

Adam Polak<sup>1)</sup>

## KONCEPCJA ZASTOSOWANIA SYSTEMU OGNIWA PALIWOWEGO PEM DO ZASILANIA POJAZDU PODWODNEGO

### A CONCEPT FOR APPLICATION OF A PEM FUEL CELL IN AN UNDERWATER VEHICLE

**STRESZCZENIE** W artykule przedstawiono koncepcję zamiany głównego źródła zasilania elektrycznego w pojeździe podwodnym Neptune SB-1, jakim jest akumulator kwasowy, na system ogniwa paliwowego PEM. Po sprecyzowaniu wymagań energetycznych pojazdu dobrano system ogniwa paliwowego oraz magazyny wodoru i tlenu. Wykazano, że wykorzystanie systemu ogniwa paliwowego pozwoli na zmagazynowanie w pojeździe większej ilości energii, co umożliwi wydłużenie czasu autonomicznego działania pojazdu podwodnego.

Słowa kluczowe:

źródła zasilania, ogniwa paliwowe PEM, pojazdy podwodne.

**ABSTRACT** This paper presents a concept for a change in the main electric power supply in a Neptune SB-1 underwater vehicle, which is an acid battery, for a fuel cell system of hydrogen and oxygen. On specifying the vehicle's energy requirements a fuel cell system, and hydrogen and oxygen stores were selected. It is demonstrated that a fuel cell system can be used to store a larger amount of energy in a vehicle, which will extend endurance of an autonomous underwater vehicle.

Keywords:

power supply sources, PEM fuel cells, underwater vehicles.

DOI: 10.5604/0860889X.1114758

---

<sup>1)</sup> Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, 81-103 Gdynia, ul. J. Śmiedowicza 69; e-mail: a.polak@amw.gdynia.pl

## WSTĘP

W obecnych czasach wiele zadań realizowanych w środowisku podwodnym powierzanych jest bezzałogowym pojazdom podwodnym. Oczywistym warunkiem wykonania misji jest zapewnienie zasilania w energię urządzeń i systemów pojazdu podwodnego. Często spotykanym sposobem jest umieszczenie źródła energii w samym pojeździe. Takie rozwiązanie sprawia, że czas działania pojazdu jest bezpośrednio uzależniony od ilości zmagazynowanej energii, a pośrednio od sprawności przemian energetycznych zachodzących w systemie zasilania.

Dla długotrwałych misji, podczas których pojazd nie może uzupełnić zapasu energii, pożądane jest stosowanie źródła energii elektrycznej o wysokiej sprawności oraz o wysokim współczynniku grawimetrycznej i wolumetrycznej gęstości energii. Obecnie jednym z najlepszych pod tym względem źródeł są ogniwa paliwowe, w szczególności ogniwa paliwowe z membraną protonoprzewodzącą (PEM) [2, 4]. Cechuje je wysoka sprawność przetwarzania energii chemicznej w elektryczną, relatywnie niska temperatura pracy (<100°C) oraz, w porównaniu z innymi źródłami energii elektrycznej, wysokie współczynniki gęstości energii.

Zastosowanie ogniw paliwowych w pojeździe podwodnym wiąże się jednak z koniecznością zapewnienia odpowiedniej ilości dostarczanych do niego reagentów (wodoru i tlenu). W tym momencie pojawia się wątpliwość, czy zamiana stosowanego źródła zasilania elektrycznego

## INTRODUCTION

At present a lot of missions carried out in the underwater environment are assigned to unmanned underwater vehicles, therefore it is obvious that in order to conduct a mission the vehicle's appliances and systems have to be supplied with power. A method often used is to place the power source in the vehicle itself. When such a solution is applied, the length of time a vehicle can operate depends on the amount of stored energy, and indirectly on the efficacy of changes in energy occurring in the supply system.

For long missions, during which the vehicle cannot be resupplied with energy it is desirable to use a source of electric energy having high efficiency, and a high ratio of gravimetric and volumetric energy density, especially as found in fuel cells with a proton exchange membrane (PEM) [2, 4]. They are characterized by highly efficient energy conversion from chemical into electric, and a relatively low performance temperature (<100°C) and, as compared with other sources of energy, high energy density ratios.

Using fuel cells in an unmanned underwater vehicle requires providing it with an appropriate amount of reagents (both hydrogen and oxygen). At this moment there arise doubts whether the change of the power system used at present (an acid battery in the vehicle under consideration) will produce the desired benefits or even whether it is at all possible.

(tu akumulator kwasowy) na system ogniwa paliwowego przyniesie pożądane korzyści i czy w ogóle jest możliwa.

W artykule przedstawiono koncepcję zamiany głównego źródła zasilania elektrycznego na bezzałogowym pojeździe podwodnym, tj. akumulatora kwasowego, na system ogniwa paliwowego typu PEM. W pierwszej części scharakteryzowano pojazd podwodny pod względem jego potrzeb energetycznych, następnie wytypowano odpowiedni dla niego system ogniwa paliwowego PEM wraz z magazynami tlenu i wodoru oraz dokonano porównania systemów zasilania.

### **CHARAKTERYSTYKA POJAZDU PODWODNEGO**

Pojazdem podwodnym, dla którego przeprowadzono analizę zastosowania ogniwa paliwowych PEM jako głównego źródła zasilania, jest zdalnie sterowany autonomiczny NEPTUNE SB-1 o konstrukcji mechanicznej złożonej z dwóch kadłubów: wewnętrznego i zewnętrznego (fot. 1.).

Wewnętrzny kadłub to grubościenna obustronnie zamknięta szklana rura (o wym. wew. 420 x 120 mm), w której umieszczone jest wyposażenie pojazdu. Między kadłubem wewnętrznym a zewnętrznym znajduje się balast pojazdu zapewniający jego właściwą pływalność. Pojazd może zmieniać wyporność, przez co możliwa jest zmiana pływalności od wartości dodatnich do ujemnych. W przypadku pływania podwodnego istnieje ponadto możliwość dynamicznej zmiany głębokości pływania poprzez odpowiednie wychylenie sterów głębokości.

This article presents a concept for changing the main source of electric power supply in an unmanned underwater vehicle, i.e. from an acid battery, to a PEM fuel cell. In the first part of the article the vehicle under consideration is characterized with regard to its energy needs, then a PEM fuel cell system, appropriate for this vehicle, is chosen along with hydrogen and oxygen storage, and compared with a supply system based on an acid battery.

### **THE CHARACTERISTICS OF THE UNDERWATER VEHICLE**

PEM fuel cells were analyzed as the main source of power supply for an underwater vehicle NEPTUNE SB-1, which is remotely controlled and autonomous with regard to power supply. The mechanical structure of the vehicle consists of two hulls: inner and outer (photo 1).

The inner hull is made in the form of a thick-walled glass tube (of inner dimensions 420 x 120 mm) enclosed on two sides where all the vehicle equipment is housed. The vehicle ballast is placed between the outer hull and the inner hull. It provides proper seaworthy capabilities. Owing to an air bladder the vehicle can change its displacement which makes it possible to smoothly change its buoyancy values from negative to positive. When moving submerged, the vehicle can additionally execute changes in depth by appropriately laying the rudder. Table 1 shows the basic technical particulars of the underwater vehicle.



Fot. 1. Zdalnie sterowany pojazd podwodny Neptune SB-1

Photo 1. Remotely controlled underwater vehicle Neptune SB-1

Źródło / Source: NEPTUNE SB-1 Instruction Manual, <http://www.thundertiger.com>.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne pojazdu SB-1

Table 1. The basic technical particulars of the vehicle SB-1

Wyporność / Displacement	kg	7,7 na powierzchni 7,95 w zanurzeniu 7,7 on surface 7,95 submerged
Długość całkowita / Length	mm	774
Szerokość maksymalna / Beam	mm	290
Zanurzenie / Draft	mm	200
Wysokość / Height	mm	285
Napęd / Propulsion	-	silnik DC 12 V DC 12 V motor
Pędnik / Propeller	-	śruba 40 mm 40 mm blade
Prędkość / Speed	km/h	2,7 na powierzchni 2,7 on surface 2 w zanurzeniu 2 submerged
Nominalna głębokość działania Nominal operating depth	m	5
Maksymalna głębokość działania (ze względu na wytrzymałość mechaniczną) Maximum operating depth (with regard to mechanical strength)	m	10

Źródło / Source: NEPTUNE SB-1 Instruction Manual, <http://www.thundertiger.com>.

**SYSTEM ELEKTROENERGETYCZNY**

Pojazd podwodny napędzany jest przez układ składający się z silnika prądu stałego oraz trzyłopatowej śruby napędowej. Regulacja prędkości obrotowej silnika napędowego realizowana jest przez sterownik włączony w obwód zasilania silnika. Pozostałe odbiory energii elektrycznej w pojeździe podwodnym to: silnik napędowy pompy balastowej, serwomechanizm steru głębokości, serwomechanizm steru kierunku, moduł komunikacyjny, komputer pokładowy oraz czujniki ciśnienia i zalania. Odbiorniki zostały podzielone funkcjonalnie na trzy grupy. Grupa A to urządzenia napędowe odpowiedzialne za ruch pojazdu: silnik napędzający śrubę napędową pojazdu oraz silnik napędzający pompę balastową pojazdu. Grupa B to urządzenia wykonawcze sterowania: serwomechanizmy sterownicze. Grupa C to urządzenia sterownicze: sterowniki napędu pompy balastowej i głównego silnika napędowego, moduł komunikacyjny oraz czujniki. Do zasilania tych odbiorów wykorzystywany jest akumulator kwasowo-ołowiowy, o parametrach podanych w tabeli 2., w połączeniu z układem zarządzania energią i stabilizacji napięcia o sprawności  $\eta_{st} = 0,9$ .

System elektroenergetyczny pojazdu przedstawiono na rysunku 1., a parametry jego urządzeń w tabeli 3. W zestawieniu odbiorów energii elektrycznej umieszczono dodatkowe informacje o rodzaju pracy urządzenia (D — praca dorywcza, C — praca ciągła, Z — obciążenie zmienne, S — obciążenie stałe).

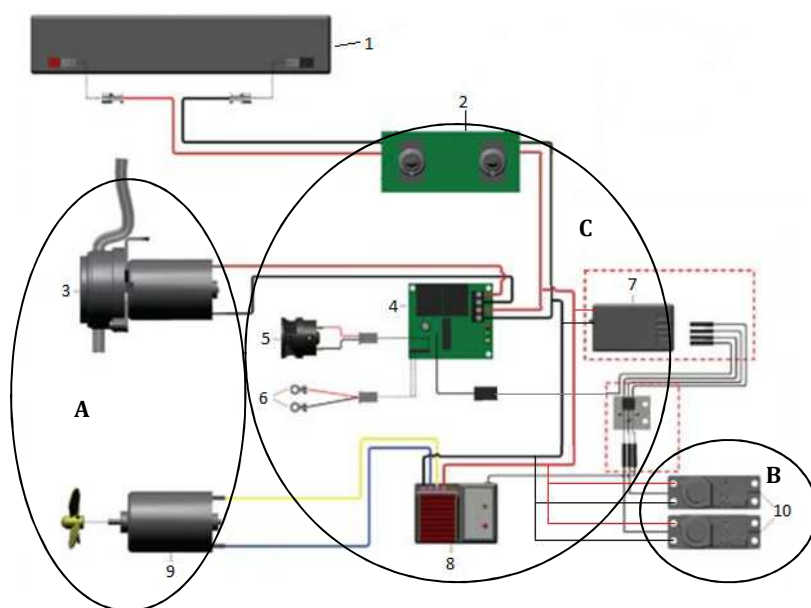
**ELECTRIC ENERGY SYSTEM**

The underwater vehicle is powered by a system comprising a DC motor and a three-bladed propeller. The rotating speed of the propulsion motor is regulated through a driver connected to the motor supply circuit. The other electric energy receivers are: a motor driving a ballast pump, a diving plane servomechanism, a direction rudder servomechanism, a communication module, an on-board computer, and pressure and flooding sensors. The receivers were functionally divided into three groups. Group A includes propulsion devices responsible for the vehicle's movement: a motor driving the vehicle's propeller and a motor driving the vehicle's ballast pump. Group B includes steering execution devices: control servomechanisms. Group C includes control devices: ballast pump propulsion and main propulsion motor drivers, and a communication module and sensors. To supply these receivers with power a lead acid battery is used in connection with an energy management and constant regulation system having efficiency  $\eta_{st} = 0,9$ . Its particulars are given in table 2.

The electric energy system of the vehicle is presented in figure 1 and the particulars of the devices in table 3. It also contains additional information relating to the type of duty for each device (D — short-time duty, C — continuous duty, Z — changing load, S — steady load).

Tabela 2. Parametry akumulatora zasilającego / Table 2. Particulars of the power supply battery

Pojemność / Capacity	Ah	2,2
Pojemność / Capacity	Wh	26,4
Napięcie nominalne / Nominal voltage	V	12
Masa / Weight	g	960
Wymiary / Dimensions		
długość / length	mm	178
szerokość / width		61
wysokość / height		34
Objętość / Volume	cm <sup>3</sup>	370



Rys. 1. Uproszczona struktura systemu elektroenergetycznego pojazdu z zaznaczonymi grupami funkcjonalnymi urządzeń: 1 — źródło zasilania elektrycznego (akumulator kwasowy), 2 — moduł zarządzania energią (stabilizator napięcia), 3 — silnik z pompą balastową, 4 — sterownik pompy balastowej, 5 — czujnik ciśnienia, 6 — czujnik zalania, 7 — moduł komunikacyjny, 8 — sterownik silnika, 9 — silnik ze śrubą napędową, 10 — serwomechanizmy sterownicze; A — grupa urządzeń napędowych, B — grupa wykonawczych urządzeń sterowania pojazdem, C — grupa urządzeń sterowania i komunikacji

Fig. 1. A simplified structure of the electric energy system in a vehicle with functional groups of devices marked: 1 — an electric power supply source (acid battery), 2 — an energy management module (constant voltage regulator), 3 — a motor with a ballast pump, 4 — ballast pump driver, 5 — a pressure sensor, 6 — a flooding sensor, 7 — a communication module, 8 — a motor driver, 9 — a motor with a propeller, 10 — control servomechanisms; A — a group of propulsion devices, B — group of vehicle's steering execution devices, C — a group of control and communication devices

Tabela 3. Zestawienie urządzeń systemu elektroenergetycznego z podziałem na grupy urządzeń  
 Table 3. Devices in the electric energy system divided into groups of devices

Grupa urządzeń Group of devices	Urządzenie Device	Praca Duty	$U_n$ [V]	$I_n$ [A]	$P_n$ [W]
A	Silnik napędu śruby ze sterownikiem Propeller motor with driver	Z	12	1,8	21,6
	Silnik napędu pompy balastowej Ballast pump motor	D/Z	12	1,8	21,6
B	Serwomechanizm steru głębokości Diving plane servomechanism	D/S	12	0,15	1,8
	Serwomechanizm steru kierunku Direction rudder servomechanism	D/S	12	0,15	1,8
C	Wszystkie urządzenia grupy C All devices in group C	C/S	12	0,1	1,2
			<b>Σ</b>	<b>4</b>	<b>48</b>

### STANY CHARAKTERYSTYCZNE POJAZDU

W celu właściwego doboru mocy źródła zasilania elektrycznego dla pojazdu podwodnego określono główne, najbardziej długotrwałe stany charakterystyczne. W czasie autonomicznego pływania pojazdu podwodnego istnieje możliwość wyodrębnienia powtarzalnych charakterystycznych trybów pracy pod względem zapotrzebowania energetycznego. Każdy z tych trybów cechuje inny zbiór pracujących urządzeń. Dla przykładu, podczas stanu charakterystycznego pojazdu podwodnego, jakim jest zanurzenie dynamiczne, mogą pracować wszystkie urządzenia będące na jego wyposażeniu, a w przypadku pływania na stałej głębokości mogą pracować tylko urządzenia komunikacyjne i sterownicze oraz silnik napędowy śruby.

Zestawienie możliwych stanów charakterystycznych autonomicznego pojazdu podwodnego w tabeli 4.

### CHARACTERISTIC STATES OF THE VEHICLE

In order to select the appropriate power for the electric supply source for an underwater vehicle the main, longest-lasting characteristic states were determined. In the course of the autonomous sailing of an underwater vehicle it is possible to set apart the repetition of characteristic modes of work with regard to energy demand. Each of the modes is characterized by a different set of working devices. For example, in the characteristic state of an underwater vehicle such as a dynamic dive all the devices the vehicle is equipped with can work, and in the case of floating at a constant depth only communication, control devices, and the propeller motor can work.

The possible characteristic states of an autonomous underwater vehicle are shown in table 4.

Tabela 4. Stany charakterystyczne pojazdu / Table 4. Characteristic states of a vehicle

Tryb pracy Mode of work	Urządzenie Device	Silnik napędu śruby Propeller motor	Silnik pompy balastowej Ballast pump motor	Serwomechanizm steru kierunku Direction rudder servomechanism	Serwomechanizm steru głębokości Diving plane servomechanism	Urządzenia sterowania i komunikacji Control and communications devices	Sumaryczna moc urządzeń w danym trybie pracy [W] Total Power of devices in a given mode of work [W]
Pływanie nawodne On surface floating		X		X		X	24,6
Zanurzenie/wynurzenie statyczne lub wynurzenie awaryjne Static diving/surfacing or emergency surfacing			X			X	22,8
Zanurzenie/wynurzenie dynamiczne Dynamic diving/surfacing		X	X	X	X	X	48
Pływanie podwodne (stała głębokość) Submerged floating (constant depth)		X		X		X	24,6
Pływanie podwodne (zmienna głębokość) Submerged floating (changing depth)		X		X	X	X	26,4

Zakładając ograniczenie możliwości jednoczesnej pracy dwóch największych odbiorników energii elektrycznej, tj. silnika napędowego śruby oraz silnika napędowego pompy balastowej, największa zapotrzebowana moc w czasie pracy pojazdu wynosi  $P_{\max} = 26,4$  [W]. Uwzględniając sprawność układu stabilizacji napięcia, źródło zasilania powinno dysponować mocą  $P_{zr} = P_{\max} / \eta_{st} = 29,4$  [W].

### SCENARIUSZ DZIAŁANIA

Dla określenia pojemności źródła zasilania elektrycznego przyjęto scenariusz działania pojazdu podwodnego

When limitation of the possibility for the two biggest energy receivers to work simultaneously, i.e. the propeller motor and the ballast pump motor, is assumed, the highest power demand during the vehicle's work is  $P_{\max} = 26,4$  [W]. Taking into account the efficiency of the voltage regulation system the supply source should offer power  $P_{zr} = P_{\max} / \eta_{st} = 29,4$  [W].

### SCENARIO FOR ACTION

In order to determine the capacity of an electric power supply source a scenario of action was adopted which involved recording hydro-acoustic data.



polegający na rejestracji danych hydroakustycznych. Ponadto założono, iż moc zapotrzebowana przez pasywny system akwizycji danych hydroakustycznych w porównaniu do pozostałych systemu elektroenergetycznego pojazdu jest na tyle mała, że nie została w dalszych kalkulacjach uwzględniona.

Czas pracy pojazdu w poszczególnych stanach charakterystycznych w założonym scenariuszu działania wraz z zapotrzebowaniem energetycznym przedstawiono w tabeli 5.

passive acquisition system, as compared with those remaining in the electric energy system of the vehicle, was so small that it was neglected in further calculations.

The length of time for the vehicle's work in particular characteristic states in the scenario of action, assumed together with the requirement for energy are shown in table 5.

Tabela 5. Zestawienie czasu pracy pojazdu w różnych stanach w założonym scenariuszu działania  
Table 5. Length of time for vehicle's work in various states in the scenario of action assumed

Stan charakterystyczny Characteristic state	Pływanie nawodne On surface floating	Zanurzenie/wynurzenie statyczne Static diving/surfacing	Zanurzenie/wynurzenie dynamiczne Dynamic diving/surfacing	Pływanie podwodne ze stałą głębokością Submerged floating with constant speed	Pływanie podwodne ze zmienną głębokością Submerged floating with changing speed	$\Sigma$
Moc maksymalna w danym stanie [W] Maximum power in a given state [W]	24,6	22,8	26,4	24,6	26,4	
Czas pracy / Time of work [h]	0,1	0,05	0,05	0,6	0,3	1,1
Energia / Energy [Wh]	2,46	1,14	1,32	14,76	7,92	27,6

Uwzględniając sprawność układu zarządzania energią i stabilizacji napięcia, energia pobrana ze źródła zasilania elektrycznego w celu realizacji założonego scenariusza działania jest równa  $Q_{\text{źr}} = 31$  [Wh].

Taking into account the efficiency of energy and voltage regulation management the energy taken from one source of electricity supply in order to realize the assumed scenario is equal to  $Q_{\text{źr}} = 31$  [Wh].

## **WYMAGANIA OBJĘTOŚCIOWO-MASOWE**

Istotne ze względu na zamierzoną zmianę źródła zasilania pojazdu są objętość i masa, jakie można przeznaczyć na kompletny system zasilania. Zachowanie niezmiętej masy pojazdu gwarantuje jego niezmiętoną pływalność. Masa, którą można przeznaczyć na źródło zasilania, to masa akumulatora  $m_a = 960$  g oraz masa obciążników balastowych  $m_b = 1206$  g. Ograniczenie objętości nie jest tak bardzo istotne, gdyż w przypadku źródła z ogniwem paliwowym reaktanty mogą być gromadzone w zbiornikach, które można umieścić pomiędzy kadłubem wewnętrznym a kadłubem zewnętrznym (w przestrzeni, w której oryginalnie znajduje się balast). Sam stos ogniw paliwowych wraz z jego sterownikiem muszą być umieszczone w kadłubie wewnętrznym, w związku z czym zakłada się, że ich objętość nie może być większa niż objętość zastępowanego akumulatora.

## **DOBÓR OGNIWA PALIWOWEGO PEM DO ZASILANIA POJAZDU PODWODNEGO**

Wymagania, które powinny być spełnione przez źródło zasilania elektrycznego dla pojazdu przedstawionego powyżej wynikają bezpośrednio z wyposażenia pojazdu podwodnego oraz charakteru jego działania. Przeprowadzona analiza systemu elektroenergetycznego pojazdu umożliwiła sprecyzowanie tych wymagań. Zostały one przedstawione w tabeli 6.

## **WEIGHT AND VOLUME REQUIREMENTS**

The volume and weight which can be set aside for a complete motor supply system are significant with regard to the intended change in the supply source. Retaining the weight of the vehicle without change provides for its unchanged seaworthy capabilities. The weight which can be assigned to the supply source includes the weight of the battery  $m_a = 960$  g and the weight of ballast weights  $m_b = 1206$  g. It is not very important to reduce the volume, as in the case of a fuel cell based source the reactants can be accumulated in tanks, which can be placed between the inner hull and the outer hull (in the space originally housing the ballast). The stack of fuel cells itself together with its driver have to be placed in the inner hull. For this reason it is assumed that their volume cannot be higher than the volume of the battery being replaced.

## **SELECTING THE PEM FUEL CELL FOR POWER SUPPLY IN AN UNDERWATER VEHICLE**

The requirements which should be met by the electricity supply source for the vehicle presented above are derived directly from the equipment in the underwater vehicle and the mode of its operation. The analysis made of the vehicle's electric energy system made it possible to precisely work out these requirements. They are presented in table 6.

Tabela 6. Wymagania dla doboru źródła zasilania elektrycznego dla pojazdu podwodnego

Table 6. Requirements for selecting electricity supply source in an underwater vehicle

Pojemność / Capacity	Wh	$\geq 31$
Moc nominalna / Nominal power	W	$\geq 29,4$
Masa całkowita / Total weight	g	$\leq 2166$
Objętość źródła / Volume of source	cm <sup>3</sup>	$\leq 370$

W wymaganiach dotyczących doboru źródła zasilania nie zostały uwzględnione parametry napięciowo-prądowe, gdyż system elektroenergetyczny rozpatrywanego pojazdu jest wyposażony w układ stabilizujący napięcie do właściwej wartości niezbędnej dla poprawnej pracy urządzeń zainstalowanych w pojeździe.

Dla tak sprecyzowanych wymagań dobrano system ogniwa paliwowego firmy Horizon. Spełniającym powyższe wymagania jest stos ogniw paliwowych PEM H-30 przedstawiony na fotografii 2. Dane techniczne zaproponowanego systemu zostały zestawione w tabeli 7.

The requirements for selecting a supply source do not include current-voltage parameters as the electric energy system in the vehicle under consideration is equipped with a system regulating the value necessary for the efficient working of the devices installed in the vehicle.

A fuel cell system selected for these requirements was made by the Horizon Company. The requirements above are satisfied by a PEM fuel cell stack H-30 presented in photograph 2. The technical particulars for the system proposed are shown in table 7.



Fot. 2. Ogniwo paliwowe PEM H-30 / Photo 2. PEM H-30 fuel cell

Źródło / Source: H-20 Fuel Cell Stack, User Manual, <http://www.horizonfuelcell.com>.

Tabela 7. Dane ogniwa paliwowego typu PEM H-30 / Table 7. Particulars of PEM fuel cell H-30

Nazwa parametru / Name	Wartość / Value	Jednostka / Unit
Typ ogniwa paliwowych / Types of fuel cell	PEM	
Liczba ogniw / Number of cells	14	-
Moc znamionowa / Rated power	30	W
Napięcie i prąd znamionowy Rated voltage and current	8,4 / 3,6	V / A
Napięcie przedmuchu / Blow-trough voltage	6	V
Napięcie wentylatora / Fan voltage	5	V
Reaktanty / Reactants	Wodór i powietrze Hydrogen and air	-
Temperatura otoczenia / Ambient temperature	5 do 30	°C
Maksymalna temperatura pracy stosu Stack work maximum temperature	55	°C
Ciśnienie wodoru / Hydrogen pressure	0,45-0,55	bar
Czystość wodoru / Hydrogen purity	99,995% suchy / dry H <sub>2</sub>	-
Nawilżanie / Wetting	Samonawilżanie Self-humidification	-
Chłodzenie / Cooling	Powietrzne / Air	-
Masa (z obudową i wentylatorem) Weight (with casing and fan)	280 (±30)	g
Masa sterownika / Weight of driver	90 (±10)	g
Wymiary / Dimensions	8 x 4,7 x 7,5	cm
Objętość / Volume	282	cm <sup>3</sup>
Przepływ H <sub>2</sub> przy obciążeniu maksymalnym H <sub>2</sub> flow at maximum loading	0,42	L/min
Czas rozruchu / Starting length of time	< 30	s
Sprawność stosu / Stack efficiency	40	%

Źródło / Source: H-20 Fuel Cell Stack, User Manual, <http://www.horizonfuelcell.com>.

Należy zauważyć, że wybrany stos ogniwa paliwowych wraz ze sterownikiem stanowi w przybliżeniu jedną trzecią masy zastosowanego oryginalnie akumulatora kwasowego. Jednakże nie jest to masa całkowita systemu zasilania z ogniwem paliwowym. Niezbędne jest również zainstalowanie w pojeździe podwodnym magazynów na wodór

It should be noted that the fuel cell stack selected together with the driver are approximately one third of the weight of the acid battery used originally. However, it is not the total weight of the fuel cell supply system. It is also necessary to install storage for hydrogen and oxygen in the underwater vehicle. The selection of the way

i tlen. Dobór technologii magazynowania wodoru i tlenu w znaczący sposób wpływa na całkowitą masę i objętość źródła zasilania.

### DOBÓR MAGAZYNU WODORU I MAGAZYNU TLENU

Aby poprawnie dobrać magazyny wodoru i tlenu, konieczna jest znajomość liczby reaktantów niezbędnych do magazynowania w pojeździe podwodnym. Wynika ona bezpośrednio z zapotrzebowania energetycznego dla przyjętego scenariusza działania i sprawności przetwarzania w systemie ogniwa paliwowego energii chemicznej w elektryczną. Przyjmując dolną wartość opałową wodoru w reakcji z tlenem na poziomie  $Q_{H_2} = 33,36$  Wh/g, gęstość wodoru w warunkach normalnych równą  $\rho_{H_2,(n)} = 0,08988$ g/L(n) [1] oraz średnią sprawność systemu ogniwa paliwowego na poziomie  $\eta_{PEM} = 0,4$ , zapotrzebowaną objętość wodoru  $V_{H_2}$  można wyznaczyć z zależności:

$$V_{H_2} = \frac{Q_{zr}}{\eta_{PEM} \cdot Q_{H_2} \cdot \rho_{H_2,(n)}}$$

Ilość tlenu niezbędnego do utlenienia tak wyliczonej ilości wodoru jest dwukrotnie mniejsza, gdyż na dwie cząsteczki dwuatomowe wodoru w reakcji z tlenem przypada jedna cząsteczka dwuatomowa tlenu. W związku z tym objętość tlenu wynika z zależności:

$$V_{O_2} = \frac{V_{H_2}}{2}$$

hydrogen and oxygen are stored has a significant effect on the total weight and the volume of the supply source.

### SELECTING STORAGE FOR HYDROGEN AND OXYGEN

In order to correctly select storage for hydrogen and oxygen it is necessary to know the number of reactants which have to be stored in an underwater vehicle. This results directly from the demand for energy in the adopted scenario of action and the efficiency of transforming chemical energy into electric energy in the fuel cell system. Assuming the hydrogen net calorific value as  $Q_{H_2} = 33,36$  Wh/g, hydrogen density in normal conditions equal to  $\rho_{H_2,(n)} = 0,08988$ g/L(n) [1] and the mean efficiency of the fuel cell system as  $\eta_{PEM} = 0,4$ , the demand for the volume of hydrogen  $V_{H_2}$  can be calculated from the dependence:

The amount of oxygen necessary for oxidation of the amount of hydrogen calculated this way is twice lower, as there falls two hydrogen two-atom molecules in reaction with oxygen for one oxygen two-atom molecule. Therefore the volume of oxygen results from the dependence:

Korzystając z powyższych zależności, wymagana do zmagazynowania objętość wodoru wynosi  $V_{H_2} = 26 L(n)$ , a objętość tlenu  $V_{O_2} = 13 L(n)$ . Dla tak sprecyzowanych ilości gazów dokonano wyboru ich magazynów. Parametry zostały zestawione w tabeli 8.

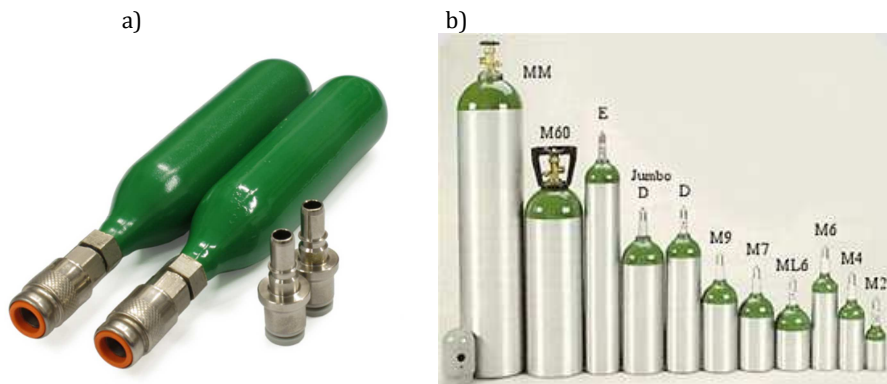
Applying the above dependences, the volume of hydrogen required for storing is  $V_{H_2} = 26 L(n)$ , and the volume of oxygen is  $V_{O_2} = 13 L(n)$ . For the amounts of gases calculated storage were selected in table 8.

Tabela 8. Specyfikacja techniczna magazynów wodoru i tlenu  
Table 8. Technical specification for hydrogen and oxygen storage

Magazyn wodoru / Hydrogen storage		Magazyn tlenu / Oxygen storage	
Wymiary zbiornika MH-10 Dimensions of holder MH-10	Φ 19 x 82 mm	Wymiary zbiornika M2 Dimensions of holder M2	Φ 59 x 194 mm
Masa / Weight	112 g	Masa / Weight	390 g
Pojemność / Capacity	10 L(n)	Pojemność / Capacity	50 L(n)
Materiał / Material	Aluminium	Materiał / Material	Aluminium
Ciśnienie ładowania Filling pressure	1 MPa	Ciśnienie nominalne Nominal pressure	20 MPa
Ciśnienie rozładowania Unfilling pressure	0,2 MPa	Objętość / Volume	0,28 L
Przepływ / Flow	0,1 L(n)/min		
Czas ładowania / Loading time	10 min		

Do przechowywania wodoru wybrano zbiorniki z wodorkami metali. W celu zmagazynowania wymaganej ilości wodoru niezbędne są trzy takie zbiorniki. Do przechowywania tlenu dobrano aluminiowy zbiornik ciśnieniowy. Objętość zmagazynowanego w tym zbiorniku gazu znacznie przekracza (około czterokrotnie) wymaganą ilość tlenu. Wynika to z braku dostępnych w ofercie producentów zbiorników tlenu o mniejszych pojemnościach. Zbiorniki na wodór i tlen pokazane są na fotografii 3.

Tanks with metal hydrides were selected for storing hydrogen. In order to store the required amount of hydrogen three such tanks are necessary. For storing oxygen a pressure aluminium container was selected. The volume of the oxygen stored in this tank substantially exceeds (approximately four times) the required amount of oxygen. This results from the lack of smaller tanks of oxygen offered by manufacturers. Tanks for hydrogen and oxygen are shown in the photograph 3.



Fot. 3. Zbiorniki na: a) wodór MH-10, b) tlen M2

Photo 3. Tanks for: a) hydrogen MH-10, b) oxygen M2

Źródło / Source: MH-10 Technical Specification, <http://pragma-industries.com>; M2 Oxygen Tank Data Specification Sheet, <http://www.beverlymedicalsupplies.com>.

## WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych kalkulacji udowodniono, że zasilanie również małych pojazdów podwodnych może zostać zrealizowane poprzez zastosowanie systemu ogniwa paliwowego PEM zasilanego czystym wodorem i tlenem. Zastąpienie obecnego źródła zasilania elektrycznego, jakim jest akumulator kwasowy, systemem ogniwa paliwowego oraz użycie zbiorników magazynujących tlen i wodór jako części balastu pojazdu nie wpłynie na pływalność pojazdu. Co więcej, za pomocą zaproponowanego systemu zasilania elektrycznego pojazdu podwodnego możliwe jest zgromadzenie większej ilości energii w pojeździe w stosunku do akumulatora kwasowego. Ponadto wykorzystując całą masę obciążników balastowych na magazyny gazów reakcyjnych, można czterokrotnie zwiększyć ilość zgromadzonej w pojeździe energii w stosunku do energii zgromadzonej w akumulatorze.

## CONCLUSIONS

As a result of the calculations made it has been proved that small underwater vehicles can also be supplied with power from a PEM fuel cell system supplied with pure hydrogen and oxygen. Replacing the present electricity supply source, such as an acid battery, for a fuel cell system and using tanks storing oxygen and hydrogen as part of the vehicle's ballast will not affect the vehicle's seaworthy capabilities. Moreover, using the system for supplying an underwater vehicle with electric power it is possible to accumulate a larger amount of energy in the vehicle as compared with an acid battery. In addition using the ballast weights for reactant gas storage it is possible to increase fourfold the amount of energy stored in the vehicle as compared to the energy accumulated in a battery.

The concept presented does not include an analysis relating to the method

Przedstawiona koncepcja nie zawiera analizy związanej ze sposobem zasilania (metodą podawania) tlenu do „powietrznego” stosu ogniwa paliwowego PEM, magazynowania wody odpadowej z ogniwa paliwowego oraz zarządzania ciepłem powstałym w wyniku pracy ogniwa paliwowego. Zagadnienia te zaplanowano zaprezentować w kolejnym artykule.

whereby oxygen is supplied to the ‘air’ stack of a PEM fuel cell (feed method), storing waste water from the fuel cell and managing the heat generated as the result of fuel cell work. These issues are to be presented in the next article.

## **BIBLIOGRAFIA / REFERENCES**

- [1] Atkins P. W., *Chemia fizyczna*, PWN, Warszawa 2007 [*Chemical Physics — available in the Polish*].
- [2] Barbir F., *PEM Fuel Cells, Theory and Practice*, Springer, San Diego 2012.
- [3] *H-20 Fuel Cell Stack, User Manual*, <http://www.horizonfuelcell.com>.
- [4] Lee C. H., Yang J. T., *Modeling of the Ballard-Mark-V proton exchange membrane fuel cell with power converters for applications in autonomous underwater vehicles*, 'Journal of Power Sources', 2011, Vol. 196, pp. 3810–3823.
- [5] *M2 Oxygen Tank Data Specification Sheet*, <http://www.beverlymedicalsupplies.com>.
- [6] *MH-10 Technical Specification*, <http://www.pragma-industries.com>.
- [7] *NEPTUNE SB-1 Instruction Manual*, <http://www.thundertiger.com>.