



WODÓR JAKO PALIWO W ZASTOSOWANIACH CYWILNYCH I MILITARNYCH

HYDROGEN AS A FUEL IN CIVIL AND MILITARY APPLICATIONS

Paweł GAŚSIOR, Jerzy KALETA

Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej
*Department of Mechanics and Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering at Wrocław
University of Technology*

Streszczenie: Znaczenie i zastosowanie wodoru jako nośnika energii stale rośnie. Może być on używany bezpośrednio w silnikach spalinowych lub turbinach, ale najwyższą sprawność energetyczną (łącznie: elektryczną i cieplną), o wartości nawet 70-80%, uzyskuje się stosując ogniwa paliwowe. W pracy przedstawiono przykłady projektów badawczych i wdrożeń z zakresu transportu i energetyki, w aplikacjach cywilnych i wojskowych. Zaletą rozwiązań szczególnie ważnych w zastosowaniach militarnych - poza sprawnością - jest ponadto cicha praca (ang.: low noise signature) i niewielki tzw. ślad termiczny (ang.: low heat signature), które utrudniają wykrycie obiektów wojskowych zasilanych przy pomocy ogniwa paliwowych. Istotna jest również wysoka niezawodność (brak części ruchomych, eliminacja smarowania), bezobsługowość (minimalne koszty utrzymania) i zdalne sterowanie oraz niska emisja substancji szkodliwych. Ważnym atutem jest też możliwość wytworzenia paliwa na miejscu (elektrolizery) oraz wykorzystanie dostępnych lokalnie innych źródeł energii i paliw (z użyciem tzw. reformerów) do wytwarzania wodoru. Kluczowe znaczenie ma fakt, iż wszystkie przytoczone przykłady zaliczyć można do technologii podwójnego zastosowania.

Słowa kluczowe: wodór, ogniwa paliwowe, aplikacje militarne i cywilne

1. Wstęp

Wodór znany jest od ponad pięciuset lat. Na początku XVI wieku otrzymano wodór w stanie czystym. Dokonał tego prawdopodobnie alchemik Paracelsus (Philippus von Hohenheim). Znaczącą rolę w poznaniu wodo-

Abstract: The importance and the use of hydrogen as an energy carrier have been constantly growing. It can be used directly in combustion engines or turbines, but the highest energetic efficiency (total: electric and heat) even to 70-80% can be obtained by using fuel cells. The paper presents examples of research projects and implementations in transport and power engineering for civilian and military applications. Low noise and heat signatures making object difficult to detect belong to advantages which beyond efficiency are particularly important in military applications. There are also important high reliability (no moving parts, elimination of lubrication), maintenance-free (negligible operational costs), remote control and low emissions of environmentally damaging products. A possibility for producing the fuel on site (by electrolysis), or using other locally available sources of energy and fuel to produce hydrogen (i.e. by using reformers) is another benefit. Moreover it is crucial that all the examples cited above may be included in category of dual-use technologies.

Keywords: hydrogen, fuel cell, military and civilian applications

1. Introduction

The hydrogen has been known for more than five hundred years. Hydrogen was received in pure state in the beginning of XVI century. It was probably made by alchemist Paracelsus (Philippus von Hohen-

ru przypisuje się też takim badaczom jak Robert Boyle (1661) Henry Cavendish (1766), a za pierwiastek uznano wodór w wyniku badań Antoine'a Lavoisiera (1783).

Wodór jako nośnik energii może być spalany bezpośrednio w silnikach konwencjonalnych (ang.: combustion engines, CE), ale także może być wykorzystany jako paliwo do zasilania ogniw paliwowych (ang.: fuel cell, FC). Uznaje się dziś powszechnie, że zasadę działania ogniw paliwowych jako pierwszy opisał szwajcarski chemik niemieckiego pochodzenia Christian Friedrich Schönbein (1838r.). Na tej podstawie brytyjski naukowiec Sir William Robert Grove stworzył pierwsze działające ogniwo paliwowe (1839 r.) [1,2,3].

1.1. Gromadzenie wodoru

Używanie wodoru, zarówno do zasilania ogniw paliwowych jak i silników spalinowych, wymaga bezpiecznej i taniej technologii jego gromadzenia i tankowania. Ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne (kluczowe znaczenie ma tutaj np. niska gęstość) wodór wymaga specjalnych systemów do przechowywania. Testowane są trzy metody gromadzenia: w postaci gazowej w zbiornikach wysokociśnieniowych, w postaci skroplonej w zbiornikach kriogenicznych oraz w ciałach stałych, w których wodór związany jest chemicznie. Podstawowymi parametrami opisującymi „użyteczność” systemów gromadzenia wodoru są: gęstość wagowa systemu (ang.: system gravimetric density) oraz gęstość objętościowa systemu (ang.: system volumetric density). Obecnie dobrze opanowanymi technicznie i komercjalizowanymi metodami przechowywania jest sprężanie bądź też skraplanie wodoru. Pierwsza z nich jest technologią dominującą, szczególnie w pojazdach. Aktualnie wodór gromadzi się w zbiornikach całkowicie kompozytowych oznaczanych jako CH₂ (ang.: Compressed Hydrogen) pod ciśnieniem roboczym (ang.: Nominal Working Pressure - NWP) równym 700 bar. Jest to też przedmiot prac badawczych prowadzonych od kilkunastu lat przez zespół, z którego wywodzą się autorzy pracy (np. udział w projektach europejskich: StorHy, InGas, HyComp, HyCube, Copernic, HyPactor), np.: [4,5,6].

heim). Significant role in cognition of hydrogen is also attached to such researches as Robert Boyle (1661), Henry Cavendish (1766) whereas the research work of Antoine Lavoisier (1783) made the hydrogen was recognised as an element.

The hydrogen as a carrier of energy may be burnt directly in combustion engines (CE) but it may also power the fuel cells (FC). Now it is commonly accepted that the principle of operation of fuel cells was first presented by the Switzerland chemist of German origin Christian Friedrich Schönbein (1838). Basing on this the British scientist Sir William Robert Grove created a first operating fuel cell (1839) [1,2,3].

1.1. Storing the hydrogen

The use of the hydrogen both for powering fuel cells and combustion engines requires safe and cheap technology of its storing and refuelling. Because of its physical-chemical properties (its low density is a key issue) the hydrogen requires special storing systems. Three methods of storing are tested: in the gaseous state in high pressure cylinders, in the liquid state in cryogenic cylinders and in the solid bodies where the hydrogen is chemically bonded. There are following basic characteristics describing the “usefulness” of systems for storing the hydrogen: system gravimetric density and system volumetric density. The compression and condensation of the hydrogen are the methods of storing which are currently technologically and commercially available. The first of them is a dominating technology especially in vehicles. Currently the hydrogen is collected in composite cylinders marked as CH₂ (Compressed Hydrogen) under the Nominal Working Pressure (NWP) of 700 bars. This question is also a subject of research projects which have been led for more than a dozen years by a team of researchers including also the authors of this paper (e.g. participation in the European projects: StorHy, InGas, HyComp, HyCube, Copernic, HyPactor), e.g.: [4,5,6].

1.2. Ogniwa paliwowe

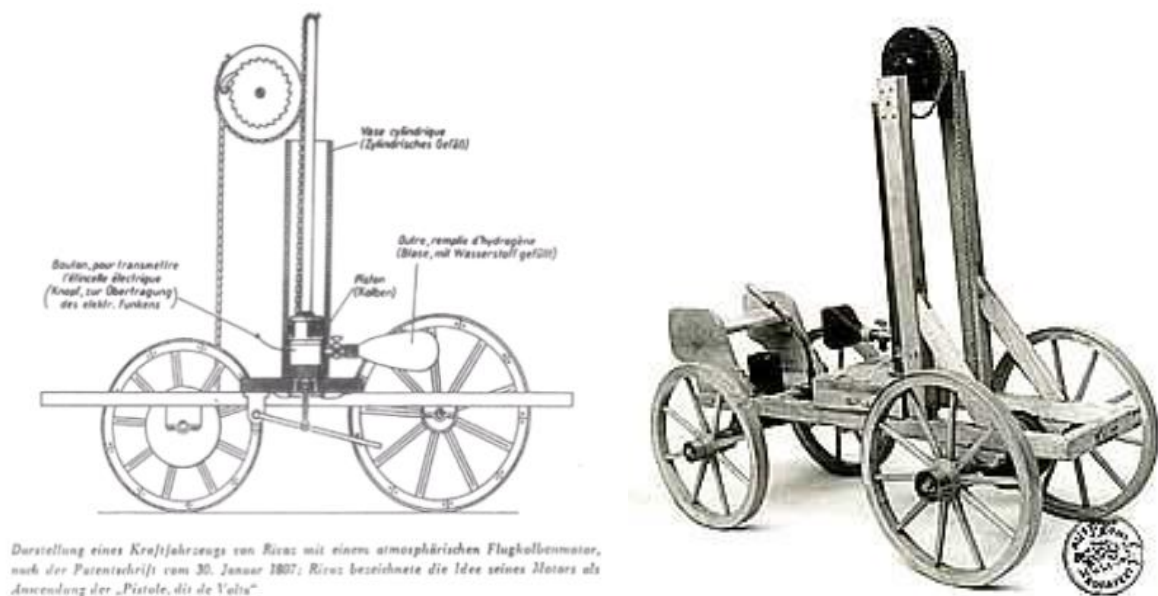
Ogniwa paliwowe, w przeciwieństwie do silników spalinowych, zamieniają energię chemiczną paliwa i utleniacza bezpośrednio w energię elektryczną. Eliminacja procesu spalania paliw kopalnych w silnikach konwencjonalnych pozwala na uniknięcie emisji szkodliwych związków obciążających środowisko i zapewnia wysoką sprawność konwersji energii.

Wyróżnia się w tym zakresie np.: PEM (ang.: Polimer Electrolyte Membrane), SOFC (ang.: Solid Oxide Fuel Cell), AFC (ang.: Alkaline Fuel Cell), DMFC (ang.: Direct Methanol Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) i inne. Żywotność niektórych ogniw najnowszej generacji dochodzi do 40000 godzin pracy, przy zachowaniu parametrów eksploatacyjnych. Literatura przedmiotu z tego zakresu jest obszerna i łatwo dostępna i dlatego zagadnienie to nie będzie tu rozwijane.

1.2. Fuel cells

Fuel cells, just opposite to combustion engines, transform the chemical energy of fuel and oxidiser directly into the electric energy. The elimination of combustion of mined fuels in classical engines reduces the emission of environmentally damaging compounds and provides high efficiency for conversion of energy.

In this category following approaches may be distinguished: PEM (Polymer Electrolyte Membrane), SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), AFC (Alkaline Fuel Cell), DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) and others. The life cycle of some cells of the newest generation reaches to 40000 hours of operation at maintained performance. The publications on this subject are easily available in numerous items so here this question is omitted.



Rys. 1. Pierwszy pojazd z silnikiem spalinowym na wodór i tlen, z zapłonem elektrycznym [7,8]

Fig. 1. The first hydrogen and oxygen combustion engine vehicle with electric ignition [7,8]

1.3. Wykorzystanie wodoru w transporcie

Ponad trzysta lat liczy historia wykorzystania wodoru jako paliwa. W roku 1806 Francois Isaac de Rivaz opatentował pierwszy silnik spalinowy na wodór i tlen z zapłonem elektrycznym. Rok później zbudował prototyp pojazdu [7,8].

1.3. The use of hydrogen in transport

The use of hydrogen as a fuel started more than three hundred years ago. Francois Isaac de Rivaz patented the first combustion engine on hydrogen and oxygen with electric ignition in 1806. He built the prototype of a vehicle a year later [7,8].

W latach 60. XX wieku rozpoczęto prace nad silnikiem raketowym promu kosmicznego (ang.: Space Shuttle Main Engine - SSME), który został użyty po raz pierwszy w roku 1981. Do zasilania wykorzystano ciekły wodór i tlen [9].

Pierwsze próby ze „współczesnymi” samochodami zasilanymi wodorem podjęto w roku 1966 (GM Electrovan) [10]. W ostatnim dwudziestolecu XX wieku już większość znaczących producentów samochodów podjęło programy badawcze mające na celu opracowanie - głównie - samochodów osobowych i autobusów zasilanych wodorem.

W 2014 roku Hyundai, jako pierwszy producent w świecie, rozpoczął seryjną produkcję swojego modelu ix35 Fuel Cell wyposażonego w wodorowe ogniwa paliwowe [11].

Zasięg samochodu wynosi 600 km przy jednym tankowaniu, które trwa tylko 3 minuty. Zbiornik umożliwia przechowanie 5,64 kg wodoru pod ciśnieniem 700 barów. Historia zatoczyła koło. Po ponad dwustu latach od pomysłu Rivaza samochód zasilany wodorem wszedł na rynek. Kolejne firmy zapowiadają masową produkcję podobnych rozwiązań już w tym roku (np. Toyota Mirai FCV).

The development of Space Shuttle Main Engine (SSME) started in the sixties of XXth century and it was used for the first time in 1981. It was powered by liquid hydrogen and oxygen [9].

The first trials with “contemporary” cars powered by hydrogen started in 1966 (GM Electrovan) [10]. In two last decades of XXth century most of significant manufacturers of cars launched research programs on developing mainly cars and buses powered by hydrogen.

In 2014 Hyundai as the first manufacturer in the world started serial manufacture of own model ix35 Fuel Cell that was equipped with hydrogen fuel cells [11]. The range of the car is 600 km at one filling which takes only 3 minutes. The container keeps 5.64 kg of hydrogen pressured to 700 bars. The history has turned a circle. The car powered by hydrogen is on the market after more than two hundred years when Rivaz’s idea appeared. Other companies announce the mass production of similar designs in this year (e.g. Toyota Mirai FCV).



Rys. 2. Hyundai ix35 FC, w tym sposób lokowania zbiornika CH₂ [materiały własne]

Figure 2. Hyundai ix35 FC and the way of integrating CH₂ container [own materials]

1.4. Wykorzystanie wodoru w energetyce

Zastosowanie wodoru, w przypadku aplikacji cywilnych, dotyczyło do niedawna głównie zasilania samochodów elektrycznych (ang.: Fuel Cell Vehicles, FCV). Obecnie następuje szerokie zastosowanie tego nośnika energii w stacjonarnych źródłach generowania energii (np. małe elektrownie) oraz jako swobodnego bufora w przypadku okresowego nad-

1.4. Hydrogen in energy engineering

The use of hydrogen in civilian applications has been recently limited mainly for Fuel Cell Vehicles (FCV). Now a wide application of this energy carrier is observed in stationary sources generating the energy (e.g. compact electric power plants) as a specific buffer in cases of periodical excesses of electric energy gener-

miaru energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych (elektrownie wiatrowe i słoneczne) lub elektrowni ciepłych. Widoczny jest też rozwój systemów do stałego lub awaryjnego zasilania obiektów o szczególnym znaczeniu (służba zdrowia, telekomunikacja, policja, straż pożarna, centra informacyjne, itp.).

Znaczącym impulsem w rozwoju ogniw paliwowych do wytwarzania energii było zastosowanie ich w latach sześćdziesiątych XX wieku w programie kosmicznym Gemini. Wówczas to NASA, wspólnie z General Electric oraz McDonnell Aircraft, wykorzystwała takie ogniwo do zasilenia orbitującej kapsuły w energię elektryczną oraz wodę pitną [12].

Aktualnie wskazać można w świecie kilkadziesiąt obiektów o mocy powyżej 1 MW, wykorzystujących wodór do wytwarzania energii elektrycznej, z użyciem turbin, generatorów z silnikami spalinowymi lub ogniw paliwowych. Poniżej tylko trzy przykłady.

Pierwszym projektem, wykorzystującym na skalę przemysłową wodór do spalania w turbinie gazowej w celach energetycznych, był rozpoczęty w 2004 roku projekt Fusina (Włochy). Jego celem było zaprojektowanie oraz pełne wdrożenie bloku energetycznego, będącego częścią elektrowni należącej do koncernu Enel. Uruchomienie instalacji nastąpiło w 2010 roku. Projekt był realizowany m.in. wspólnie z firmą General Electric, która była dostawcą turbiny wodorowej. W wyniku spalania mieszaniny wodór-powietrze powstaje energia cieplna, która jest przekształcana w energię elektryczną o mocy 12 MW. Dodatkowo spaliny wylotowe z turbiny (gorące powietrze i para wodna) są kierowane do pobliskiego bloku parowego zasilanego węglem, zwiększając jego możliwości produkcyjne o kolejne 4 MW. Zatem wodorowy blok w Fusina dostarcza łącznie 16 MW mocy (rys. 3).

Ogniwa paliwowe zastosowano natomiast w firmie Solway (Lillo w pobliżu Antwerpii, Belgia), gdzie zainstalowano zespół energetyczny o mocy 1 MW firmy Nedstack. Co ciekawe, cała konstrukcja mieści się w standardowym kontenerze o długości 40 stóp.

ated by renewable sources (wind and sun electric generators) or thermal electric plants. A development of systems for permanent or emergency powering of objects of special importance (health service, telecommunication, police, fire service, centres of information, etc.) is also visible.

An essential impulse in development of fuel cells for generation of energy was made by their use in the sixties of the XXth century for the Gemini space program. NASA and General Electric and McDonnell Aircraft used such cell to supply the orbiting capsule in electric energy and drinking water [12].

Currently a few dozen of objects with power above 1 MW may be indicated in the world using the hydrogen to produce the electric energy by exploiting turbines, generators with combustion engines or fuel cells. Three examples are shown below.

Fusina project, started in Italy in 2004, was the first one that exploited combustion of the hydrogen in gaseous turbine at industrial scale for energetic purposes. It was aimed to design and fully implement an energetic block which was a part of a power plant owned by Enel company. The installation started up in 2010. The project was conducted jointly with General Electric company which supplied the hydrogen turbine. In the result of burning the mixture of the air and hydrogen the heat is generated which is converted into the electric energy of 12 MW. Additionally the exhausting gases from the turbine (hot air and steam) are directed into a nearby steam block to boost its generating capacities by next 4 MW. Then the hydrogen block in Fusina provides totally 16 MW of power (Fig. 3).

The fuel cells were used by Solway company (Lillo near Antwerp, Belgium), where 1 MW power energetic block of Nedstack company was installed. The whole installation is packed into a standard 40 feet container.

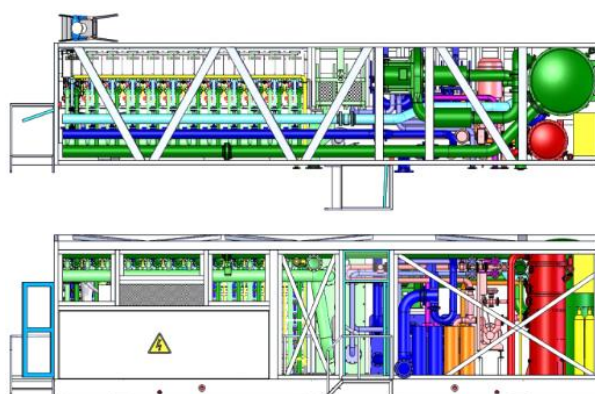


Rys. 3. Widok elektrowni Fusina z turbiną wodorową [13]

Figure 3. A view of Fusina electro-station with hydrogen turbine [13]: Control room – pomieszczenie kontrolne, Heat recovery steam generator – generator parowy do odzyskiwania ciepła, Dry flue gas chimney – komin suchych gazów spalinowych, Diverter – kanał odprowadzający, By-pass chimney – komin obejściowy, GE 10 gas turbine – turbina gazowa GE 10, Pipe rack – prowadnice podtrzymujące do rur, Transformer – transformator

Zespół energetyczny działa od stycznia 2012 r. i zasilany jest wodorem, będącym produktem ubocznym (ang.: by-product hydrogen) z zakładów chemicznych wytwarzających chlor. Podobne rozwiązanie o mocy 1 MW, którego producentem był Ballard Power Systems, zastosowano w Kalifornii (2012) [14].

The energetic block has been operating since January of 2012 and the by-product hydrogen from the chemical works producing chlorine is used. A similar solution with the power of 1 MW provided by Ballard Power Systems was used in California (2012) [14].



Rys. 4. Zespół energetyczny z ogniwami paliwowymi o mocy 1 MW [15,16]

Figure 4. Energetic block with fuel cells of 1 MW power [15,16]

Przykładem wykorzystania wodoru odpadowego do celów energetycznych jest też polska instalacja, w realizacji, której brał udział zespół, z którego wywodzą się autorzy niniej-

The Polish installation developed by a team of designers consisting also of authors of this paper is an example of exploitation of by-product hydrogen to energetic pur-

szej pracy¹. Głównym celem projektu o tytule "Wykorzystanie odpadowego wodoru do celów energetycznych" było zaprojektowanie, wykonanie i przebadanie urządzeń dostosowanych do przetwarzania gazów odpadowych na energię użytkową tj. prąd i ciepło oraz wyliczenie przynależnych do instalacji ilości jednostek tzw. unikniętych emisji CO₂ oraz przynależnych certyfikatów (białe, zielone.). Rezultatem projektu jest pilotowa instalacja, w unikalnej technologii wytwarzania energii, uwzględniająca specyfikę lokalnych strumieni paliw odpadowych. Projekt został zlokalizowany na terenie Zakładów Azotowych Kędzierzyn – ZAK (Grupa Azoty), które zapewniły dostęp do trzech rodzajów zanieczyszczonego wodoru. Ostateczne rozwiązanie wykorzystuje trzy generatory spalinowe o mocach elektrycznych odpowiednio 2 x 400 kW oraz 1 x 200 kW, a także ogniwo paliwowe o mocy 24 kW (typu PEM). W silnikach spalane są wszystkie gazy odpadowe (H₂ + węglowodory), natomiast ogniwo zasilane jest czystym wodorem, pochodzącym ze stacji oczyszczania. Istnieje możliwość rozbudowy instalacji energetycznej z obecnej mocy 1 MW do 5 MW, z użyciem pozostałych, niewykorzystywanych obecnie strumieni energii. Wdrożono ponadto system bezpieczeństwa, który w sposób ciągły monitoruje stan techniczny i szczelność rurociągów paliwowych, na całej ich długości. Opracowana metoda może być z powodzeniem upowszechniona w innych gałęziach przemysłu, gdzie dostępny jest wodór odpadowy [17,18,19].

Innym obszarem zastosowania wodoru są innowacyjne systemy rozwiązania problemu

poses². The main goal of the project entitled "Exploitation of By-product Hydrogen for Energetic Purposes" was the designing, constructing and testing the equipment for conversion of by-product gases into a useful energy i.e. electricity and heat and calculation of quantities of units of so called avoided emission of CO₂ with relevant (white and green) certificates affiliated to this installation. A piloting installation exploiting a unique technology for producing energy and regarding a specific character of local streams of by-product gases (fuels) was created as a result of the project.

The project was placed in Kedzierzyn Nitrogen Plant – ZAK (Azoty Group) which provided the access to three types of technological hydrogen. The final solution uses three combustion generators with respective electric powers of 2 x 400 kW and 1 x 200 kW and a fuel cell of 24 kW power (type PEM). All types of by-product gases (H₂ + hydrocarbon) are burnt in engines and the cell is powered by pure hydrogen from the station of purification. It is possible to increase the energetic capacities of existing installation from 1 MW to 5 MW by using the remaining not-exploited streams of energy. Moreover a security system has been implemented which monitors on a permanent basis technical and hermetic status of the whole fuel pipeline system. The developed method may be successfully used by other branches of industry where the by-product hydrogen is available [17,18,19].

Another area for exploiting the hydrogen refers to innovative systems providing

¹ Projekt „Wykorzystanie odpadowego wodoru do celów energetycznych”, w ramach działania 1.4 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Całkowita wartość projektu: ponad 48,6 mln zł, natomiast wysokość dofinansowania to ponad 29,5 mln zł. Okres realizacji projektu: 10.04.2012 - 31.12.2014. Partnerzy projektu: SKOTAN S.A., West Technology&Trading Polska, HORUS Energia, Politechnika Krakowska, Politechnika Wroclawska. Lokalizacja projektu: Zakłady Azotowe Kędzierzyn – ZAK (Grupa Azoty).

² Project „Exploitation of by-product hydrogen for energetic purposes” in the frame of 1.4 Operating Program on Innovative Economy co-financed by the European Union in the frame of the European Fund for Regional Development. Total value of project: more than PLN 48.6 million, whereas the assisting funds were more than PLN 29.5 million. Project leading time: 10.04.2012 - 31.12.2014. Partners: SKOTAN S.A., West Technology&Trading Poland, HORUS Energia, Krakow University of Technology, Wroclaw University of Technology. Localisation: Kedzierzyn Hydrogen Works – ZAK (Azoty Group).

magazynowania okresowego nadmiaru energii (ang.: Surplus Energy) ze źródeł odnawialnych (np. elektrowni wiatrowych, fotowoltaiki) z wykorzystaniem np. koncepcji Power to Gas - P2G (zwaną też: Power to Fuel - P2F)

Niestabilność dostaw energii ze źródeł odnawialnych, w tym okresowe znaczne nadwyżki są powodem poszukiwania optymalnych sposobów jej gromadzenia. Uznany sposobem staje się wytwarzanie wodoru (w okresie nadmiaru energii) i wykorzystywanie go następnie, jako paliwa w transporcie i energetyce. W przeciwieństwie do dużych ilości energii elektrycznej, wodór można stosunkowo łatwo gromadzić. Elektrolizery nowej generacji powodują, iż rozwiązania takie są już w świecie stosowane.

Narasta też potrzeba eliminacji i gospodarczego wykorzystania zjawiska nadmiaru energii w sieci (ang.: Energy peak shaving). Rozwiązanie z wytwarzaniem wodoru może być też stosowane w tradycyjnych elektrowniach dla optymalnego wytwarzania i wykorzystania prądu w cyklu dobowym.

solutions of problems concerning the storing of periodical surpluses of energy from the renewable sources (e.g. from wind farms or photovoltaic sources) by using a concept of Power to Gas - P2G (also known as Power to Fuel - P2F).

Instability of energy supplies from renewable sources including periodical surpluses is a reason for searching optimal solutions of its storing. A recognised solution is the production of hydrogen (at the excess of energy) and next using it as a fuel in transport and energy industry. Contrary to huge amounts of electric energy the hydrogen may be relatively easily stored. Electrolysers of new generation make such solutions start to be used in the world.

A need also appears for elimination and economical exploitation of excessive energy in the network by energy peak shaving. The solution based on production of hydrogen may be used in conventional power plants for optimal supply and use of the power at 24 hour cycle.



Rys. 5. Zespół energetyczny z generatorami i ogniwami paliwowymi o mocy 1 MW [17,19]

Figure 5. Energy block with generators and fuel cells of 1 MW power [17,19]

Tradycyjne rozwiązania, jak np. elektrownie szczytowo-pompowe (drogie inwestycje) tracić będą na znaczeniu. Łatwiej - okresowe nadwyżki energii wykorzystać do wytworzenia wodoru i wykorzystania go za chwilę z dużą sprawnością (ogniwa paliwowe). Koszty inwestycji są w tym przypadku wielokrotnie

Traditional solutions like water power-peak plants (expensive investment) will lose their meaning. It is easier to use temporary surpluses of energy for production of hydrogen and spending it after a time with high efficiency (fuel cells). Investment costs are many times lower in this case

niższe w porównaniu z przytoczonym przypadkiem elektrowni szczytowo-pompowej.

1.5. Gospodarka wodorowa

Gospodarka wodorowa (ang.: hydrogen economy), to nowa koncepcja zapewnienia energii w transporcie i energetyce. Termin zaproponowany został przez Johna Bockrisa (1970) [20] oraz Lawrence'a W. Jones'a z University of Michigan [21], by wyeliminować negatywne następstwa stosowania paliw kopalnych (ropa, węgiel, gaz ziemny) oraz podnieść sprawność pozyskiwania energii elektrycznej. W koncepcji tej za szczególnie efektywne uważa się połączenie ogniwa paliwowego zasilanego wodorem i silnika elektrycznego, co zapewnia 2-3 razy większą sprawność w porównaniu z silnikiem spalinywym [22].

Koncepcja ta spotkała się z szerokim poparciem w najbardziej rozwiniętych gospodarczo państwach, czego przykładem jest opracowanie i wdrażanie narodowych i ponadnarodowych strategii wykorzystania wodoru i ogniw paliwowych. Przykładem są działania Unii Europejskiej, która w 2006 roku utworzyła Platformę Technologiczną Wodoru i Ogniw Paliwowych (European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform) [23]. Budżet Platformy wyniósł 1 mld € w latach 2008-2013 i wzrósł do kwoty 1,3 mld € w aktualnej agendzie (2014-2020).

Dotychczas sfinansowano w Unii Europejskiej kilkadziesiąt dużych programów i projektów badawczych, których celem było zastosowanie wodoru i ogniw paliwowych w transporcie, energetyce jak i w gospodarstwach domowych. Narodowe strategie lub inne dokumenty o znaczeniu ogólnokrajowym opracowały też USA [24], Korea [25], Kanada [26], Niemcy [27], Francja [28], Dania [29], Szwecja [30], Norwegia [31], Wielka Brytania [32] i kilkanaście innych.

Polska nie opracowała żadnej strategii w tym obszarze.

Nasz dystans w stosunku do krajów zaawansowanych systematycznie się powiększa. A może Siły Zbrojne RP mogłyby stać się promotorem takich rozwiązań w Polsce?

comparing to water power-peak plants mentioned above.

1.5. Hydrogen economy

Hydrogen economy is a new concept for securing the energy in transport and power engineering. The term was proposed by John Bockris (1970) [20] and Lawrence W. Jones from the University of Michigan [21] to eliminate negative consequences of using mined fuels (oil, coal, natural gas) and increase the efficiency of producing electric energy. The combination of fuel cell powered by hydrogen and electric motor is considered as the most effective in this concept because it provides 2-3 times greater efficiency than combustion engine [22].

This concept has been met with a wide support by the most developed economies of the world what may be illustrated by development and implementation of national and international strategies for exploiting the hydrogen and fuel cells. Actions undertaken by the European Union that called in 2006 the European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform [23] are a good example of it. Budget of the Platform was € 1 billion within years 2008-2013 and increased to € 1.3 billion in current agenda (2014-2020).

A few dozens of large research programs and projects aimed to use the hydrogen and fuel cells in transport, power engineering and households have been financed up to now in the European Union. National strategies or other documents of national meaning were also developed in USA [24], Korea [25], Canada [26], Germany [27], France [28], Denmark [29], Sweden [30], Norway [31], Great Britain [32] and a dozen of other countries.

Poland has not developed any strategy in this area.

Our distance to developed countries increases systematically. May be the Polish Armed Forces would promote such solutions in Poland?

2. Wodór w zastosowaniach militarnych

Opisane przykłady wykorzystania wodoru, jako paliwa w transporcie i w energetyce, po ich uprzednim dostosowaniu, mogą być również w pełni wykorzystane w wojsku.

W dalszej części przytoczono przykłady programów badawczych i wdrożeń w tym zakresie, na potrzeby poszczególnych rodzajów sił zbrojnych. Warto przy tym mieć na uwadze, iż na polu walki paliwo stanowi nawet 70% transportowanych towarów [33]. Dlatego technologie, które mogą poprawić ten stan, w tym przez zastosowanie napędu elektrycznego lub hybrydowego są kluczowe dla mobilności sił zbrojnych.

Armia USA realizuje wieloletni program badawczy mający na celu wykorzystanie ogniw paliwowych w czołgu M1 Abrams. Początkowo dążono do stworzenia niezależnego systemu zasilania tzw. elektroniki pokładowej [34]. Wodór w tym rozwiązaniu wytwarzany jest bezpośrednio na pokładzie pojazdu, z wykorzystaniem tzw. procesu reformingu. Proces ten polega na konwersji paliwa standardowego, w tym przypadku oleju napędowego typu JP8, z wykorzystaniem pary wodnej lub plazmy oraz w obecności katalizatora, na wodór [35].

Docelowo zakłada się całkowicie elektryczny napęd czołgu, co radykalnie zmniejszy hałas, zużycie paliwa oraz negatywne oddziaływanie na środowisko (ang.: carbon footprint). Dotychczas stosowany silnik turbinowy o mocy 1000 KM powoduje, iż czołg M1 Abrams jest słyszalny z odległości kilku kilometrów [35]. Za realizację „elektrycznego czołgu” odpowiada U.S. Army Tank Automotive Research, Development & Engineering Center (TAR-DEC) we współpracy z koncernem General Motors.

Znacznie bardziej zaawansowane są prace nad innymi rodzajami pojazdów wojskowych, a paleta wojskowych samochodów hybrydowych lub całkowicie elektrycznych (FCEV) jest coraz szersza. Kilka z nich zaprezentowano w dalszej części artykułu.

Innym przykładem jest wykorzystanie wodoru i ogniw paliwowych do zasilania dronów. Marynarka Wojenna USA (The Naval Research Laboratory), wykorzystując ciekły wodór i ogniwa paliwowe zbudowała dron ION Tiger, który utrzymywał się w powietrzu przez 48 go-

2. Hydrogen in military applications

Examples of using the hydrogen as a fuel in transport and power engineering may be successfully applied after some modifications in armed forces.

Further some examples of research programmes and implementations in this area are given for various arms. It is worth to note that the fuel reaches up to 70% of transported goods on the battle field [33]. For this reason the technologies which may improve this situation e.g. by using electric or hybrid driving systems are essential for mobility of armed forces.

The US Army has been conducting for many years a research program aimed to deploy fuel cells in M1 Abrams tank. At the beginning an effort was directed for creating an independent supplying system of so called on board electronics [34]. The hydrogen is generated directly on the board of the vehicle by using the process of so called reforming. The process is based on conversion of standard fuel, i.e. in this case petrol oil of JP8 grade, with the use of water steam or plasma and in the presence of a catalyst into hydrogen [35].

The objective is to provide completely electric drive system for the tank what radically reduces the noise, fuel consumption and negative impact into environment (carbon boot print). Turbine engine with 1000 KM power used up to now has caused that M1 Abrams tank could be heard from a distance of a few kilometres [35]. U.S. Army Tank Automotive Research, Development & Engineering Center (TARDEC) in co-operation with General Motors is responsible for development of the “electric tank”.

The work on other types of military vehicles is much more advanced and the family of military hybrid or completely electric (FCEV) cars increases. Some of them are presented further in the paper.

Another example is use of the hydrogen and fuel cells for powering drones. The US Navy (The Naval Research Laboratory) has used liquid hydrogen and fuel cells to built drone ION Tiger which stayed in the

dzin (aktualny rekord świata) [37]. Dodatkowym atutem była eliminacja hałasu i niski ślad cieplny (ang.: low heat signature).

air through 48 hours (current world record) [37]. Elimination of noise and low heat signature were additional advantages.



Rys. 6. Czołg M1 Abrams modernizowany z użyciem ogniw paliwowych [34] oraz prototypowa mobilna stacja zasilania (APU) z ogniwami paliwowymi [36]

Figure 6. Tank M1 Abrams after upgrading by application of fuel cells [34] and a prototype of a mobile powering station (APU) with fuel cells [36]

Niemiecki okręt podwodny U36, to druga generacja okrętu z napędem hybrydowym z serii 212A. W okręcie tym jest generator dieslowski oraz dodatkowy układ napędowy z ogniwami paliwowymi niezależnymi od powietrza. Przydatność systemu wykazano w kwietniu 2013 r. podczas 18 dniowego rejsu bez wynurzenia [39].

German submarine U36 is a second generation of ships with hybrid drive of 212A series. The ship has a Diesel generator and an additional driving system with fuel cells which are independent from the air. Operational effectiveness of the system was proved in April, 2013 during 18 days underwater continuous mission [39].

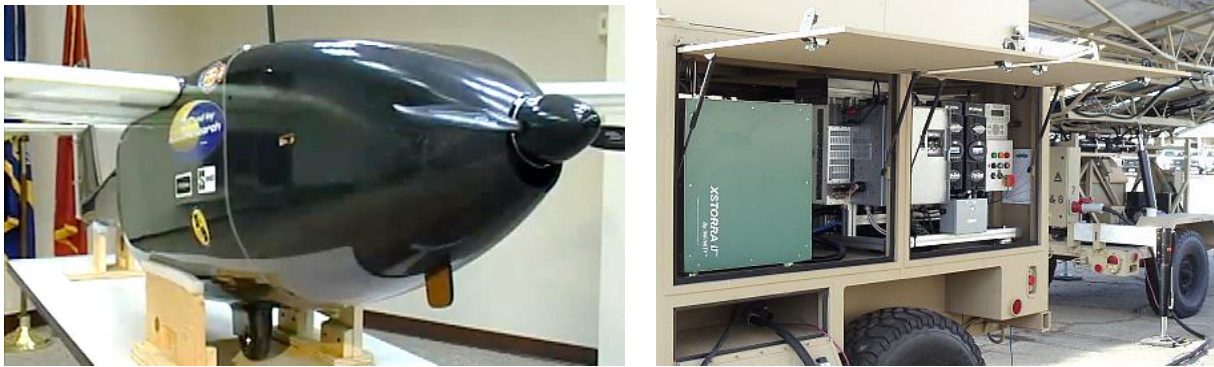
Podobne badania prowadzone są w USA. Ich celem jest stworzenie bezzałogowego pojazdu podwodnego dużych rozmiarów (Large Displacement Unmanned Underwater Vehicle - LDUUV), gotowego do wykonania 70-dniowej misji bez wynurzenia [44].

Similar research work is carried out in the USA. The goal is to build a large Displacement unmanned underwater vehicle (LDUUV) which would be prepared to fulfil a 70 day mission without emerging [44].



Rys. 7. Elektryczne pojazdy eksperymentalne Chevrolet Silverado Hydrogen Fuel Cell [39] oraz Dodge Ram COMBATT [33]

Figure 7. Electric experimental vehicles Chevrolet Silverado Hydrogen Fuel Cell [39] and Dodge Ram COMBATT [33]



Rys. 8. Dron ION Tiger, US Navy [37] oraz mobilna hybrydowa stacja o mocy 5 kW wykorzystująca ogniwa paliwowe i słoneczne [40]

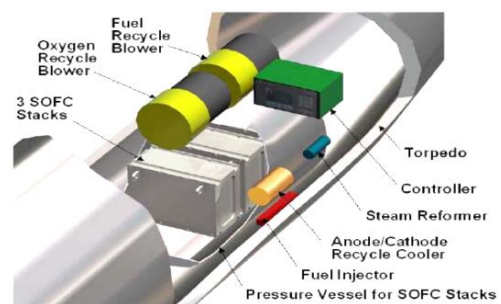
Figure 8. Drone ION Tiger, US Navy [37] and mobile hybrid station of 5 kW power using fuel cells and solar batteries [40]

Pojazd będzie zasilany paliwem ciekłym i dysponował ogniwami paliwowymi (SOFC) oraz oryginalnym systemem gromadzenia tlenu. Proponowane rozwiązanie wyklucza też pozostawianie w wodzie produktów ubocznych, co utrudnia wykrycie obiektu.

Innym przykładem jest torpeda z ogniwami paliwowymi (SOFC) [43] (rys. 9). Projekt przewiduje zastosowanie hybrydowego zasilania wykorzystującego to samo źródło paliwa i utleniacza. Pierwszy system zawiera konwencjonalny napęd spalinowy na paliwo JP-5 oraz utleniacz LiClO_4 . Drugi z kolei wykorzystuje układ ogniw paliwowych (SOFC) zasilany tym samym paliwem, tzw. reformer oraz silnik elektryczny.

The vehicle will be powered by a liquid fuel and fuel cells (SOFC) and original system for storing the oxygen. The proposed solution completely eliminates a trace of any by-product materials in the water what harms detection of the object.

Another example is a torpedo with fuel cells (SOFC) [43] (Fig. 9) The project predicts the use of hybrid power system exploiting the same source of fuel and oxidiser. The first system includes a conventional combustion driving system using JP-5 fuel and oxidiser LiClO_4 . On the other hand the second one uses a system of fuel cells (SOFC) powered with the same fuel i.e. so called reformer and electric motor.



Rys. 9. Niemiecki okręt podwodny typu 212A zasilany ogniwami paliwowymi [41] oraz projekt systemu zasilania torped z wykorzystaniem ogniw typu SOFC [42]

Figure 9. German submarine of 212A type powered by fuel cells [41] and an outline of torpedo powering system using the cells of SOFC type [42]: 3 SOFC stacks – 3 pakiety stałych tlenowych ogniw paliwowych, Oxygen recycle blower – dmuchawa tlenu w przetworniku, Fuel recycle blower – dmuchawa paliwa w przetworniku, Torpedo – torpeda, Controller – sterownik, Steam reformer – parowy przetwornik katalityczny, Anode/cathode recycle cooler – chłodnica anody/katody w przetworniku, Fuel injector – wtryskiwacz paliwa, Pressure vessel for SOFC stacks – pojemnik ciśnieniowy dla pakietów stałych tlenowych ogniw paliwowych

Koncepcję zasilania baz wojskowych z eliminacją hałasu (ang.: Silent Camp) – szczególnie w nocy – wywołanego przez konwencjonalne generatory z silnikami spalinyowymi, zaprezentowano w pracach [45, 46]. Generatory dieslowskie, wykorzystywane są do bezpośredniego zasilania bazy w dzień i równoczesnego wytwarzania wodoru. Wodór i zestaw ogniwi paliwowych (PEM) używany jest w godzinach nocnych. System hybrydowy pozwala ponadto na większą elastyczność w zakresie dostaw paliwa oraz mniejsze obciążenie środowiska.

Pomysł wykorzystania ogniwi paliwowych typu PEM jako pomocniczego źródła zasilania (ang.: Fuel Cell Auxiliary Power Unit - FC APU) w samochodach ciężarowych o średnim tonażu rzędu 5 ton (Family Medium Tactical Vehicles – FMTV) zaprezentowano w [46]. Ogniwo paliwowe jest zintegrowane z reformerem, co umożliwia wykorzystanie tego samego paliwa (JP8) jak dla silnika spalinowego. System zarządzania energią pozwala np. wykorzystanie układu elektrycznego w czasie postoju, z jednoczesną eliminacją pracy silnika na biegu jałowym, co dodatkowo obniża hałas (ang.: Silent Watch). Z kolei, w szczytowym okresie poboru energii, w trakcie jazdy, możliwe jest użycie obu systemów (spalinowego i elektrycznego). Ocenia się, iż w trakcie 10-godzinnej jazdy i 10-godzinnego postoju można obniżyć zużycie paliwa o 20,1%.

Rezultatem 10-letniego programu badawczego (U.S. Naval Research Laboratory) było opracowanie technologii wytwarzania syntetycznego paliwa ciekłego poprzez katalizę wodoru i dwutlenku węgla otrzymanych bezpośrednio z wody morskiej [48,49]. Zakłada się, iż „własna rafineria” uniezależni lotniskowce od potrzeby tankowania paliwa dla samolotów oraz zwiększy mobilność innych okrętów. Podaje się np., iż niszczyciel rakietowy typu (np. Arleigh Burke) spala około 1000 galonów (ok. 3780 litrów) paliwa na godzinę. Konieczność okresowego uzupełniania paliwa z tankowca, w tym również przy niekorzystnych warunkach pogodowych, znacząco ogranicza możliwości operacyjne okrętu. Zakłada się, iż w wyniku dalszych badań cena paliwa z wody morskiej stanie się opłacalna (od 3 do 6 USD za galon).

Innym przykładem koncepcji Power to Fuel

A concept for powering the military bases at elimination of noise (Silent Camp) – especially at night – caused by conventional generators with combustion engines is presented in works [45, 46]. Diesel generators are used for direct powering of a base during the day and a simultaneous production of hydrogen. The hydrogen and the system of fuel cells (PEM) are used at night. The hybrid system allows for greater flexibility of fuel supplies and lower burden for the environment.

The idea of using fuel cells of PEM type as an auxiliary source of supply (Fuel Cell Auxiliary Power Unit - FC APU) in trucks of medium loading capacity of 5 tons (Family Medium Tactical Vehicles – FMTV) was presented in [46]. The fuel cell is integrated with the reformer what enables the use of the same fuel (JP8) as for combustion engine. Power management system allows e.g. for the use of electric system in the rest when the idling is eliminated as well what additionally reduces the noise (Silent Watch). On the other hand during the maximal consumption of power at driving two systems may be used (combustion and electric). It is estimated that during 10 hour driving and 10 hour rest the consumption of fuel may be reduced by 20.1%.

The development of technology for production of a synthetic liquid fuel through the catalysis of hydrogen and carbon dioxide obtained directly from the sea water [48,49] was a result of 10 year research program of U.S. Naval Research Laboratory. It is assumed that “own refinery” may make the aircraft carriers independent from a need of taking the fuel for planes and may increase the mobility of other ships. An example is given that the rocket destroyer of e.g. Arleigh Burke class spends ca. 1000 gallons (ca. 3780 litres) of the fuel per hour. The necessity for periodical refuelling from a tanker, including the adverse weather conditions, significantly reduces the operational capacities of the ship. It is assumed that in the result of further research work the price of the fuel made from sea water becomes payable (from 3 to 6 dollars per gallon).

Another example of the conception

jest hybrydowy układ zawierający ogniwa słoneczne i paliwowe (projekt zrealizowany przez Naval Air Warfare Center). Mobilny system o mocy 5 kW zamontowany jest na standardowej przyczepie (rys.8) i pozwala wytwarzać prąd oraz wodór używany następnie do zasilania ogniw paliwowych [41].

3. Wnioski

- 1) Współczesne zastosowania militarne wodoru i ogniw paliwowych dotyczą zasilania: pojazdów załogowych (czołgi, samochody, okręty podwodne oraz nawodne, niewielkie samoloty) oraz bezzałogowych (UAV, UGV, UUV, torpedy, sterowane miny), przenośnych indywidualnych źródeł zasilania na potrzeby żołnierza oraz jego wyposażenia (komputery przenośne, radiostacje, telefony). Wiele uwagi poświęca się obecnie generatorom energii dla mobilnych baz wojskowych oraz centrów dowodzenia (agregaty prądotwórcze, w tym o mocach powyżej 1 MW, itp.).
- 2) Zaletą rozwiązań jest dwukrotnie większa sprawność (w porównaniu z układami wykorzystującymi silniki spalinowe), cicha praca (ang.: low noise signature) i niewielki tzw. ślad termiczny (ang.: low heat signature), co łącznie utrudnia wykrycie. Istotna jest także wysoka niezawodność (brak części ruchomych, eliminacja smarowania), bezobsługowość (minimalne koszty utrzymania) i zdalne sterowanie, niska emisja substancji szkodliwych.
- 3) Ważnym atutem omawianych powyżej rozwiązań jest też możliwość wytworzenia paliwa na miejscu (elektrolizery) czy też wykorzystanie dostępnych lokalnie innych źródeł energii (wiatr, słońce) i paliw (z użyciem tzw. reformerów) do wytworzenia wodoru.
- 4) Technologie wykorzystania wodoru i ogniw paliwowych w siłach zbrojnych zaliczane są już do tzw. dojrzałych i stają się jedną z miar zaawansowania technologicznego i mobilności sił zbrojnych. Dodatkowym atutem jest fakt, iż aplikacje mogą

Power to Fuel is a hybrid system including solar panels and fuel cells (the project is developed by Naval Air Warfare Center). The mobile system of 5 kW power is integrated in a standard trailer (Figure 8) and produces the electric current and hydrogen which is next used to power fuel cells [41].

3. Conclusions

- 1) Contemporary military applications of hydrogen and fuel cells are connected with powering: manned vehicles (tanks, cars, submarines, ships, small planes) and unmanned (UAV, UGV, UUV, torpedoes, controlled mines), portable individual sources of supply for soldier and his equipment (portable computers, radios, telephones). A lot of attention is attached now to energy generators for military bases and command centres (electric generators including those with powers above 1 MW, etc.).
- 2) These solutions provide two times greater efficiency (comparing to systems exploiting combustion engines), low noise signature and low heat signature what makes their detection more difficult. High dependability is also important (lack of moving parts and lubrication) both with no need for servicing personnel (minimal costs of operation) and remote control and low emission of harmful substances.
- 3) A possibility for producing the fuel in the site (electrolysers) is also important argument for solutions discussed above both with using other sources of energy which are locally available (wind, sun) or fuels (by using so called reformers) for production of hydrogen.
- 4) Technologies for exploiting the hydrogen and fuel cells in armed forces have been already reckoned as matured ones and become used as an indicator of technological progress and mobility for armed forces. These applications may be in most cases used as double purpose technologies what is another positive aspect. It

być w większości technologiami podwójnego zastosowania. Pozwala to postulować stworzenie wieloletniego programu badań i wdrożeń na potrzeby Sił Zbrojnych RP.

justifies the postulation for creating a long term research and implementation program for the needs of the Polish Armed Forces.

Literatura / Literature

- [1] Andújar, J. M.; Segura, F. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2009, 2309-2322.
- [2] St-Pierre, J.; Wilkinson, D. P. Fuel cells: a new, efficient and cleaner power source. *AIChE Journal*, 2001, 1482-1486.
- [3] Kreuer, K. D., Ed. *Fuel cells. Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*; Springer: New York, 2013.
- [4] Storer, D.; Menzato, G.; Kleschinsk, M.; Strubel, V.; Kiener, B.; Kaleta, J.; Gąsior, P.; Błażejowski, W.; Mair, G.; Gregor, C. The development of an innovative on-board CNG storage system for methane-fuelled cars conducted within the FP7 EU project 'InGAS'. *TRA 2014: Transport Research Arena 2014: transport solutions from research to deployment - innovative mobility, mobilise innovation!*, Paris, 2014.
- [5] Gąsior, P.; Kaleta, J.; Sankowska, A. Optical fiber sensors in health monitoring of composite high pressure vessels for hydrogen. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, Proc. of SPIE 66163G-1-66163G-10*, Munich, 2007.
- [6] Rybaczuk, M. *HyCOMP project technical report - Modelling of fibres breaking process in composites*, 2011.
- [7] Eckermann, E. *World History of the Automobile*; Society of Automotive Engineers, 2001.
- [8] Michelet, H. *L'inventeur Isaac de Rivaz: 1752-1828*; Editions Saint-Augustin: Martigny, 1965.
- [9] <http://www.rocket.com/rs-25-engine>, 5.04.2015.
- [10] https://history.gmheritagecenter.com/wiki/index.php/1966_GM_Electrovan, 04.2015.
- [11] <http://worldwide.hyundai.com/WW/Showroom/Eco/ix35-Fuel-Cell/PIP/index.html>, 5.04.2015.
- [12] Gross, D. Fuel cells: 170 years of technology development—and space age experience. *Cleantech Magazine: Fuel Cell Special*, 2010.
- [13] http://de.amiando.com/eventResources/r/v/kfKncJZVrUe3Xh/Electricity_from_hydrogen_with_combined_cycles_-_The_Fusina_Project.pdf, 5.04.2015.
- [14] <http://www.newswire.ca/en/story/639027/world-s-largest-hydrogen-fuel-cell-generator-set-to-deploy>, 5.04.2015.
- [15] Scheele, O. Chlorine Plant Benefits From PEM Fuel Cells. <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2012/chlorine-plant-benefits-from-pem-fuel-cells>, 5.04.2015.
- [16] http://www.fch-ju.eu/sites/default/files/documents/ga2010/patrick_francoisse.pdf, 5.04.2015.
- [17] Gąsior, P.; Kaleta, J.; Brzeżański, M.; Papuga, T.; Woznikowski, E. The use of waste hydrogen for energy purposes in Poland. *European Hydrogen Energy Conference - EHEC 2014*, Seville, March 12th - 14th, 2014.

- [18] <http://skotansa.pl/art/45/projekt-wodorowy.html>, 5.04.2015.
- [19] Gąsior, P.; Kaleta, J. Waste Hydrogen Pipelines Monitoring in Modern Power Plant. *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Nantes, 2014.
- [20] <http://www.fuelcelleducation.org/wp-content/themes/sandbox/pdf/History%20of%20Hydrogen.pdf>, 5.04.2015.
- [21] Lawrence, J. W. *Toward a liquid hydrogen fuel economy.*; University of Michigan Environmental Action for Survival Teach In.: Michigan, 1970.
- [22] Matsunaga, M.; Fukushima, T.; Ojima, K. . Advances in the Power train System of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle. *SAE Technical Paper*, 2009.
- [23] European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform. <http://www.fch-ju.eu/page/who-we-are>, 5.04.2015.
- [24] DOE Hydrogen and Fuel Cells Programm: Missions and Goals. <http://www.hydrogen.energy.gov/mission.html>, 5.04.2015.
- [25] Hydrogen and Fuel Cells in Korea. <http://www.iphe.net/docs/Meetings/SC21/Country%20Reports/Korea%20Country%20Update.pdf>, 5.04.2015.
- [26] Towards a National Hydrogen & Fuel Cell Strategy: A Discussion Document for Canada. <http://www.h2fcprogress.collaboration.gc.ca/publ/pdf/str-str-eng.pdf>, 5.04.2015.
- [27] National Hydrogen and Fuel Cell Technology Innovation Programme (Germany). <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Industries/Smarter-business/Smart-mobility/national-hydrogen-and-fuel-cell-technology-innovation-programme.html>, 5.04.2015.
- [28] Hydrogen in the French national energy strategy by Claudie Haigneré. ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/sustdev/docs/energy/sustdev_h2_keynote_haignere_en.pdf, 5.04.2015.
- [29] Balancing the Future Danish Energy System - the new Danish Strategy for Hydrogen and Fuel Cells. <http://www.hydrogennet.dk/744>, 5.04.2015.
- [30] Hydrogen and Fuel Cell guide of Sweden 2012. <http://www.vatgas.se/in-english>, 5.04.2015.
- [31] Norway – a global leader in hydrogen. http://www.hydrogen.no/assets/files/Hydrogenradet/Handlingsplan/The_Norwegian_Hydrogen_Council_Action-plan_2012-2015.pdf, 5.04.2015.
- [32] UK Innovation in Fuel Cells and Hydrogen. <http://www.cleantechinvestor.com/portal/fuel-cells/11137-tsbinfofocus.html>, 5.04.2015.
- [33] Green Tanks? <http://loe.org/shows/segments.html?programID=03-P13-00015&segmentID=1>, 5.04.2015.
- [34] U.S. Army Considering Fuel Cells on Tanks. <http://www.wired.com/2010/06/u-s-army-considering-fuel-cells-on-tanks>, 5.04.2015.
- [35] Frost, L., Hartvisgsen, J. and Elangovan, S. Logistic Fuel Reformer for TARDEC. <http://www.ceramatec.com/documents/fuel-processing/cold-plasma-reforming/Logistic-Fuel-Reformer-for-TARDEC.pdf>.
- [36] US Military Developing Futuristic Hydrogen Fuel Cell Powered Tank. <http://electrovelocity.com/2010/07/13/us-military-developing-futuristic-hydrogen-fuel-cell-powered-tank>, 5.04.2015.
- [37] GM Reveals Fuel-Efficient Truck To Army. <http://evworld.com/news.cfm?newsid>

=3169, 5.04.2015.

- [38] US Navy's liquid hydrogen drone flies for record 48 hours. <http://rt.com/usa/us-navy-drone-record-166>, 5.04.2015.
- [39] U36: Another Fuel Cell Submarine for the German Navy. <http://fuelcelltoday.com/news-archive/2013/may/u36-another-fuel-cell-submarine-for-the-german-navy,04.2015>.
- [40] Forget What DARPA Is Pushing These Days, Here's A Look At Vintage GM Military Prototypes. <http://gmauthority.com/blog/2014/07/forget-what-darpa-is-pushing-these-days-heres-a-look-at-vintage-gm-military-prototypes>, 5.04.2015.
- [41] Keller, J. Navy to field-test hydrogen fuel cell- and solar-powered military renewable energy system. <http://www.militaryaerospace.com/articles/2013/03/Navy-renewable-energy.html>, 5.04.2015.
- [42] http://en.wikipedia.org/wiki/Type_212_submarine#/media/File:U_Boot_212_HDW_1.jpg, 5.04.2015.
- [43] Hybrid Fuel Cell Power System for Submersible Applications. <http://www.fuelcellenergy.com/assets/Underwater-Propulsion.pdf>, 5.04.2015.
- [44] FuelCell Awarded \$3.8 Million for US Navy UUV Power System. <http://www.unmanned.co.uk/unmanned-vehicles-news/unmanned-autonomous-underwater-vehicles-uuv-auv-news/fuelcell-awarded-3-8-million-for-us-navy-uuv-power-system>, 5.04.2015.
- [45] Proton Energy Systems Fuels U.S. Army. http://www.fuelcellmarkets.com/Proton_OnSite_Hydrogen_Electrolysers_Fuelling/news_and_information/3,1,427,1,27703.html, 5.04.2015.
- [46] Proton Energy aids Silent Camp for US Army. *Fuel Cells Bulletin*, 2008.
- [47] Filipi, Z.; Louca, L.; Stefanopoulou, A.; Pukrushpan, J. Fuel Cell APU for Silent Watch and Mild Electrification of a Medium Tactical Truck. *SAE Technical Paper 2004-01-1477*, 2004.
- [48] Engelking, C. U.S. Navy Wants to Fuel Ships Using Seawater. <http://blogs.discovermagazine.com/d-brief/2014/04/08/u-s-navy-can-convert-seawater-fuel/#.VSrZNFmsXSF>, 5.04.2015.
- [49] Coxworth, B. Navy powers model plane using fuel made from sea water. <http://www.gizmag.com/seawater-hydrocarbon-fuel-airplane/31569>, 5.04.2015.

