

**Mariusz Matejski¹⁾, Mariusz Dramski²⁾,
Sławomir Jaszczak³⁾, Tadeusz Graczyk¹⁾**

ANALIZA SYSTEMU ENERGETYCZNEGO POJAZDU GŁĘBINOWEGO W CELU MODYFIKACJI JEGO UKŁADU ZASILANIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono system wykrywania obiektów technicznych, przeznaczony do badań głębokowodnych, z pojazdem głębinowym o nazwie KRAB – nośnikiem aparatury. Omówiono charakterystykę systemu i uwarunkowania techniczne dotyczące jego bilansu energetycznego. Rozważania te stanowią podstawę do optymalizacji układu zasilającego pod kątem wprowadzenia nowych alternatywnych źródeł zasilania. Pozwoli to na minimalizację przekroju kabli zasilających wchodzących w skład kabloliny łączącej pojazd głębinowy ze stacją kontroli.

Słowa kluczowe: pojazd głębinowy, ROV, system energetyczny pojazdu głębinowego, układ zasilania.

WSTĘP

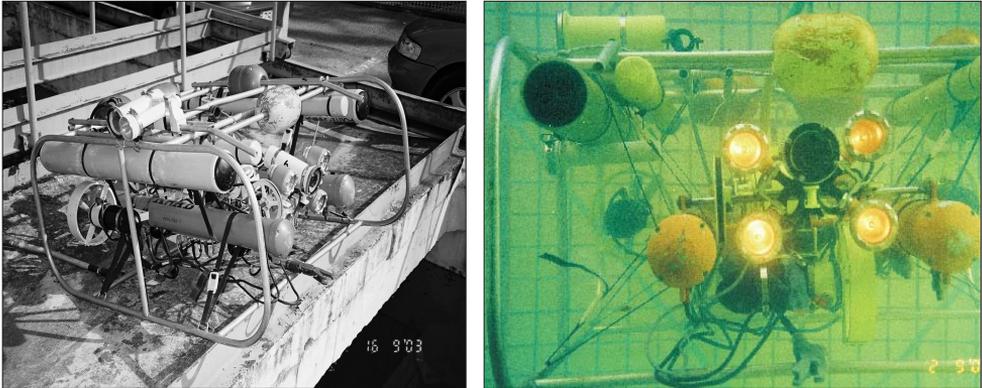
Nieodzowny postęp wiedzy dotyczący środowiska naturalnego stawia przed zespołami badawczymi nowe wyzwania. W Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie został zbudowany system wykrywania obiektów technicznych (SWOT), głównie z myślą o monitoringu strefy przydennej Morza Bałtyckiego oraz akwenów śródlądowych, ale przydatny również dla realizacji innych zadań, w tym monitoringu kadłubów jednostek pływających i ich układów napędowych. W skład systemu wchodzi pojazd głębinowy typu ROV (ang. remotely operated vehicle) – bezzałogowy, zdalnie sterowany pojazd głębinowy KRAB (rys. 1).

Celem niniejszego opracowania jest analiza uwarunkowań technicznych dotyczących bilansu energetycznego systemu oraz określenie możliwości wprowadzenia nowych dodatkowych źródeł zasilania w postaci baterii szybkoładujących kondensatorów Ultracap. Pozytywna ocena wprowadzonego rozwiązania pozwoliłaby na minimalizację przekroju przewodów zasilających znajdujących się w kablolinie, a tym samym zmniejszenie przekroju poprzecznego samej kabloliny, co wpływa z kolei na zmniejszenie oporu i polepszenie właściwości manewrowych pojazdu głębinowego, zwłaszcza w warunkach dużych głębokości i pracy w prądzie wodnym [2].

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

²⁾ Wydział Zarządzania i Ekonomiki Usług, Uniwersytet Szczeciński.

³⁾ Wydział Informatyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.



Rys. 1. Pojazd głębinowy KRAB przygotowany do badań i w toni wodnej

UWARUNKOWANIA ZAPOTRZEBOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ POJAZDY TYPU ROV

Pojazdy typu ROV zasilane są energią dostarczaną za pośrednictwem kablino-ny łączącej pojazd ze stacją kontroli. Przekroje kabli zasilających obliczane są przy uwzględnieniu maksymalnego zapotrzebowania na energię, czyli przy pełnej mocy pędników pojazdu, całkowitym oświetleniu i funkcjonowaniu wszystkich pozostałych odbiorników. Takie podejście do zagadnienia prowadzi do przewymiarowania tych przekrojów w stosunku do rzeczywistego zapotrzebowania na energię elektryczną. W artykule zaprezentowano pomysł stworzenia energetycznego bufora w postaci kondensatorów systemu Ultracap, który w momencie zapotrzebowania na energię poniżej wartości średnich byłby ładowany, natomiast pobory szczytowe prądu (powyżej średniej) byłyby z tego systemu uzupełniane.

System Ultracap jest jednym z nowoczesnych systemów przechowywania energii. Ten zoptymalizowany system jest obecnie wykorzystywany między innymi w wielu nowoczesnych hybrydowych wersjach pojazdów samochodowych. Kondensatory te znacząco różnią się od innych klasycznych metod przechowywania energii takich jak akumulatory. Potrzebują zdecydowanie mniej miejsca na przechowanie tej samej ilości energii, są bardziej wydajne i niezawodne, mogą przechować więcej energii. Poza tym, dzięki eliminacji wszelkich ruchomych części ich obsługa jest znacznie łatwiejsza. Nowy system wyróżnia się m.in. drastycznym ograniczeniem strat przechowywanej energii, a dzięki ulepszonemu systemowi chłodzenia, także znacznym wydłużeniem żywotności. W skład proponowanej modyfikacji wchodziłaby również jednostka sterująca pozwalająca na optymalną gospodarkę energią elektryczną dostarczaną za pośrednictwem kablino-ny do pojazdu typu ROV.

W artykule skupiono się na oszacowaniu wartości średnich zapotrzebowania na energię elektryczną w trakcie wykonywania wybranych zadań przez pojazd typu ROV.

Ponieważ pojazdy typu ROV pełnią głównie rolę pojazdów inspekcyjnych, skoncentrowano się na trzech rodzajach zadań realizowanych w warunkach laboratoryjnych: zanurzanie/wynurzanie, ruch na stałej głębokości i monitoring ściany basenu, symulujących odpowiednio: monitoring nóg platform wiertniczych, monitoring rurociągów podmorskich oraz monitoring nabrzeży i konstrukcji oceanotechnicznych np. poszycia statków [3].

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU SWOT

System składa się z dwóch obiektów:

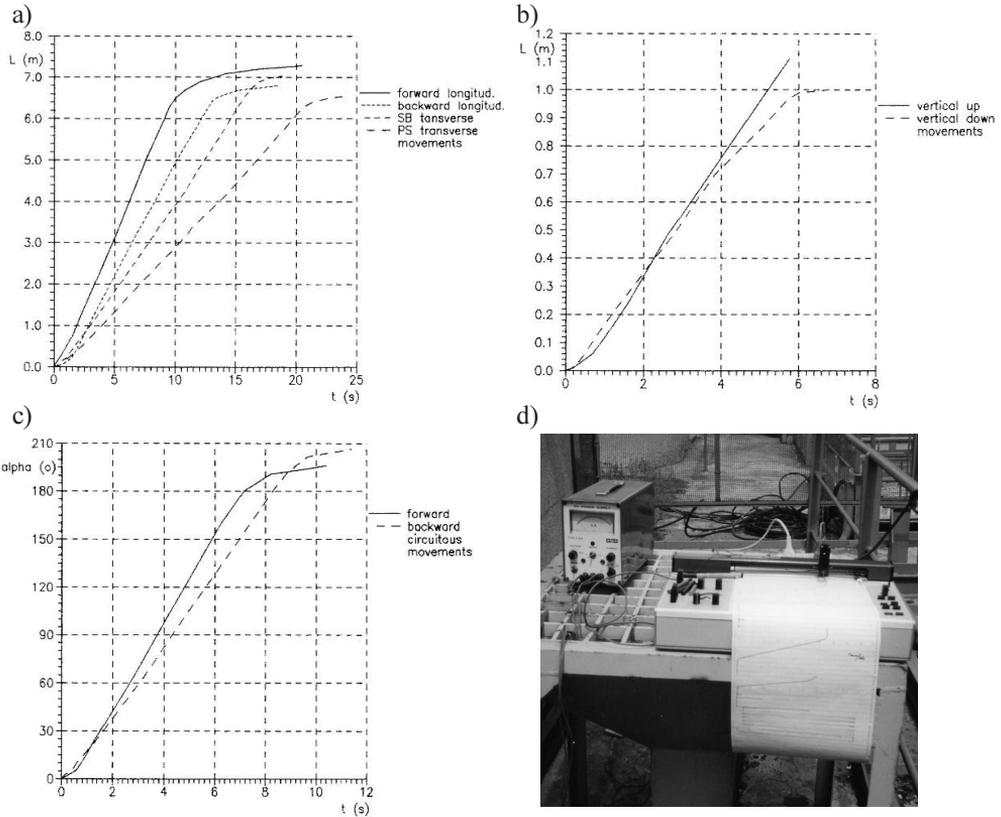
- pojazdu głębinowego KRAB, będącego nośnikiem aparatury,
- mobilnego stanowiska sterowniczo-badawczego do zasilania i kontroli pojazdu.

Pojazd głębinowy KRAB wyposażony jest w ramę, która stanowi przestrzenną konstrukcję zabezpieczającą układy funkcjonalne pojazdu przed uszkodzeniami. Wyposażenie umieszczone jest w pojemnikach ciśnieniowych. Podobne pojemniki zostały zastosowane jako moduły wypornościowe. W pojeździe zamontowano urządzenia zasilane energią elektryczną wyszczególnione w tabeli 1. Sumaryczne maksymalne zapotrzebowanie mocy pojazdu wynosi 2217,1 W.

Ze względu na projektowe ograniczenie obszaru penetracji wód Bałtyku do jego strefy przybrzeżnej, głębokość robocza pojazdu wynosi 150 m. Prędkość postępową wynoszącą 1,5 m/s zapewniają dwa pędniki wzdłużne generujące napór 135,97 N. Pojazd posiada również dwa pędniki poprzeczne generujące sumaryczny napór na prawą burtę 92,21 N, na lewą burtę zaś 42,46 N. Silniki te umożliwiają również obrót pojazdu z prędkością do 30 °/s. Pędnik pionowy usytuowany centralnie generuje siłę naporu w dół 40,42 N oraz w górę 21,73 N i zapewnia odpowiednio maksymalną prędkość zanurzania 0,2235 m/s i wynurzania 0,205 m/s. Charakterystyki ruchowe pojazdu przedstawione zostały na rysunku 2.

Tabela 1. Zestawienie urządzeń pojazdu KRAB i ich mocy

Lp	Nazwa	Liczba	Maksymalna moc jednostkowa [W]	Moc sumaryczna [W]
1	Reflektory oświetleniowe	4	150	600
2	Kamery telewizyjne	2	3,5	7
3	Kompas	1	0,1	0,1
4	Manipulator jednofunkcyjny	1	30	30
5	Próbnik do poboru próbek wody	4	20	80
6	Magnetometr	1	zasilanie własne	–
7	Sonda do pomiaru parametrów fizykochemicznych wody	1	zasilanie własne	–
Suma				2217,1



Rys. 2. Charakterystyki ruchu pojazdu KRAB: a) $L = f(t)$, ruch wzdłużny i poprzeczny, b) $L = f(t)$, ruch pionowy, c) $\alpha = f(t)$, ruch po okręgu, d) stanowisko rejestracji danych; oznaczenia: L – droga, α – kąt obrotu, t – czas

MODYFIKACJA SYSTEMU SWOT DLA POTRZEB REJESTRACJI DANYCH POMIAROWYCH I SYGNAŁÓW STERUJĄCYCH

Konieczność modyfikacji systemu SWOT wynika z potrzeby rejestracji danych pomiarowych i sygnałów sterujących niezbędnych do określenia chwilowych wartości mocy wymaganych podczas wykonywania przez pojazd określonych zadań.

W celu identyfikacji układu sterowania na zasadzie śledzenia (SPAY) pomiędzy główną konsolą sterowania i panel sterowania ręcznego wstawiono skrzynkę rozdzielczą, do której podłączono wielokanałowy układ pomiarowy pozwalający na rejestrację zmian napięcia sygnałów sterujących pędnikami poziomymi, pędnikiem pionowym, pędnikami poprzecznymi odpowiadającymi za obrót i przesunięcie pojazdu w płaszczyźnie poziomej, napięcia generowanego przez czujnik głębokości oraz czasu. Schemat układu przedstawiono na rysunku 3.

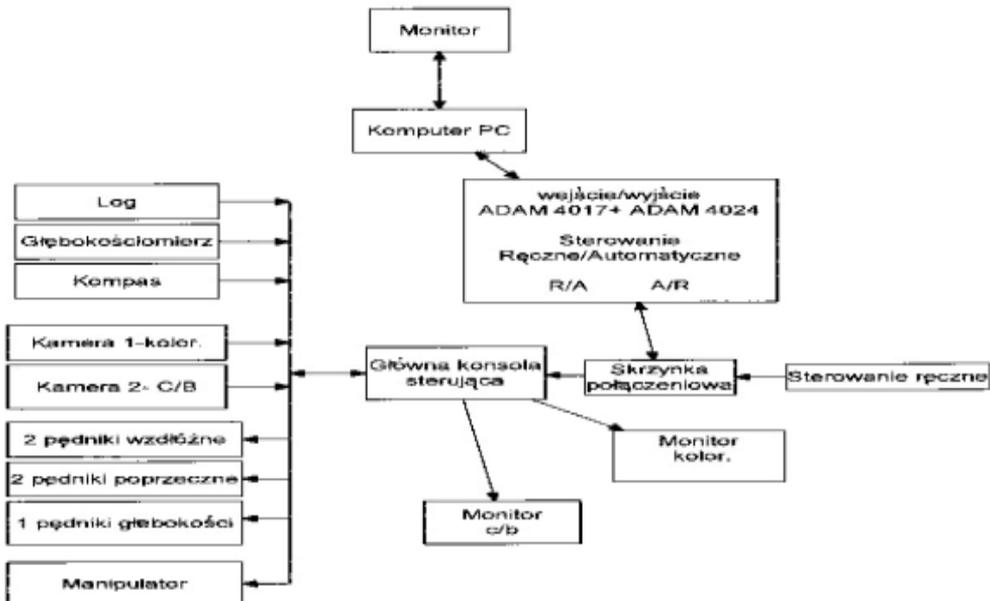
Rejestracja ta odbywa się w trakcie realizacji przez pojazd poszczególnych zadań możliwych do przeprowadzenia w basenie doświadczalnym WTM (zanurzanie/wynurzenie, ruch na stałej głębokości i monitoring ściany basenu). Ruch pojazdu po określonej trajektorii realizowany jest przez operatora sterującego pojazdem na podstawie obrazu z kamery wizyjnej zainstalowanej w pojeździe. Zebrane w ten sposób próbki pomiarowe służą do określenia zapotrzebowania na energię elektryczną przez główne odbiorniki tej energii.

Parametry basenu pozwalają na realizację następujących przebiegów:

- zanurzanie i wynurzenie (góra/dół, dół/góra) $x = 0, \quad 1,5 < z < 3,5,$
- ruch na stałej głębokości $0 < x < 2, \quad z = 3,5,$
- monitoring ściany basenu $1,5 < z < 3,5,$

gdzie: x [m] – zmienna po długości basenu; z [m] – zmienna po głębokości basenu.

Rejestracja ta odbywa się w trakcie realizacji przez pojazd poszczególnych zadań możliwych do przeprowadzenia w basenie doświadczalnym WTM (zanurzanie/wynurzenie, ruch na stałej głębokości i monitoring ściany basenu). Ruch pojazdu po określonej trajektorii realizowany jest przez operatora sterującego pojazdem na podstawie obrazu z kamery wizyjnej zainstalowanej w pojeździe. Zebrane w ten sposób próbki pomiarowe służą do określenia zapotrzebowania na energię elektryczną przez główne odbiorniki tej energii.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do rejestracji wielkości sygnałów sterujących poszczególnych pędników pojazdu [4]

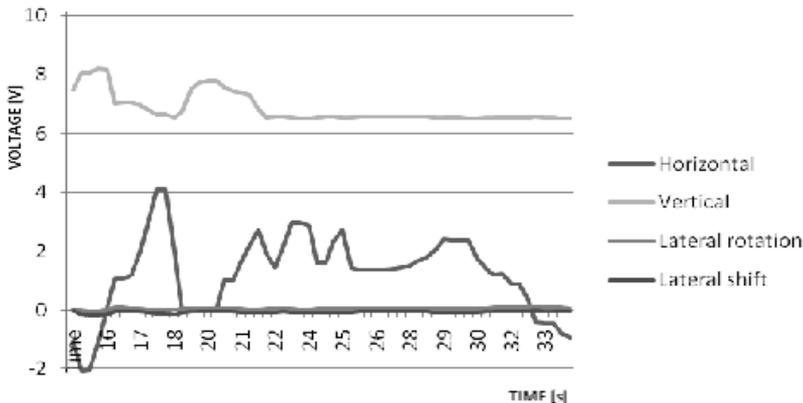
UKŁAD POMIAROWY

Układ rejestracji danych pomiarowych powstał na bazie rozproszonego układu automatyki ADAM 4000 firmy Adventech. Układ ten konfigurowany jest z modułów automatyki o różnym przeznaczeniu, połączonych za pośrednictwem magistrali szeregowej RS485 z konwerterem RS485/RS232 pozwalającym na współpracę systemu z komputerem klasy PC w oparciu o oprogramowanie ADAM View. W systemie wykorzystywanym dla potrzeb badań zastosowano moduł wejść analogowych ADAM-4017+. Moduł ten został sprzęgnięty z komputerem klasy PC za pośrednictwem konwertera ADAM 4520, [4].

ANALIZA PARAMETRÓW ENERGETYCZNYCH POJAZDU W ZADANIACH PODWODNYCH

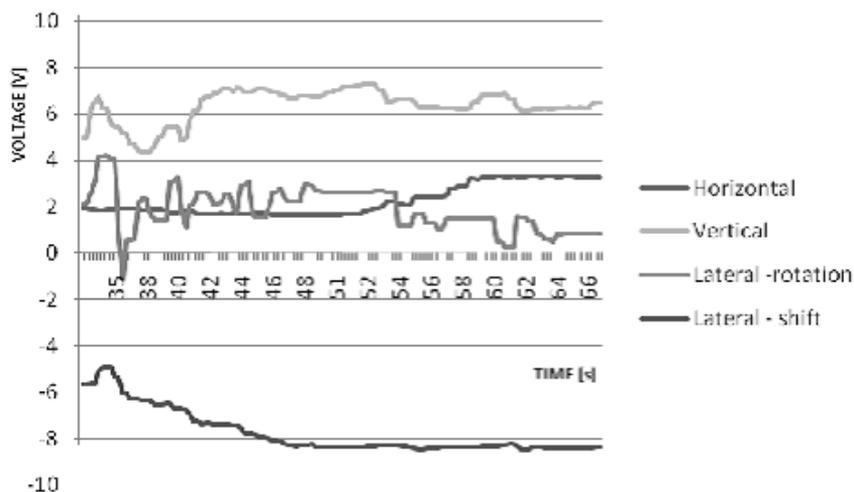
W trakcie ruchu pojazdu po określonej trajektorii zostały zarejestrowane parametry sygnałów sterujących poszczególnych pędników w funkcji czasu (rys. 4, 5, 6) [1]. Zważywszy na fakt, że charakterystyki poszczególnych pędników w zakresie ich normalnej pracy (do 95% obciążenia) mają przebieg prostoliniowy, można przyjąć, że charakterystyka zapotrzebowania mocy będzie miała również taki przebieg.

Na podstawie wykresów na rysunkach 4–6 określono średnie wartości napięcia sterującego dla poszczególnych pędników pojazdu KRAB (tab. 2). Wartości średnich sygnałów sterujących podano w voltach i procentach wartości sygnału sterującego wynoszącego maksymalnie 10 V. Jak wynika z tabeli średnie wartości sygnałów sterujących w realizowanych przez pojazd zadaniach nie przekraczają wartości 75%. Do dalszej analizy przyjęto ich najwyższą wartość na poziomie 75%.



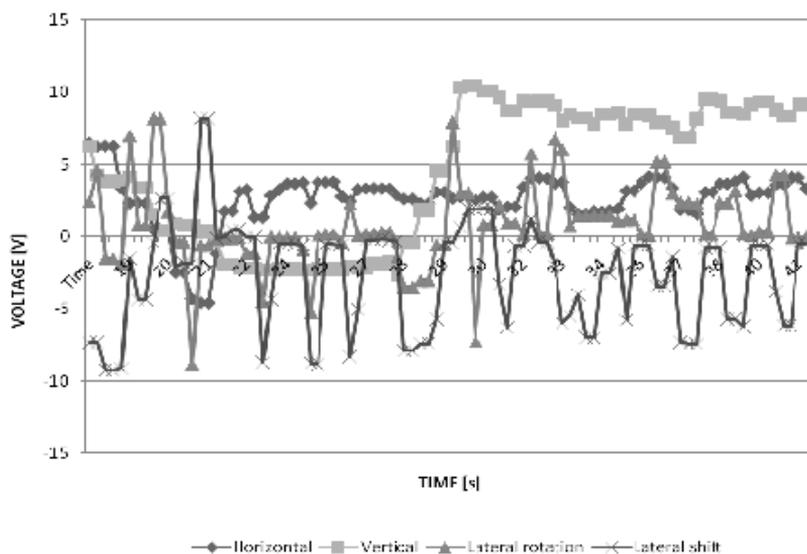
Oznaczenia: time – czas, vantage – napięcie, horizontal – horyzontalny, vertical – pionowy, lateral rotation – obrót boczny, lateral shift – przesunięcie boczne

Rys. 4. Wykres zmian sygnałów sterujących [V] dla poszczególnych pędników pojazdu KRAB podczas zanurzenia [1]



Oznaczenia: jak na rys. 4.

Rys. 5. Wykres zmian sygnałów sterujących [V] dla poszczególnych pędników pojazdu KRAB podczas ruchu na stałej głębokości [1]



Oznaczenia: jak na rys. 4.

Rys. 6. Wykres zmian sygnałów sterujących [V] dla poszczególnych pędników pojazdu KRAB podczas monitoringu ściany basenu [1]

Tabela 2. Średnie wartości sygnałów sterujących pędników pojazdu KRAB w realizowanych zadaniach podwodnych

Zadanie		Wartość sygnału sterującego dla poszczególnych rodzajów pędnika			
		pędniki wzdłużne	pędniki pionowe	pędniki poprzeczne – obrót	pędniki poprzeczne – przesunięcie równoległe
Zanurzanie	V	0,2 / -0,2	7,3	0,1 / 0,1	1,8 / -0,4
	%	2 / 2	73	1 / 1	18 / 4
Ruch na stałej głębokości	V	2,7	6,2	2,08 / -0,5	-7,4
	%	27	62	28 / -5	74
Monitoring ściany basenu	V	3,06	5,6 / -3,3	4,02 / -3,3	-3,45
	%	30,6	56 / 33	40,2 / -33	-34,5

ANALIZA PARAMETRÓW KABLOLINY POJAZDU KRAB

Analiza parametrów kabloliny dla konwencjonalnego układu zasilania

W układzie konwencjonalnym (indywidualnym) przesył energii elektrycznej do poszczególnych głównych odbiorników pojazdu KRAB (pędniki, oświetlenie) odbywa się za pośrednictwem 6 par kabli o przekroju $0,75 \text{ mm}^2$. Średnica kabloliny wynosi 22 mm, co powoduje, że przy wykorzystaniu całej jej długości wynoszącej 150 m manewrowanie pojazdem jest utrudnione, szczególnie w warunkach pracy w prądzie i przy dużym falowaniu.

Przepisy PRS w przypadku zasilania prądem stałym odbiorników siłowych dopuszczają spadek napięcia na poziomie 7% i określają możliwość wyliczenia tego spadku na podstawie wzoru (1) lub programu obliczeniowego, [5]:

$$\Delta U = \frac{2I_n \cdot l \cdot 100}{\delta \cdot U_n \cdot s} [\%] \quad (1)$$

gdzie: I_n – prąd znamionowy [A],

l – długość kabla [m],

δ – konduktywność, dla miedzi $58 \text{ [S}\cdot\text{m/mm}^2]$,

U_n – napięcie znamionowe [V],

s – przekrój kabla zasilającego [mm^2].

Tak obliczony przekrój kabli zasilających poszczególne pędniki i oświetlenie pojazdu KRAB przy maksymalnym (300W) poborze mocy wynosi $0,42 \text{ mm}^2$, dla mocy przesyłanej na poziomie $250 \text{ W} - 0,35 \text{ mm}^2$, a dla mocy 200 W tylko $0,280 \text{ mm}^2$, co oznacza, że parametry kabloliny są znacznie przewymiarowane. Należy mieć na uwadze, że pędniki podczas wykonywania przez pojazd określonych analizowanych zadań pracują w zakresie średnich lub małych obciążeń, więc przyjęty dopuszczalny na pod-

stawie przepisów PRS 7% spadek napięcia praktycznie nie występuje. Biorąc to pod uwagę, po skorygowaniu średnic przewodów, możliwie jest zmniejszenie grubości kabloliny do 18–20 mm bez ograniczenia parametrów funkcjonalnych pojazdu.

Analiza parametrów kabloliny dla zintegrowanego układu zasilania

Układ zintegrowany bazuje na przesłaniu ze stacji nawodnej do pojazdu podwodnego energii elektrycznej, która następnie rozdzielana jest na poszczególne odbiorniki. Sygnały sterujące dla poszczególnych odbiorników przesyłane są łączem RS lub światłowodem. W takim wypadku zakładając sumaryczne zapotrzebowanie mocy na przyjętym poziomie 2217 W, dla spadku napięcia wynoszącym 5,4%, przekrój pary przewodów wynosiłby 4 mm². Dla porównania, przy przekroju przewodu wynoszącej 2,5 mm² spadek napięcia będzie wynosił 8,7%.

Rozwiązanie to daje możliwość zastosowania w układzie zasilającym systemu Ultracap. Układ ten funkcjonujący za pośrednictwem jednostki sterującej pozwalałby na uzupełnienie brakującej energii elektrycznej, natomiast w przypadku jej nadwyżki (np. przy pracy pędników na obniżonych parametrach) na jego ładowanie.

Zakładając, że układ zasilania pojazdu standardowo będzie pracował przy obciążeniu wynoszącym 75 % obciążenia maksymalnego czyli 1662 W, a ewentualne niedobory mocy będą uzupełniane z systemu Ultracap, przewody zasilające powinny mieć przekrój 2,5 mm² (wyliczenie na podstawie programu PRS [5]). Dla tego przekroju spadek napięcia wyniesie 6,5%. Biorąc powyższe pod uwagę, grubość kabloliny można było by zmniejszyć do 14–16 mm bez ograniczania parametrów funkcjonalnych pojazdu. W tym wypadku jednak część układu sterowania oraz baterię kondensatorów systemu Ultracap należałoby umieścić w pojeździe głębinowym.

PODSUMOWANIE

Odpowiednia gospodarka energią zasilającą pojazd głębinowy typu ROV może prowadzić do znacznego zmniejszenia przekroju poprzecznego kabloliny. Niezbędna jest dokładna analiza zadań realizowanych przez pojazd. W warunkach laboratoryjnych lub poligonowych możliwa jest stosunkowo dokładna ocena zapotrzebowania na energię elektryczną przez systemy funkcjonalne pojazdu. Na tej podstawie można przeprowadzić optymalizację grubości poszczególnych kabli wchodzących w skład kabloliny, co może stać się również podstawą do wprowadzenia dodatkowych nowoczesnych rozwiązań wspomagających takich jak system Ultracap.

PIŚMIENNICTWO

1. Matejski M., Dramski M. Modelling of the movement of ROV vehicle in vertical plane using neural networks. Polish Hyperbaric Research, Nr 1, 22, 2008: 7–14.
2. Graczyk T., Matejski M., Dramski M., Jaszczak S. Propozycja protokołu komunikacji dla zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego. Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, Polish Hyperbaric Research, Nr 2, 27, 2009.
3. Matejski M. Graczyk T. The ROV movement modelling applying fuzzy logic technique. 3rd Petro Min Underwater Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 12–13 Dec. 2006.
4. Matejski M, Graczyk T. Creation of models of the ROV movement in limited experimental conditions applying fuzzy logic technique. 7th International Conference BLACK SEA, Varna, Bulgaria 2004.
5. <http://www.prs.pl/> – Prace naukowo badawcze. Programy obliczeniowe. Spadek napięcia, prąd stały.

ANALYSIS OF UNDERWATER VEHICLE POWER SYSTEM AIMING AT ITS MODIFICATION

Summary

Underwater system of detecting technical objects is presented in the article. The system contains a deepwater carrier of apparatus named KRAB. Characteristics and technical conditions referring to his energy balance is discussed. Presented analysis is a base for optimization of energy supply system aiming at application a new alternative energy source. It makes possible to minimize a cross-section of energy supply cables in umbilical connecting the vehicle and control station.

Keywords: underwater vehicle, ROV, power system of ROV, energy supply system.