GKN Aerospace prowadzi prace nad programem H2Gear, w ramach którego prowadzone są prace nad układami napędowymi na ciekły wodór dla samolotów transportu regionalnego wykorzystujących ogniwa paliwowe.

Amerykański producent silników lotniczych Pratt & Whitney chce połączyć swoją konstrukcję odrzutowego silnika turbowentylatorowego PW1100G z rozwiązaniami opracowanymi w ramach projektu HySITE (ang. *Hydrogen Steam Injected, Inter-Cooled Turbine Engine*). Rozwiązanie to po-

zwala na uniknięcie emisji dwutlenku węgla, zredukowanie emisji tlenków azotu NOx o 80% i zmniejszenie zużycia paliwa o 35% w porównaniu z podstawowym wariantem silnika PW1100G, wykorzystywanego np. do napędu samolotów Airbus A220. Wprowadzenie do eksploatacji może nastąpić już w 2035 r. W dniu 21 lutego 2022 r. Departament Energii Stanów Zjednoczonych w ramach programu OPEN21 prowadzonego przez Agencję Zaawansowanych Projektów Badawczych-Energy (ARPA-E) przyznał firmie Pratt & Whitney grant o wartości 3,8 miliona dolarów na dwuletnią inicjatywę badawczą, mającą na celu opracowanie komory spalania i wymiennika ciepła wykorzystywanych do odzyskiwania pary wodnej ze strumienia spalin, wtryskiwanej następnie jako woda do komory spalania w celu zwiększenia jej mocy oraz dostarczanej do sprężarki do chłodzenia międzystopniowego i do turbiny w charakterze chłodziwa.

Interesujące prace nad lotniczymi napędami wodorowymi prowadzi brytyjsko-amerykańska firma ZeroAvia założona w 2017 r. w celu rozwoju wodorowych napędów lotniczych. W 2021 r. ZeroAvia rozpoczęła prace nad wodorowym układem napędowym o mocy 2 MW przeznaczonym dla zastosowania w samolotach komunikacyjnych do transportu regionalnego. Początkowo wykorzystywała ona do prób samolot-laboratorium Piper PA-46-350P, który jednak został poważnie

uszkodzony podczas przymusowego lądowania w kwietniu 2021 r. Obecnie prace te są kontynuowane przy użyciu kolejnego samolotu doświadczalnego – zmodyfikowanego Dorniera 228, w którym jeden silnik turbośmigłowy zastąpiono prototypowym wodorowym układem napędowym, składającym się z silnika elektrycznego zasilanego z dwóch ogniw paliwowych i akumulatora litowo-jonowego.

Pokazane tu przykłady wyraźnie wskazują, że kurs na dekarbonizację lotnictwa cywilnego jest już wyraźnie nakreślony. Świadczy o tym rosnące zainteresowanie wiodących firm światowego przemysłu lotniczego, instytucji naukowo-badawczych i rządów krajów wysokorozwiniętych, wspierających prace badawczo-rozwojowe w tej dziedzinie. Wydaje się, że w najbliższych dwóch dziesięcioleciach wejdą do eksploatacji samoloty o napędzie wodorowym: turbośmigłowym na trasach krótkich i średnich oraz turbowentylatorowym na trasach średnich i dalekich. Napęd elektryczny zasilany z ogniw paliwowych znajdzie zastosowanie w samolotach do transportu regionalnego, uzupełniony napędem elektrycznym zasilanym z akumulatorów na trasach najkrótszych. Zatem szerokie wejście napędów bezemisyjnych lub niskoemisyjnych do transportu lotniczego stanie się faktem. ◀

Materiały źródłowe

- [1] J. Nowicki, Wstęp do energetyki wodorowej, Materiały XXII Sympozjum Oddziału Poznańskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich „Sieci i instalacje”, 20-21 listopada 2019 r.
- [2] G.D. Brewer and R.E. Morris, Study of LH2 fueled subsonic passenger transport aircraft, Lockheed, January 1, 1976.
- [3] Airbus reveals new zero-emission concept aircraft (Materiały prasowe). Airbus. 21 September 2020.
- [4] Nathan Harrison, Zero-carbon emission flights to anywhere in the world possible with just one stop, Aerospace Technology Institute, 6 December 2021.