

## **PRAKTYCZNE ASPEKTY IMPLEMENTACJI PROCEDURY ALOKACJI NAPORÓW DLA WIELOPĘDNIKOWEGO STATKU GŁĘBINOWEGO**

Jerzy Garus, Bogdan Żak

Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

### **STRESZCZENIE**

Artykuł dotyczy praktycznych aspektów syntezy układu automatycznego sterowania bezzalagowym statkiem głębinowym w zakresie strategii alokacji naporów w układzie napędowym. Rozważanym statek pojazdem jest wyposażony w wielopędnikowy układ napędowy zapewniający ruch o czterech stopniach swobody. W algorytmach rozdziału mocy zastosowano metody optymalizacji z ograniczeniami pozwalające na podstawie sił i momentów uogólnionych wyznaczyć siły naporu jakie winny być wytwarzane przez poszczególne pędniki. Rozpatrując zagadnienie rozdziału mocy jako zadanie programowania kwadratowego oraz programowania liniowego w pracy zaproponowano i porównano dwa algorytmy alokacji naporów. Przeprowadzone badania modelowe pozwoliły na oszacowanie ich jakości oraz efektywności w odniesieniu do szybkości i złożoności obliczeniowej.

**Słowa kluczowe:** pojazd podwodny, układ napędowy, rozdział mocy.

---

### ARTICLE INFO

---

PolHypRes 2018 Vol. 65 Issue 4 pp. 39 - 48

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2018-0022

Strony: 10, rysunki: 0, tabele: 0

page **www** of the periodical: [www.phr.net.pl](http://www.phr.net.pl)

**Publisher**

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

**Typ artykułu: oryginalny**

**Termin nadesłania: 24.08.2018 r.**

**Termin zatwierdzenia do druku: 19.10.2018 r.**



## WSTĘP

Wśród różnorodnych środków technicznych służących do penetrowania mórz i oceanów, znaczącą rolę odgrywają bezałogowe statki głębinowe (ang. UUV – Unmanned Underwater Vehicle). Wyposażone w pędniki i mające zdolności manewrowe projektowane są do wykonywania zadań w toni wodnej na głębokości od kilkunastu do kilku tysięcy metrów. Najczęściej pełnią rolę pływających platform, na których montowane są różnego rodzaju sensory i narzędzia, niezbędne do wykonania określonych zadań i misji. Najogólniej objekty te dzielą się na dwie następujące kategorie:

- zdalnie sterowane pojazdy podwodne (ang. ROV – Remotely Operated Vehicle), zwykle połączone są z okrętem-nosicielem za pomocą kabloliny, poprzez którą odbywa się cała komunikacja; opór z jej strony wpływa na ruch statku i może być przyczyną znaczących zakłóceń oraz strat energii, sterowności i manewrowości,
- autonomiczne pojazdy podwodne (ang. AUV – Autonomous Underwater Vehicle), swobodnie pływające jednostki mające własne źródło energii i całkowicie automatycznie sterowane.

Rozwój pojazdów ROV doprowadził do wykształcenia w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia obiektu nazywanego robotem podwodnym (ang. URV – Underwater Robotic Vehicle). Ma on na ogół konstrukcję ramową, a jego standardowym wyposażeniem są urządzenia obserwacji hydroakustycznej, systemy i urządzenia nawigacyjne, manipulatory, czujniki wizyjne oraz reflektory. Może penetrować dno w poszukiwaniu zaginionych przedmiotów, przeprowadzać inspekcje podwodnych części konstrukcji hydrotechnicznych, rejestrować prace i badania podwodne, uczestniczyć w działaniach poszukiwawczo-ratowniczych. Roboty podwodne znalazły szerokie zastosowanie, zarówno cywilne jak i militarne, w szczególności tam, gdzie działanie człowieka jest niepraktyczne lub niepożądane.

## OPIS UKŁADU AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA

Ruch robota podwodnego o sześciu stopniach swobody opisywany jest za pomocą następujących wektorów [1,2]:

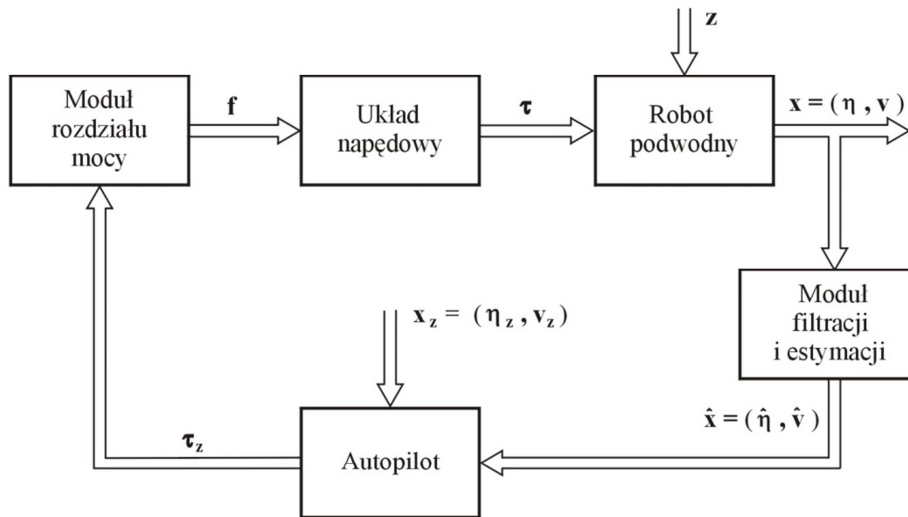
$$\begin{aligned}\boldsymbol{\eta} &= [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \\ \boldsymbol{v} &= [u, v, w, p, q, r]^T \\ \boldsymbol{\tau} &= [X, Y, Z, K, M, N]^T\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\eta}$  – wektor pozycji i orientacji robota w przestrzeni,  
 $x, y, z$  – współrzędne położenia,  
 $\phi, \theta, \psi$  – współrzędne orientacji,  
 $\boldsymbol{v}$  – wektor prędkości liniowych i kątowych robota,  
 $u, v, w$  – linear velocities along longitudinal, transversal and vertical axes,  
 $p, q, r$  – angular velocities about longitudinal, transversal and vertical axes,  
 $\boldsymbol{\tau}$  – wektor sił i momentów sił oddziałujących na robota,  
 $X, Y, Z$  – forces along longitudinal, transversal and vertical axes,  
 $K, M, N$  – moments about longitudinal, transversal and vertical axes.

Sterowanie robotem podwodnym odbywa się najczęściej z pulpitu operatorskiego na okręcie-nosicielu. Jednak wielowymiarowość obiektu sterowania utrudnia wyszkolenie operatorów i obniża efektywność ich pracy. Stąd dąży się do stosowania w coraz większym zakresie sterowania automatycznego, umożliwiające zrealizowanie bez ingerencji człowieka szeregu typowych zadań, takich jak: przejście do zadanego punktu w warunkach zakłóceń i ograniczeń toru ruchu, pozycjonowanie w zadanym punkcie pracy, wykonanie prostych operacji z wykorzystaniem manipulatora, (np. przecięcie liny, założenie ładunku itp.). Realizowane jest to za pomocą układu sterowania, w którym rola operatora sprowadza się do ogólnego nadzoru nad przebiegiem misji oraz wprowadzania do rozkazów nadrzędnych, takich jak: współrzędne punktów zwrotów, opcje wykonywanych zadań, rozkazy zaprzestania czynności, itp.

Podstawowe moduły układu sterowania przedstawia rysunek 1. Zasadniczym elementem jest autopilot, który na podstawie porównania bieżącego położenia obiektu sterowania z wartościami zadanymi, wyznacza siły i momenty  $\tau_z$  jakie winny być wytworzone przez układ napędowy, aby zachowanie robota było zgodne z założonym. Odpowiadający im wektor naporów  $f$  obliczany jest w module rozdziału naporów i przesyłany jako wielkość sterująca do układu napędowego.



Rys. 1 Ogólny schemat układu sterowania robotem podwodnym.

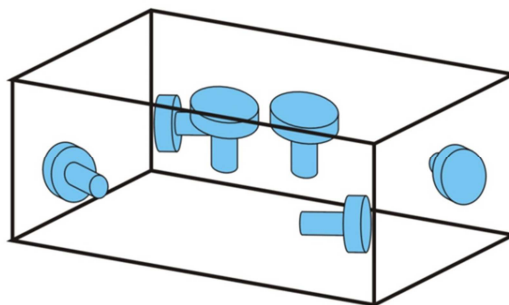
## PROCEDURA ALOKACJI NAPORÓW

Pędniki są silnym źródłem nieliniowości dynamiki robota podwodnego, z uwagi na ich wzajemne na siebie oddziaływanie w trakcie wykonywania manewrów, co utrudnia zachowanie wysokiej jakości sterowania [3,4]. Dlatego też, zarówno z punktu widzenia projektowania robota podwodnego jak i jego późniejszej eksploatacji, zagadnienia związane z doбором konfiguracji pędników oraz określeniem zasad rozdziału mocy na poszczególne pędniki są szczególnie ważne. Dla większości konwencjonalnych robotów podwodnych, przyjętym rozwiązaniem jest konstrukcja posiadająca wzdłużną i poprzeczną stabilność metacentryczną, co zapewnia ruch z małymi kątami kołysań wzdłużnych i bocznych. Stąd, podstawowym ruchem tego typu obiektów jest przemieszczanie się w płaszczyźnie poziomej ze zmianami głębokości zanurzenia, a więc ruch o czterech stopniach swobody.

Zawarte w pracy rozważania dotyczą robota z układem napędowym składającym się z sześciu pędników o konfiguracji przedstawionej na rysunku 2. Taka struktura układu napędowego pozwala na jego podział na dwa niezależne podukłady, a mianowicie:

- podukład ruchu w płaszczyźnie poziomej, składający się z czterech pędników rozmieszczonych skośnie w stosunku do wzdłużnej i poprzecznej osi symetrii i zapewniający ruch postępowy wzdłuż tych osi oraz ruch obrotowy wokół osi normalnej,
- podukład ruchu w płaszczyźnie pionowej składający się z jednego lub dwóch pędników ustawionych pionowo i realizujący ruch postępowy wzdłuż osi normalnej.

Szczególnie interesujący jest podukład ruchu poziomego, w którym żądane siły i moment napędzające, czyli siły  $X$  i  $Y$  oraz moment siły  $N$ , są kombinacjami liniowymi sił naporu wytwarzanych przez cztery pędniki. Stąd zadanie wyznaczenia wektora naporu  $f$  może być sformułowane jako problem optymalizacyjny, w którym kryterium jest uzyskanie zadanych sił i momentu siły  $\tau_z$  przy minimalnych wartościach naporów generowanych przez pędniki.



Rys. 2 Struktura układu napędowego z sześcioma pędnikami.

W artykule skupiono się na problemie porównania dwóch algorytmów rozdziału mocy w układzie napędowym robota podwodnego realizującego ruch poziomy płaski o trzech stopniach swobody, rozpatrując zagadnienie alokacji naporów jako zadania programowania kwadratowego oraz programowania liniowego.

## OPIS DYNAMIKI PĘDNIKA

Położenie pędników robota podwodnego jest określane względem środka jego masy (rys. 3). W ogólnym przypadku relacja pomiędzy wektorem sił i momentów napędzających  $\tau$  a wektorem naporów pędników  $f$  jest złożoną funkcją nieliniową zależną m.in. od wektora prędkości robota, prędkości obrotowej śruby pędnika, gęstości wody [5].

Dla ruchu płaskiego robota powszechnie przyjętym uproszczeniem jest przedstawienie sił i momentu napędzających w funkcji naporów generowanych przez pędniki, za pomocą następującej zależności [1,6]:

$$\tau = \mathbf{T}f \quad (2)$$

gdzie:

$\tau = [\tau_X, \tau_Y, \tau_Z]^T$  – wektor sił i momentu siły ( $\tau_X$  siła wzdłuż osi X,  $\tau_Y$  – siła wzdłuż osi Y,  $\tau_Z$  moment siły wokół osi Z),

$f = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$  – wektor naporów rozwijanych przez pędniki,

$\mathbf{T}$  – macierz konfiguracji pędników,

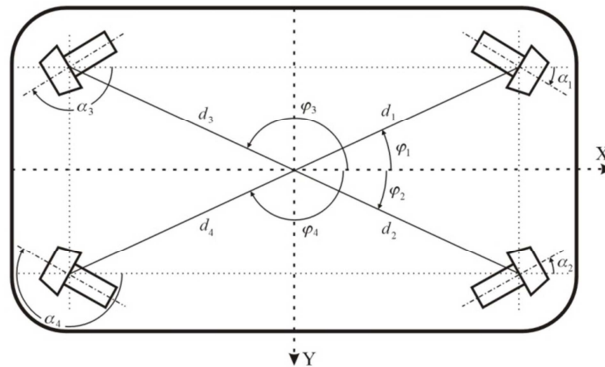
$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\alpha_2) & \cos(\alpha_3) & \cos(\alpha_4) \\ \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & \sin(\alpha_3) & \sin(\alpha_4) \\ d_1 \sin(\alpha_1 - \varphi_1) & d_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) & d_3 \sin(\alpha_3 - \varphi_3) & d_4 \sin(\alpha_4 - \varphi_4) \end{bmatrix}$$

$\alpha_i$  – kąt pomiędzy osią wzdłużną robota a kierunkiem działania siły naporu  $i$ -tego pędnika,

$d_i$  – odległości  $i$ -tego pędnika od środka masy robota,

$\varphi_i$  – kąt pomiędzy osią wzdłużną robota a linią łączącą środek masy ze środkiem osi  $i$ -tego pędnika,

$i = \overline{1,4}$ .



Rys. 3 Konfiguracja pędników w podukładzie ruchu w płaszczyźnie poziomej.

## ROZDZIAŁ MOCY JAKO ZADANIE PROGRAMOWANIA KWADRATOWEGO

Zarówno studia literaturowe [1,2,3] jak i własne doświadczenia [6] pokazują, że w praktyce problem alokacji naporów w układzie napędowym robota podwodnego jest najczęściej formułowany jako zadanie programowania kwadratowego w następującej postaci:

wyznaczyć

$$J = \min_f \frac{1}{2} \mathbf{f}^T \mathbf{H} \mathbf{f} \quad (3)$$

przy ograniczeniach

$$\begin{aligned} \tau_z - \mathbf{T}f &= \mathbf{0} \\ -\mathbf{f} &\leq -\mathbf{f}_{\min} \\ \mathbf{f} &\leq \mathbf{f}_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

$\mathbf{H}$  – macierz diagonalna dodatnio określona wymiaru  $4 \times 4$ ,

$$\mathbf{f}_{\min} = [f_{1\min}, f_{2\min}, f_{3\min}, f_{4\min}]^T$$

$$\mathbf{f}_{\max} = [f_{1\max}, f_{2\max}, f_{3\max}, f_{4\max}]^T$$

Główną przyczyną rozpatrywania tego zagadnienia jako zadania programowania kwadratowego jest kwadratowe odwzorowanie relacji moc/napór. Przy pewnych założeniach, relacja ta może być także aproksymowana funkcją liniową, co pozwala na rozpatrzenie tego problemu optymalizacyjnego jako zadania programowania liniowego, którego złożoność obliczeniowa jest znacząco mniejsza.

## ROZDZIAŁ MOCY JAKO ZADANIE PROGRAMOWANIA LINIOWEGO

Składowe wektora  $\mathbf{f}$  przyjmują zarówno dodatnie jak i ujemne wartości, zatem w zadaniu programowania liniowego musi to być uwzględnione i stąd przyjmie ono następującą postać:

Wyznaczyć

$$J = \min_{\mathbf{f}} \mathbf{c}^T |\mathbf{f}| \quad (5)$$

przy ograniczeniach

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_z - \mathbf{T}\mathbf{f} &= \mathbf{0} \\ -\mathbf{f} &\leq -\mathbf{f}_{\min} \\ \mathbf{f} &\leq \mathbf{f}_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie  $\mathbf{c}$  jest wektorem o nieujemnych składowych.

Ponieważ funkcja kosztu (5) zawiera wartości bezwzględne, to aby do rozwiązania powyższego problemu optymalizacyjnego zastosować algorytm Simlex niezbędna jest transformacja zależności (5-6) do poniższej postaci:

Wyznaczyć

$$J = \min_{\mathbf{u}} \mathbf{c}^T \mathbf{u} \quad (7)$$

przy ograniczeniach

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_z - \mathbf{T}\mathbf{f} &= \mathbf{0} \\ -\mathbf{f} &\leq \mathbf{u} \\ \mathbf{f} &\leq \mathbf{u} \\ -\mathbf{f} &\leq -\mathbf{f}_{\min} \\ \mathbf{f} &\leq \mathbf{f}_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

W zapisie macierzowym powyższe zadanie programowania liniowego można sformułować następująco:

wyznaczyć

$$\min_{\mathbf{f}, \mathbf{u}} [\mathbf{0}_{(1,4)} \quad \mathbf{c}^T] \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (9)$$

przy ograniczeniach:

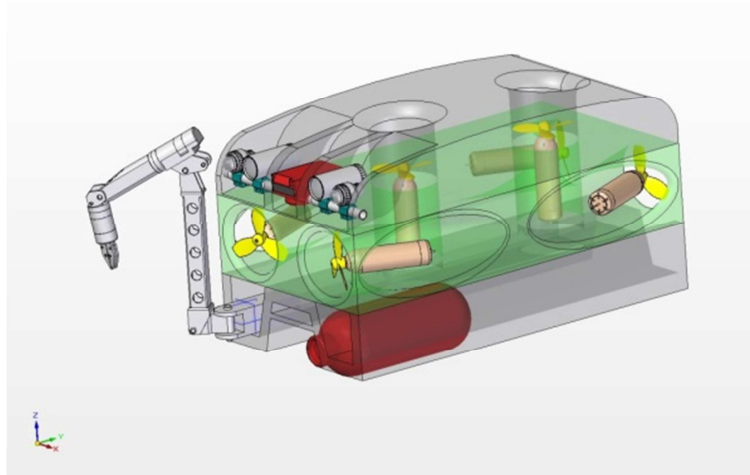
$$\begin{aligned} [\mathbf{T} \quad \mathbf{0}_{(3,4)}] \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} &= \boldsymbol{\tau}_d \\ \begin{bmatrix} -\mathbf{I}_{(4,4)} & -\mathbf{I}_{(4,4)} \\ \mathbf{I}_{(4,4)} & -\mathbf{I}_{(4,4)} \\ -\mathbf{I}_{(4,4)} & \mathbf{0}_{(4,4)} \\ \mathbf{I}_{(4,4)} & \mathbf{0}_{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} &\leq \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(4,1)} \\ \mathbf{0}_{(4,1)} \\ -\mathbf{f}_{\min} \\ \mathbf{f}_{\max} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie  $\mathbf{I}_{(a \times b)}$  i  $\mathbf{0}_{(a \times b)}$  są, odpowiednio, macierzami jednostkową i zerową wymiaru  $a \times b$ .

Zastosowanie algorytmu simplex do rozwiązania powyższego zadania optymalizacyjnego, z uwagi na jego niewielki rozmiar, pozwala na opracowanie szybkiej procedury obliczeniowej do alokacji naporów w wielopędnikowym układzie napędowym, co jest szczególnie istotne z punktu widzenia jej praktycznego zastosowania.

## BADANIA MODELOWE

Badania porównawcze obu algorytmów rozdziału mocy przeprowadzono dla robota podwodnego wyposażonego w układ napędowy jak na rysunku 4.

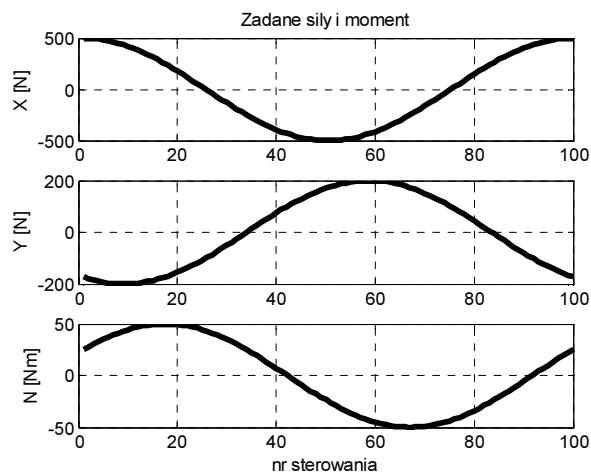


Rys. 4 Wirtualny widok robota podwodnego.

Przemieszczanie robota w płaszczyźnie poziomej realizowane jest za pomocą czterech identycznych pędników rozmieszczonych symetrycznie względem środka masy i generujących napór do  $\pm 1000$  N. Macierz konfiguracji pędników  $\mathbf{T}$  robota jest postaci:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.875 & 0.875 & -0.875 & -0.875 \\ 0.485 & -0.485 & 0.485 & -0.485 \\ 0.332 & -0.332 & -0.332 & 0.332 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku MATLAB, korzystając z funkcji *linprog* dla zadania programowania liniowego i *quadprog* dla zadania programowania kwadratowego [7]. Na rysunku 6 przedstawiono wartości wektora naporów  $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$  wyznaczone z wykorzystaniem funkcji *linprog* i *quadprog* dla zadanych wartości sił i momentu siły  $\boldsymbol{\tau}_z = [\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{zz}]^T$  które zilustrowano na rys. 5. Na podstawie analizy obliczonych wartości wektorów naporów  $\mathbf{f}$  dla obu zadań optymalizacyjnych można stwierdzić, że są one bardzo zbliżone.

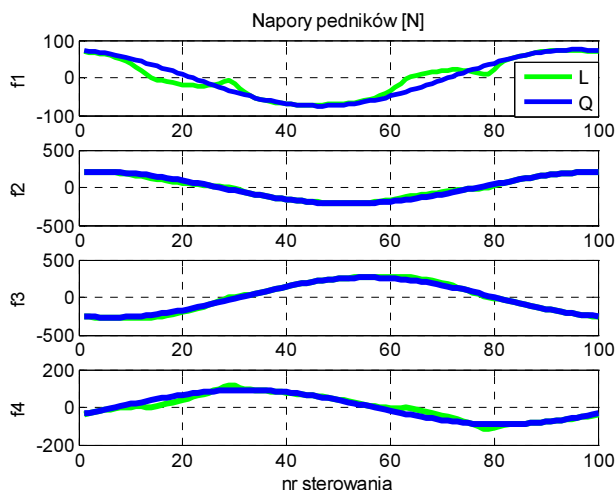


Rys. 5 Przebiegi zadanych sił  $X$  i  $Y$  oraz momentu siły  $N$ .

W celu porównania wydatku energetycznego dokonana została ocena obu metod przy wykorzystaniu następującego wyrażenia:

$$E = \sum_i (f_{1i}^2 + f_{2i}^2 + f_{3i}^2 + f_{4i}^2) \quad (12)$$

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że dla metody opartej o zadanie programowania liniowego wartość  $E$  jest około 3+5% mniejsza niż dla zadania programowania kwadratowego. Natomiast krzywa obrazująca napory wytwarzane przez pędniki na podstawie programowania liniowego nie jest tak gładka jak otrzymana na podstawie programowania kwadratowego, co ilustruje rysunek 6.



Rys. 6 Przebiegi naporów generowanych przez pędniki na podstawie zadania programowania liniowego (L) oraz kwadratowego (Q).

Zrealizowane badania wykazały zatem, że w module rozdziału mocy układu sterowania ruchem robota podwodnego do zadania alokacji naporów może być zastosowana procedura optymalizacji oparta nie tylko o programowanie kwadratowe, ale także programowanie liniowe. Jest to szczególnie istotne małych, ale bardzo rozpowszechnionych obecnie, niskokosztowych robotów podwodnych (ang. LC URV – Low Cost URV), których komputer pokładowy posiada ograniczoną moc obliczeniową.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona propozycja algorytmów alokacji naporów w wielopędnikowym układzie napędowym robota podwodnego stanowi kontynuację badań zmierzających do opracowania niezawodnego i wydajnego systemu sterowania jego ruchem.

Rozważane w pracy algorytmy optymalizacji przydziału naporów oparte o programowanie kwadratowe i programowanie liniowe pozwalają na optymalny rozdział mocy w układzie napędowym robota podwodnego.

Z punktu widzenia praktycznej implementacji rozważanych algorytmów w komputerze pokładowym o ograniczonej mocy obliczeniowej, wygodniejszy do zastosowania wydaje się być algorytm alokacji z wykorzystaniem programowania liniowego, gdyż pozwala na opracowanie prostej i szybkiej procedury wyznaczania wektora naporów przy porównywalnych kosztach sterowania.

## LITERATURA

1. T. I. Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. Wiley and sons, Chichester 1994;
2. T. I. Fossen. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley and sons, Chichester 2011;
3. T. I. Fossen, T. A. Johansen, T. Perez. A Survey of Control Allocation Methods for Underwater Vehicles. In: *Underwater Vehicles* (A. V. Inzartsev, Ed.), In-Tech Education and Publishing, Vienna 2009, pp. 109-128;
4. J. Małecki. Model of Propeller for the Precision Control of Marine Vehicle. *Solid State Phenomena*, 2012, vol. 180, pp. 323-330;
5. A. Charchalis. *Opory okrętów wojennych i pędniki okrętowe*. Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2001.
6. J. Garus. Optimization of thrust allocation in propulsion system of underwater vehicle. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2004, vol. 14, no. 4, pp. 461-467;
7. B. Mrozek, Z. Mrozek. *MATLAB and Simulink*. Helion, Gliwice 2010.

**dr hab. inż. Jerzy Garus**  
Akademia Marynarki Wojennej  
Wydział Mechaniczno-Elektryczny  
81-127 Gdynia  
ul. Śmidowicza 69  
e-mail: j.garus@amw.gdynia.pl