

**Tomasz Leszczyński**

## **KONCEPCJA STEROWANIA POJAZDEM PODWODNYM W PRZYPADKU WYSTĄPIENIA AWARII PĘDNIKA OPARTA NA ALGORYTMIE GENETYCZNYM**

### **STRESZCZENIE**

W pracy przedstawiono propozycję rozwiązania problemu dotyczącego sterowania pojazdem podwodnym w przypadku, gdy podczas realizacji zadania awarii ulega jeden z jego pędników. Wykorzystano do tego algorytmizację genetyczną. Przyjęto założenie, że w pojeździe podwodnym znajduje się system diagnostyczny wykrywający awarię pędnika oraz narzucono określony sposób poruszania się pojazdu po wystąpieniu awarii. Zamieszczone zostały wstępne wyniki symulacji dla zadania utrzymania określonego kursu oraz możliwości dalszego rozwoju metody.

### **WSTĘP**

W chwili obecnej pojazdy podwodne są podstawowym wyposażeniem wielu jednostek pływających, zarówno okrętów wojennych, jak i jednostek cywilnych – w szczególności platform wiertniczych. Są one również na wyposażeniu ośrodków naukowych, służb ratownictwa morskiego oraz firm zajmujących się pracami podwodnymi.

Pojazdy podwodne często nie mają żadnych innych elementów ruchomych poza pędnikami. Są bardzo podatne na awarie w czasie wykonywania zadań. Ich pędniki są jednym z najczęstszych i najważniejszych źródeł awarii. We wszystkich, oprócz najbliższych przypadków, zaistnienie awarii może doprowadzić do anulowania zadania. Konsekwencja drobnych awarii może być bardzo droga i czasochłonna. Chociaż dobra praktyka projektowa próbuje minimalizować występowanie wad i awarii w pojazdach, to jednak jest pewne prawdopodobieństwo, że wady mogą się pojawiać [9].

Podczas wykonywania zadania przez pojazd pędniki są narażone na różnego typu awarie. Niektóre z nich (częściowe awarie) nie są krytyczne i pędnik może działać z ograniczeniami, np. obniżona może być maksymalna prędkość. W innych przypadkach (całkowita awaria) pędnik musi być wyłączony i zadanie jest kontynuowane ze sprawnymi pozostałymi pędnikami.

Awarie pędników są sklasyfikowane następująco [9]:

- 1) awarie wewnętrzne (np. temperatura uzwojeń znajduje się poza zakresem, łączność z bazą została przerwana, spadek napięcia zasilania na magistrali);
- 2) awarie zewnętrzne (np. zablokowana albo uszkodzona śruba)

oraz:

- 1) całkowite – awaria wewnętrzna, uszkodzona śruba;
- 2) częściowe – zablokowana śruba, mocno zablokowana śruba oraz awaria nieznamna.

Z uwagi na ogromną złożoność problemu w przypadku rozważania tych awarii, w których następuje tylko ograniczenie prędkości obrotowej pędnika, skoncentrowałem się na całkowitej awarii pędnika.

## ANALIZA PROBLEMU

Do analizy problemu, jako reprezentanta pojazdu podwodnego, przyjąłem zdalnie sterowany pojazd podwodny „Ukwiał”, który jest na wyposażeniu okrętów zwalczania min MW. Pojazd ten jest przeznaczony do wykrywania, identyfikacji i niszczenia min morskich [4, 5].

Podstawowym ruchem zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego jest przemieszczanie się w płaszczyźnie poziomej z niewielkimi zmianami w płaszczyźnie pionowej (ruch o czterech stopniach swobody z małymi kątami kołysań wzdłużnych i bocznych). Z tego powodu ruch przestrzenny pojazdu można rozpatrywać jako złożenie dwóch przemieszczeń: w płaszczyźnie poziomej i płaszczyźnie pionowej [1, 2].

Sterowanie pojazdem „Ukwiał” w płaszczyźnie poziomej realizowane jest za pomocą pędników usytuowanych ukośnie względem osi symetrii pojazdu. Przez odpowiednie ustawienie zwrotu naporu i jego wartości na poszczególnych pędnikach uzyskuje się dwa przemieszczenia liniowe (w kierunku osi wzdłużnej X i poprzecznej Y) oraz jedno kątowe (wokół osi pionowej Z). W płaszczyźnie pionowej

natomiast wykorzystuje się pędnik lub pędniki pionowe, zapewniające przemieszczenie liniowe wzdłuż osi Z (zanurzenie i wynurzenie pojazdu). Można przez to ograniczyć rozpatrywanie ruchu pojazdu do ruchu płaskiego o trzech stopniach swobody [1, 2].

W ogólnej postaci ruch pojazdu podwodnego przy takich ograniczeniach można opisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \eta &= \begin{bmatrix} \eta_1^T \\ \eta_2^T \end{bmatrix}, \text{ gdzie: } & \eta_1 &= [x, y, 0]^T & \eta_2 &= [0, 0, \psi]^T \\ \nu &= \begin{bmatrix} \nu_1^T \\ \nu_2^T \end{bmatrix}, \text{ gdzie: } & \nu_1 &= [u, v, 0]^T & \nu_2 &= [0, 0, r]^T, \\ \tau &= \begin{bmatrix} \tau_1^T \\ \tau_2^T \end{bmatrix}, \text{ gdzie: } & \tau_1 &= [X, Y, 0]^T & \tau_2 &= [0, 0, N]^T \end{aligned}$$

gdzie:  $\eta_1$  – wektor pozycji pojazdu podwodnego w układzie związanym z Ziemią;  
 $\eta_2$  – wektor kątów Eulera ( $\phi=0$  – przechyłu,  $\theta=0$  – przegłębienia,  $\psi$  – kursu) w układzie związanym z Ziemią;  
 $\nu_1$  – wektor prędkości liniowych w układzie związanym z pojazdem;  
 $\nu_2$  – wektor prędkości kątowych w układzie związanym z pojazdem;  
 $\tau_1$  – wektor sił oddziałujących na pojazd w układzie związanym z pojazdem;  
 $\tau_2$  – wektor momentów sił oddziałujących na pojazd w układzie związanym z pojazdem.

W tym przypadku przy ruchu pojazdu podwodnego w dwóch układach odniesienia definicja przekształceń danych wielkości z jednego układu do drugiego jest następująca:

- przekształcenie prędkości liniowych pojazdu w układzie ruchomym do przyrostu współrzędnych jego pozycji w układzie nieruchomym

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) \nu_1;$$

- przekształcenie odwrotne, czyli przyrostu współrzędnych pozycji pojazdu w układzie nieruchomym do jego prędkości liniowych w układzie ruchomym

$$\nu_1 = J_1^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_1,$$

gdzie  $J_1(\eta_2)$  – macierz przekształcenia zależna od kątów Eulera;

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

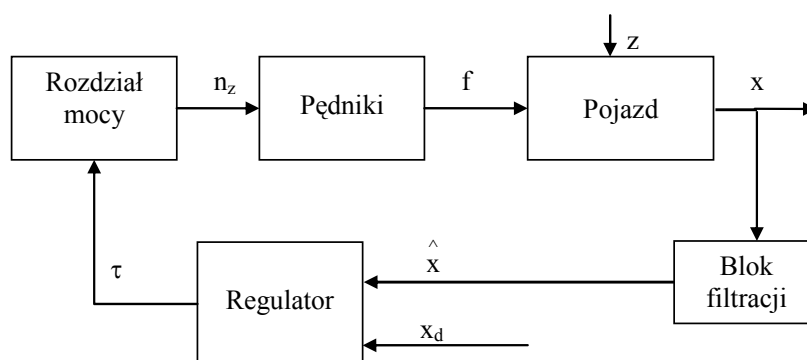
Przekształcenie prędkości kątowych jest opisane w naszym przypadku równaniem:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) \cdot v_2,$$

gdzie  $J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$

Równania kinematyki pojazdu wyrażamy w postaci:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\eta} = J(\eta) v.$$



Rys. 1. Schemat blokowy sterowania pojazdem podwodnym [4]

Aktualnie szkolenie operatorów pojazdów podwodnych (np. „Ukwiálu”) jest realizowane przede wszystkim pod kątem wystąpienia nieoczekiwanych sytuacji wokół urządzenia, a w przypadku jego awarii następuje wyciągnięcie urządzenia z wody. Sterowanie pojazdem w czasie wystąpienia awarii wymaga od operatora bardzo dużego doświadczenia [4].

## PROPOZYCJA ROZWIĄZANIA

Z uwagi na to, że we wszystkich zadaniach następuje prowadzenie pojazdu podwodnego po zadanej trajektorii, również w przypadku wystąpienia awarii w układzie napędowym nadal istotne będzie zachowanie zadanej trajektorii.

Możliwe jest to poprzez podanie takiego wysterowania sprawnych pędników, by generowane na nich siły naporów tworzyły wektor wymuszeń działający na pojazd, który będzie niezmienny lub ulegnie proporcjonalnemu zmniejszeniu. Może być tylko tyle mniejszy, by zasadne jeszcze pozostało wykonanie zadania. Jeśli nie, to musi być możliwe unieruchomienie lub wycofanie pojazdu, w zależności od zaistniałej sytuacji [4, 5].

Z uwagi na to, że wystąpienie awarii pędnika w trakcie wykonywania zadania przez pojazd może spowodować jego niekontrolowane zniszczenie, potrzebne jest dodanie mechanizmu w bloku rozdziału mocy uwzględniającego wystąpienie awarii pędnika, a co za tym idzie – sprawdzającego, czy nowa konfiguracja umożliwia kontynuowanie bieżącego zadania.

Takie warunki, które musimy uzyskać w przypadku wystąpienia awarii pędnika, pokazują, że jest to przykład zadania z zakresu optymalizacji. Do jego rozwiązania korzystne wydaje się zastosowanie algorytmów genetycznych [3].

W przypadku algorytmizacji genetycznej ważnym problemem, który należy rozwiązać, jest stworzenie jak najprostszej funkcji celu (oceny). Wskazane jest, by składała się z funkcji jak najprostszych oraz by liczba członów funkcji nie była zbyt duża – najwyżej dwa [6, 7].

W przypadku sterowania pojazdem podwodnym potrzebne są:

- wartość cosinusa kąta między wektorami działania sił układu sprawnego a wektorem działania sił układu z uszkodzonym pędnikiem;
- funkcja proporcji – opisująca proporcjonalność działania sił oraz momentów sił na pojazd podwodny.

Oba te człony mają indywidualne wagi co do wartości, takie że dużo ważniejsze jest uzyskanie jak najmniejszego kąta niż wartości współczynnika proporcji [6 – 8].

W każdym kolejnym kroku następuje sprawdzenie, jak by się pojazd zachował, gdyby miał sprawny układ napędowy. Następnie algorytm genetyczny próbuje znaleźć jak najbardziej zbliżone wartości wymuszenia dla układu z awarią – najlepszą kombinację wysterowania sprawnych pędników, która pasowałaby do przyjętego założenia na zachowanie się pojazdu podwodnego po wystąpieniu awarii pędnika poziomego.

Algorytm działa według następującego schematu:

1. Podanie przez regulator układowi rozdziału mocy informacji o potrzebnym wektorze wymuszenia [5, 10]:  $\tau = [X, Y, 0, 0, 0, N]$ .
2. Obliczenie naporów, jakie powinny wygenerować pędniki, gdyby wszystkie były sprawne:  $f_s = K_1 \cdot \tau$

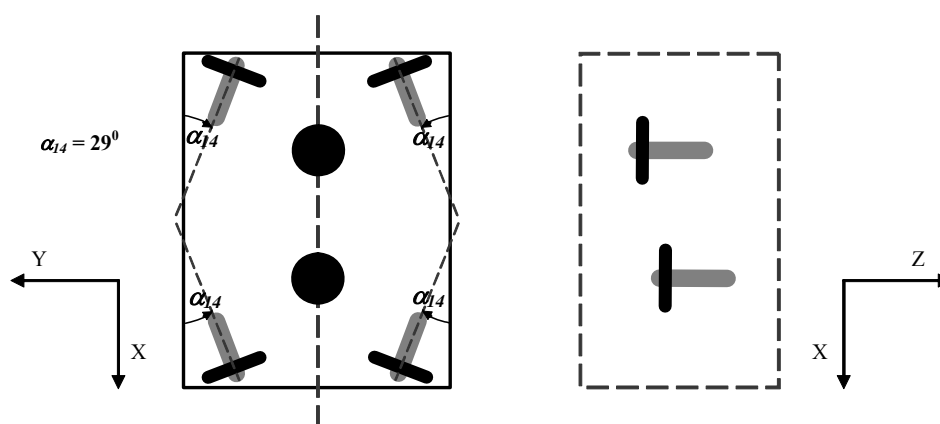
$$K_1 = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & 0 & 0 & K_{13} \\ K_{11} & -K_{12} & 0 & 0 & 0 & -K_{13} \\ -K_{11} & K_{12} & 0 & 0 & 0 & -K_{13} \\ -K_{11} & -K_{12} & 0 & 0 & 0 & K_{13} \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

gdzie:  $K_l$  – macierz przekształceń zadanych wynikająca z własności geometrycznych rozmieszczenia pędników;

$$K_{11} = \cos^{-1} \alpha_{14}; \quad K_{12} = \sin^{-1} \alpha_{14}; \quad K_{13} = (x_{14} \cdot \sin \alpha_{14} + y_{14} \cdot \cos \alpha_{14})^{-1};$$

$\alpha_{14}$  – kąt skreślenia pędników w płaszczyźnie poziomej równy  $29^\circ$ ;

$x_{14}, y_{14}$  – moduł współrzędnych x i y rozmieszczenia pędników w płaszczyźnie poziomej, odpowiednio 0,36 m i 0,18 m.

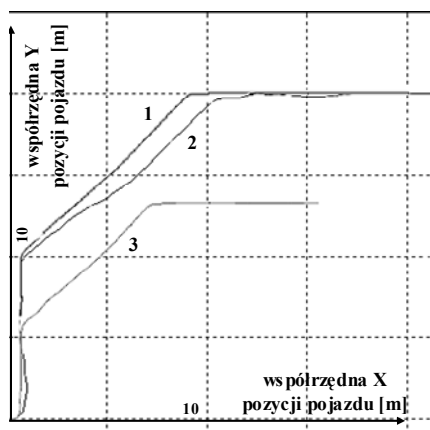


Rys. 2. Rozmieszczenie pędników pojazdu podwodnego typu „Ukwiągł” w płaszczyźnie poziomej XY i pionowej XZ [10]

3. Ustalenie naporów pędników sprawnych  $f_A$ , dla których wymuszenie byłoby najbliższe wymuszeniu z punktu 1. [5]:  $\tau = K_1^{-1} f_A$ .
4. Określenie na podstawie wartości naporów z punktu 3. pierwszego zestawu prędkości obrotowych pędników, dla których będą wytwarzane te napory – jako tzw. pierwszy zestaw danych dla obliczeń genetycznych wykorzystanych później przez algorytm genetyczny.
5. Dodanie jako tzw. drugiego zestawu danych prędkości obrotowych, które w poprzednim kroku wytwarzały napory, algorytm genetyczny zaś uznał je za najlepsze.
6. Wyszukanie, za pomocą algorytmu genetycznego, najlepszego zestawu pędników – do limitu obliczeń (domyślnie 100 pokoleń) – lub znalezienie rozwiązania [3].
7. Zapamiętanie rozwiązania obliczeń dla potrzeb następnych obliczeń.
8. Przekazanie nowych wartości obrotów do pędników pojazdu.

Na rysunku 3. przedstawione są wyniki symulacji, w której w każdym wariancie w tych samych odcinkach czasowych (odpowiednio: 40, 20 i 25 sekund) pojazd ma utrzymać zadany kurs. Na początku nie porusza się. Widać, że będzie zachowywał się różnie podczas awarii. Różnice na wykresie w kształcie charakterystyk 2 i 3 wynikają przede wszystkim z zastosowania użytych w symulacji funkcji proporcji wewnątrz funkcji oceny oraz zadanych dokładności algorytmu.

Z porównania trajektorii pojazdu sprawnego (1) z trajektoriami wybranych uszkodzeń widać, że przy realizacji w tym samym czasie tego samego zadania w przypadku uszkodzenia lewego tylnego pędnika (2) z dużymi niedokładnościami udało się uzyskać trajektorię układu sprawnego, a w przypadku uszkodzenia przedniego prawego pędnika (3) uzyskana została trajektoria o dużej dokładności, ale pomniejszona o stały współczynnik.



Rys. 3. Trajektorie pojazdu.  
 Pojazd wykonuje zadanie:  
 1 – ze sprawnymi pędnikami;  
 2 – uszkodzony tylny lewy;  
 3 – uszkodzony przedni prawy

Proponowana przeze mnie metoda zakłada, że pojazd w przypadku awarii powinien zachowywać się tak, jakby nie było uszkodzenia, ewentualnie wykonywać zadanie proporcjonalnie wolniej – wypadkowe siły działające w płaszczyźnie ruchu i moment skrętu będą zmniejszone o taką samą wartość.

Aby stwierdzić, że pojazd będzie poruszał się proporcjonalnie wolniej, wektory D (wektor wypadkowy sił X i Y) oraz N muszą być proporcjonalnie zmniejszone.

Pierwsza zastosowana funkcja proporcji przy realizacji algorytmu była stworzona na podstawie zakładanej zależności między wektorami D i N (charakterystyka nr 3):

$$\frac{D_A}{D_S} = \frac{N_A}{N_S}.$$

Druga zastosowana funkcja proporcji testowana przy realizacji algorytmu oparta była na zależności, że iloczyn proporcji dąży do 1 (charakterystyka nr 2):

$$P_D P_N \rightarrow 1,$$

gdzie: 
$$P_D = \frac{D_A}{D_S}; P_N = \frac{N_A}{N_S},$$

z tym zastrzeżeniem, że jeśli dla  $P_D$  lub  $P_N$  wygenerowana przez algorytm wartość była większa od 1 (pojazd poruszałby się teoretycznie szybciej, co jest dla jego spójności efektem niepożądanym), wtedy brano jej odwrotność.

## PODSUMOWANIE

Wykorzystanie algorytmizacji genetycznej daje możliwość stworzenia podsystemu wspomagającego sterowanie pojazdem podwodnym, dającego możliwość wykorzystania go mimo wystąpienia awarii pędnika.

Zaletą tego rozwiązania jest duża prostota obliczeń, wynikająca z zastosowania algorytmu genetycznego. Problemem dla projektanta jest stworzenie najprostszej, a zarazem najdokładniej opisującej pożądane właściwości systemu funkcji oceny, określenie warunków przerwania obliczeń, przy których wynik możemy za-



kwalifikować jako poprawny oraz ewentualne znalezienie metod przyspieszających działanie algorytmu. Przy rozwiązywaniu zadania została wykorzystana klasyczna realizacja algorytmu genetycznego.

Wadą, pośrednio, jest czas potrzebny na obliczenie kolejnego kroku iteracji. Ale defekt ten jest stopniowo niwelowany, gdyż aktualny rozwój sprzętu komputerowego oraz samych algorytmów genetycznych pozwala sądzić, że niedługo zastosowanie algorytmizacji genetycznej według przedstawionego w pracy schematu w sterowaniu pojazdem podwodnym w przypadku wystąpienia awarii pędnika poziomego nie będzie stanowiło większego problemu.

Specyfika działania tej metody wymaga dokładnego modelu pracy obiektu. Może on być zarówno liniowy, jak i nieliniowy.

Opisane rozwiązanie daje możliwość rozszerzenia funkcjonalności układu w czasie niektórych awarii w układzie napędowym poprzez dodanie opcji zmiany kątów ustawienia pędników sprawnych, co w konsekwencji powoduje nieznaczne zwiększenie złożoności obliczeniowej algorytmu. Stwarza to możliwość precyzyjnego dokończenia misji – w niektórych przypadkach nawet przy niesprawności dwóch pędników poziomych, a w przy awarii jednego pędnika poziomego pozwala na prawie całkowite zniwelowanie wpływu awarii (operator będzie sterował pojazdem, nie zauważając awarii pędnika).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Fossen T. I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [2] Fossen T. I., Fjellstad O. E., *Nonlinear modelling of marine vehicle in 6 degrees of freedom*, „Journal of Mathematical Modelling of Systems”, 1995, No 1.
- [3] Goldberg D. E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie*, WNT, Warszawa 1998.
- [4] Leszczyński T., *Problem sterowania pojazdem typu ROV po awarii pędnika*, materiały III Międzynarodowej Konferencji „Perspektywy i rozwój systemów ratownictwa, bezpieczeństwa i obronności w XXI wieku”, Gdańsk 2003.
- [5] Leszczyński T., *Wykorzystanie obliczeń genetycznych do sterowania pojazdem „UKWIAŁ” w przypadku awarii pędnika*, materiały IX Konferencji Naukowo-Dydaktycznej „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania i łączności”, Gdynia 2003, s. 401 – 412.

- [6] McGookin E. W., Murray-Smith D. J., Li Y., Fossen T. I., *Non-Linear Tanker Control System Parameter Optimization Using Genetic Algorithms*, Proceedings of the OCEANS '97 Conference, Halifax, Nova Scotia, October 1997.
- [7] McGookin E. W., Murray-Smith D. J., Li Y., Fossen T. I., *Parameter Optimization of a Non-linear Tanker Control System Using Genetic Algorithms*, 2nd IEE/IEEE International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Glasgow 1997.
- [8] McGookin E. W., Murray-Smith D. J., Li Y., Fossen T. I., *Ship steering control system optimization using genetic algorithms*, „Control Engineering Practice”, 2000, No 8, pp. 429 – 443.
- [9] Omerdic E., Roberts G., *Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles*, „Control Engineering Practice”, 2003.
- [10] Szymak P., *Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji dla sterowania pojazdem podwodnym w inspekcji obiektów oceanotechnicznych*, rozprawa doktorska, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2004.

### ABSTRACT

The paper presents a proposal of the solution to the problem related to control of an under-water vehicle when one of its propellers fails while carrying out a task. A genetic algorithmization was applied to solve the task. It was assumed that an under-water vehicle is equipped with a diagnostic system which registers the propeller failure, and a method of vehicle movement in the case of the propeller failure was pre-set. It also includes the initial simulation results of maintaining the pre-set course and possibility of evolution of the method.

Recenzent kmdr dr hab. inż. Bogdan Żak, prof. nadzw. AMW