

**Anna WITKOWSKA, Roman ŚMIERZCHALSKI**  
POLITECHNIKA GDAŃSKA WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## Adaptacyjny regulator kursu statku z zastosowaniem metody backstepping

Dr Anna WITKOWSKA

W roku 2001 ukończyła Wydział Matematyki i Informatyki na Uniwersytecie Gdańskim z tytułem magistra matematyki. Uzyskała stopień doktora nauk technicznych w 2011 roku na Politechnice Warszawskiej w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia projektowania nieliniowych układów sterowania, w szczególności statków nawodnych.



e-mail: awitkowska@ely.pg.gda.pl

Dr hab. inż. Roman ŚMIERZCHALSKI

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym PG specjalność automatyka. Od roku 1980 pracował w Akademii Morskiej w Gdyni, również jako elektroautomatyk na statkach. Od roku 2009 pracuje na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG. Zajmuje się sterowaniem i automatyką systemów okrętowych, metodami sztucznej inteligencji. Jest autorem ponad 200 prac naukowych, książek, skryptów, artykułów i członkiem organizacji technicznych oraz naukowych.



e-mail: romsmier@pg.gda.pl

### Streszczenie

W układach morskich aplikacja nieliniowych technik adaptacyjnych do sterowania ruchem statku jest obecnie niezbędna aby uwzględnić występujące niepewności strukturalne i parametryczne. Jest to szczególnie istotne, ponieważ dynamika statku zależy od dużej masy i wpływu zakłóceń środowiskowych zarówno addytywnych jak i multiplikatywnych, wywołanych przez fale, wiatry i prądy oceaniczne. Artykuł obejmuje zagadnienie projektowania adaptacyjnego układu regulacji kursu statku morskiego. Zaproponowany algorytm sterowania opiera się na adaptacyjnej metodzie backstepping z prawem adaptacji parametrów modelu statku wyprowadzonym w oparciu o teorię II funkcji Lapunowa. W artykule została przeprowadzona analiza poprawności oraz jakości zaprojektowanego regulatora adaptacyjnego. Zbadano zdolność śledzenia zmian wartości zadanej kursu oraz zbieżność do rzeczywistych wartości parametrów. Istotnym problemem w metodzie backstepping jest uwzględnienie na etapie projektowania, urządzenia wykonawczo-sterującego jakim jest maszyna sterowa, ze względu na nieliniową dynamikę opisaną za pomocą nieliniowości z nasyceniem. Algorytmy sterowania dostępne zarówno w literaturze jak i zastosowaniach morskich zazwyczaj zaniedbują dynamikę maszyny sterowej. Przy opracowaniu algorytmu sterowania przyjęty został uproszczony model matematyczny dynamiki statku, natomiast badania symulacyjne wykonano z pełnowymiarowym modelem statku typu B-481.

**Słowa kluczowe:** autopilot, sterowanie adaptacyjne, backstepping, projektowanie prawa sterowania.

### Adaptive ship course controller with use of the backstepping method

#### Abstract

The paper deals with issues concerning the advanced ship course control system. The control algorithm suggested in the work is based on the backstepping method and a genetic algorithm. The ship course adaptive controller configuration was designed with use of the backstepping procedure [see section 2]. The controller version (17) includes the adaptation block of ship model parameters (23)-(25). The adaptation of ship model parameters to the updating law derived on a basis of II Function Lyapunov theory enables us to obtain good adaptation properties of the system in the presence of the so-called parametric uncertainties, e.g. connected with the influence of environmental disturbances, such as wind or a sea wave. The adjustable parameters of the obtained nonlinear steering structures (Fig. 1.) were tuned up in order to optimize the system operation. A genetic algorithm was used for optimization. The quality of operation of the obtained steering structures was analyzed by conducting simulation experiments on a simplified (1)-(4) and complex simulation model of a ship of type B-481, [see Sections 3,4]. The results of computer simulation experiments showed the high quality of control and system stability of such steering (Figs. 2, 3, 4). The considered system realizes basic tasks, such as: stabilization of the system, the tuning of controller amplification, adaptation of the system to changing environmental conditions.

**Keywords:** autopilot, adaptive control, nonlinear control, backstepping method, genetic algorithm.

## 1. Uproszczony model dynamiki statku

Obecnie, do celów sterowania kursem statku najczęściej stosuje się modele liniowe, nieliniowe drugiego rzędu lub modele nieliniowe trzeciego rzędu (np. Norrbina, Nomoto, Becha). Modele te nie uwzględniają jednak m.in. strat prędkości statku, co nie pozwala na pełne odwzorowanie dynamiki prędkości kątowej zwrotu oraz prędkości statku, które są od siebie zależne.

W artykule przyjęto do celów projektowania prawa sterowania model Van Leeuvena, który uwzględnienia sprzężenie pomiędzy prędkością kątową  $r$  oraz prędkością statku  $U$  i kątem wychYLENIA steru  $\delta$ . Został on rozszerzony o równanie uproszczone dynamiki maszyny sterowej. Przyjęty model wraz z maszyną sterową pozwala na zaprojektowanie prawa regulacji, które może być zaimplementowane na rzeczywistej jednostce pływającej.

Przyjmując wektor zmiennych stanu:  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]^T = [\psi(t), r(t), \dot{r}(t), \delta(t)]$  i sygnał wyjściowy  $y(t) = x_1(t)$  oraz zmienną sterującą  $\delta_z(t) = u_c(t)$ , model uproszczony statku wraz z maszyną sterową opisany jest następującym układem równań różniczkowych stopnia czwartego [1]:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t), \quad (1)$$

$$\dot{x}_2(t) = x_3(t), \quad (2)$$

$$\dot{x}_3(t) = \left(\frac{U}{L}\right)^3 cx_4(t) + \varphi^T(t)\theta, \quad (3)$$

$$\dot{x}_4(t) = u_c(t) - x_4(t), \quad (4)$$

w którym dla uproszczenia zapisu dokonane zostały następujące podstawienia:

$$\theta^T = [b_0, b_1, b_2, b_3, a], \quad (5)$$

$$\varphi^T(t) = \left[\left(\frac{U}{L}\right)^3, \left(\frac{U}{L}\right)^2 x_2(t), \frac{U}{L} x_2^2(t), x_2^3(t), \frac{U}{L} x_3(t)\right] \quad (6)$$

W układzie określono stałe parametry modelu statku  $b_0, b_1, b_2, b_3, a$ ; wektor parametrów modelu statku  $\theta \in R^5$  oraz wektor zmiennych stanu, związany z wektorem parametrów  $\theta$ ,  $\varphi \in R^5$ . Wszystkie nieliniowości modelu są zawarte w funkcji  $\varphi$ .

## 2. Regulator backstepping

Celem procesu projektowania regulatora kursu statku jest wyznaczenie prawa sterowania  $u_c(t)$  ze sprzężeniem zwrotnym,

do asymptotycznego śledzenia zadanej wartości kursu statku  $\psi_z(t)$ , w granicach określonego błędu śledzenia.

Projektując prawo sterowania można przyjąć, że posiadamy dokładną informację o obiekcie, tzn. zakładamy że w przyjętym modelu statku wektor parametrów  $\theta$  oraz parametr  $c$  są znane. Wówczas prawo sterowania kursem statku można wyprowadzić stosując klasyczną metodę backstepping. Zagadnienie to było szczegółowo omawiane w pracach [2, 3, 4, 5, 6]. Powołując się na przytoczone niniejsze prace można przyjąć podczas projektowania metodą backstepping wektor błędów regulacji w postaci

$$z(t) = [z_1(t), z_2(t), z_3(t), z_4(t)]^T \quad (7)$$

o następujących składowych

$$z_1(t) = x_1(t) - \psi_z(t), \quad (8)$$

$$z_2(t) = x_2(t) - \dot{\psi}_z(t) - \alpha_1(t), \quad (9)$$

$$z_3(t) = x_3(t) - \ddot{\psi}_z(t) - \alpha_2(t), \quad (10)$$

$$z_4(t) = x_4(t) - \left(\frac{L}{U}\right)^3 \frac{1}{c} \dddot{\psi}_z(t) - \alpha_3(t), \quad (11)$$

dla których funkcje stabilizujące  $\alpha_1(t), \alpha_2(t), \alpha_3(t)$  wyrażają się wzorami

$$\alpha_1(t) = -k_1 z_1(t), \quad (12)$$

$$\alpha_2(t) = -k_2 z_2(t) - z_1(t) + \dot{\alpha}_1(t), \quad (13)$$

$$\alpha_3(t) = \left(\frac{L}{U}\right)^3 \frac{1}{c} (-k_3 z_3(t) - z_2(t) + \dot{\alpha}_2(t) - \varphi^T(t)\theta). \quad (14)$$

Nowa zmienna stanu  $z_1$  reprezentuje minimalizowany uchyb kursu. Zmienna  $z_2$  reprezentuje stabilizowaną prędkość kątową statku. Zmienna  $z_3$  związana jest z przyspieszeniem statku. Funkcje  $\alpha_1(t), \alpha_2(t)$  mają za zadanie stabilizować poszczególne podukłady (1) i (2). Czwarta zmienna stanu  $z_4$  reprezentuje odchylenie kąta wychylenia steru od wartości zadanej.

Jeżeli nie posiadamy dokładnej informacji o obiekcie, a niepewności występują w formie nieznanymi lecz stałymi parametrów, które ponadto zmieniają się liniowo względem zmiennych stanu, wówczas projektowanie układu sterowania można oprzeć na adaptacyjnej metodzie backstepping. Niepełna informacja o obiekcie w przypadku regulacji modelem statku (1)-(4) dotyczy nieznanności wektora parametrów  $\theta$  oraz  $c$ . Założono, że dynamika maszyny sterowej jest znana. Wartości parametrów mogą zmieniać się pod wpływem zmiany warunku pracy układu spowodowanej np. zmianą kursu statku, ciężarem przewożonego ładunku, głębokością wody oraz warunków hydrometeorologicznych. Ponieważ w pierwszych dwóch równaniach modelu (1) i (2) nie występują nieokreśloności procedura projektowania przebiega w sposób analogiczny jak w klasycznej metodzie backstepping. Można zatem przyjąć, że składowe wektora błędów regulacji  $z_1, z_2, z_3$  opisane są wzorami (8)-(10), natomiast funkcje  $\alpha_1(t), \alpha_2(t)$  jako (13)-(14). W celu oceny prawa adaptacji zastąpiono nieznanne parametry  $\theta, c$  oraz  $\rho = 1/c$  przez ich estymaty  $\hat{\theta}, \hat{c}$  oraz  $\hat{\rho}$ . Na podstawie wzorów (11) oraz (14) trzecia funkcja stabilizująca  $\hat{\alpha}_3$  oraz czwarta zmienna stanu  $z_4$  przyjmują postać

$$\hat{\alpha}_3(t) = \left(\frac{L}{U}\right)^3 \hat{\rho} \bar{\alpha}_3(t), \quad (15)$$

$$\bar{\alpha}_3(t) = (-k_3 z_3(t) - z_2(t) + \dot{\alpha}_2(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}).$$

$$z_4(t) = x_4(t) - \left(\frac{L}{U}\right)^3 \hat{\rho} \ddot{\psi}_z(t) - \hat{\alpha}_3(t). \quad (16)$$

Następnie prawo sterowania  $u_c$  określono w postaci wzoru

$$u_c(t) = -k_4 z_4(t) + x_4(t) - \left(\frac{U}{L}\right)^3 \hat{c} z_3(t) + \left(\frac{L}{U}\right)^3 \hat{\rho} \left(\frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_1} x_2(t) + \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_2} x_3(t) + \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_3} \left(\left(\frac{U}{L}\right)^3 \hat{c} x_4(t) + \varphi^T(t)\hat{\theta}\right) + \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial \psi_z} \dot{\psi}_z(t) + \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial \dot{\psi}_z} \dot{\ddot{\psi}}_z(t) + \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial \ddot{\psi}_z} \ddot{\ddot{\psi}}_z(t) + \psi_z^{(4)}(t)\right) + \left(\frac{L}{U}\right)^3 \hat{\rho} (\bar{\alpha}_3(t) + \ddot{\psi}_z(t)) \quad (17)$$

w oparciu o funkcję Lapunowa dla całego układu, uzupełnioną o kwadraty błędów nieznanymi parametrów, w postaci:

$$V_a(t) = \frac{1}{2} z_1^2(t) + \frac{1}{2} z_2^2(t) + \frac{1}{2} z_3^2(t) + \frac{1}{2} z_4^2(t) + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \frac{|c|}{2\gamma_c} \tilde{\rho}^2 + \frac{1}{2\gamma_c} \tilde{c}^2, \quad (18)$$

gdzie:

$$\Gamma = \text{diag}(\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_a) > 0. \quad (19)$$

jest macierzą diagonalną dodatnio określonych współczynników oraz  $\gamma_c > 0$ .

Jej pochodna jest opisana następującym wzorem:

$$\dot{V}_a(t) = z_1(t)\dot{z}_1(t) + z_2(t)\dot{z}_2(t) + z_3(t)\dot{z}_3(t) + z_4(t)\dot{z}_4(t) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{|c|}{\gamma_c} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} + \frac{1}{\gamma_c} \tilde{c} \dot{\tilde{c}}, \quad (20)$$

Ponieważ parametry  $\theta, c$  i  $\rho$  są stałe lub wolnozmiennie można przyjąć z pewnym przybliżeniem, że  $\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\tilde{\theta}}, \dot{\tilde{\rho}} = \dot{\tilde{\rho}}, \dot{\tilde{c}} = -\dot{\tilde{c}}$ . Zatem

$$\dot{V}_a(t) = z_1(t)\dot{z}_1(t) + z_2(t)\dot{z}_2(t) + z_3(t)\dot{z}_3(t) + z_4(t)\dot{z}_4(t) - \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} - \frac{|c|}{\gamma_c} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} - \frac{1}{\gamma_c} \tilde{c} \dot{\tilde{c}}, \quad (21)$$

Wyznaczając na podstawie wzorów (8), (9), (10) i (16) pochodne  $\dot{z}_i, i \in \{1, 2, 3, 4\}$  oraz podstawiając do (21), otrzymujemy

$$\dot{V}_a(t) = -\sum_{i=1}^4 k_i z_i^2(t) + \tilde{\theta}^T (\varphi(t) z_3(t) - \left(\frac{L}{U}\right)^3 \hat{\rho} \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_3} \varphi(t) z_4(t) - \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}) - c \tilde{\rho} ((\bar{\alpha}_3 + \ddot{\psi}_z) z_3(t) + \frac{|c|}{c\gamma_c} \dot{\tilde{\rho}}) + \tilde{c} \left(\left(\frac{U}{L}\right)^3 z_3(t) z_4(t) - \hat{\rho} \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_3} x_4(t) z_4(t) - \frac{1}{\gamma_c} \dot{\tilde{c}}\right), \quad (22)$$

gdzie  $k_1, k_2, k_3, k_4 > 0$  są parametrami projektowania. Aby wyeliminować we wzorze (22) wyrażenia związane z błędami parametrów  $\theta, c$  i  $\rho$ , przyjmujemy następujące prawa adaptacji:

- dla parametru  $\theta$ :

$$\dot{\tilde{\theta}} = \Gamma \varphi(t) (z_3(t) - \left(\frac{L}{U}\right)^3 \hat{\rho} \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_3} z_4(t)), \quad (23)$$

- dla parametru  $\rho$ :

$$\dot{\tilde{\rho}} = -\gamma_c \text{sgn}(c) (\bar{\alpha}_3 + \ddot{\psi}_z) z_3(t), \quad (24)$$

- dla parametru  $c$ :

$$\dot{\hat{c}} = \gamma_c \left( \frac{U}{L} \right)^3 z_3(t) - \hat{\rho} \frac{\partial \bar{\alpha}_3}{\partial x_3} x_4(t) z_4(t). \quad (25)$$

Wyprowadzone prawa adaptacji gwarantują, że pochodna funkcji Lapunowa jest niedodatnio określona i wyrażona ostatecznie wzorem

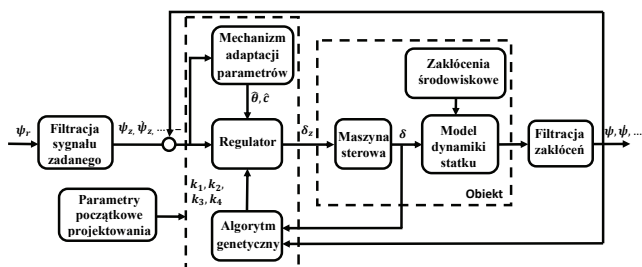
$$\dot{V}_a(t) = - \sum_{i=1}^4 k_i z_i^2(t) \leq 0 \quad (26)$$

dla każdej zmiennej  $z_i \neq 0, i \in \{1, 2, 3, 4\}$ .

Jeśli wartości estymat są poprawne, wówczas błędy estymacji  $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}, \tilde{c} = c - \hat{c}$ , są równe zero oraz  $\theta = \hat{\theta}, c = \hat{c}$ . Zatem prawo sterowania  $u_c$  zapewnia zbieżność sygnału wyjściowego  $x_1$  do wartości zadanej  $\psi_z(t)$  przy  $t \rightarrow \infty$ .

### 3. Struktura układu sterowania

Analiza poprawności oraz jakości zaprojektowanego regulatora adaptacyjnego kursu statku została przeprowadzona przy zastosowaniu do sterowania uproszczonym i pełnowymiarowym modelem matematycznym statku typu B-481 [7], o długości  $L=181$  [m]. Ogólny schemat układu sterowania kursem statku zilustrowano na rysunku 1. Obiekt sterowania zawiera model matematyczny dynamiki statku wraz z modelem zakłóceń środowiskowych oraz modelem układu sterowniczego maszyny sterowej. W skład układu sterowania wchodzi regulator kursu statku, zawierający regułę sterowania wyprowadzoną w oparciu o metodę backstepping, z prawem sterowania (17). Parametry modelu statku szacowano za pomocą adaptacyjnej metody backstepping. Mechanizm adaptacji parametrów dynamicznych modelu statku wyznaczają prawa adaptacji zgodnie ze wzorami (23) i (24), (25). Wzmocnienia regulatora dobierane były z zastosowaniem algorytmów genetycznych (AG). Uzyskane wzmocnienia przyjęto jako dane wejściowe dla regulatora backstepping. Model zakłóceń środowiskowych uwzględniał zakłócenia wiatrowe oraz falowe będące wynikiem działania wiatru. W układzie określono filtr dolnoprzepustowy trzeciego rzędu o częstotliwości 0.05 [rad/s], który pozwala uzyskać gładką charakterystykę sygnału odniesienia kursu oraz jego pochodnych.



Rys. 1. Schemat ogólny układu sterowania kursem statku  
Fig. 1. General scheme of the ship course control system

Początkowe wartości estymowanych parametrów, macierz współczynników adaptacji, parametry nastawne będą szczegółowo omówione podczas badań symulacyjnych. Sygnały mierzone były odfiltrowane przed wprowadzeniem ich w pętlę sprzężenia zwrotnego aby zredukować nadmierne ruchy płetwy sterowej. W tym celu zastosowano filtr dolnoprzepustowy, który pozwala na uzyskanie nieznacznego przesunięcia fazy i amplitudy prędkości kątowej mierzonej i odfiltrowanej oraz sygnału sterującego na wejściu do maszyny sterowej. Opisany układ został zaimplementowany w programie Matlab/Simulink oraz C++.

### 4. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne miały na celu zbadanie poprawności działania regulatora backstepping z mechanizmem estymacji parametrów modelu statku. W badaniach rozpatruje się wpływ dokładności identyfikacji parametrów modelu na dynamikę układu regulacji, zbieżność do rzeczywistych wartości parametrów oraz zdolność śledzenia wartości zadanej kursu. Podczas badań symulacyjnych zostały przyjęte następujące założenia:

- model dynamiczny oraz parametry otaczającego statek systemu wodnego nie są dokładnie znane (znane są jedynie przybliżone z błędem 8% parametry rzeczywiste modelu statku dla określonych zakłóceń);
- Istnieje system pomiarowy, dostarczający dokładną informację o aktualnym kursie statku, prędkości kątowej, bieżącej pozycji i prędkości statku;

Uwzględniając powyższe założenia przeprowadzono próbę manewrową. W układzie przedstawionym na rysunku 1 wartość kursu zadanej była zmieniana skokowo o 10[deg]. Próba testowa została przeprowadzona w warunkach stanu morza  $5[{}^0 B]$  oraz kierunku wiatru 0[deg] z użyciem równań własności dynamicznych statku z parametrami ustalonymi dla stanu zabalastowania.

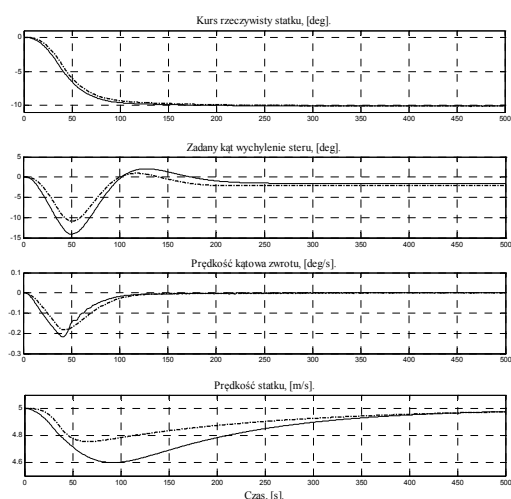
Parametry nastawne regulatora wyznaczone za pomocą AG przyjęto: dla modelu złożonego  $k_1 = 25.4839, k_2 = 23.2258, k_3 = 21, k_4 = 0.7$  i  $k_1 = 29.0645, k_2 = 24.3871, k_3 = 35, k_4 = 1.204$  dla modelu uproszczonego.

Charakterystyki czasowe odpowiedzi układu na zadany kąt wychylenia steru, na podstawie próby testowej w czasie 500[s] z okresem próbkowania 0.5[s] przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4. Porównano działanie układu z modelem uproszczonym i złożonym. Uzyskane wyniki symulacji komputerowej określają zbliżone charakterystyki dla modelu złożonego i uproszczonego, bez przeregulowań. Śledzenie zadanych wartości kursu jest prawidłowe. Maksymalny błąd kursu nie przekracza 1[deg]. Odnośnie użytkowania maszyny sterowej, urządzenie wykonawcze jest pozbawione drgań, kąt wychylenia steru jest funkcją gładką. Ogólna wydajność jest zadowalająca, nie następuje nasycenie organu wykonawczego do maksymalnej wartości kąta wychylenia steru 20[deg]. Do oceny przebiegu przejściowego charakterystyk czasowych kursu statku, przy skokowej zmianie kursu zadane go zastosowano bezpośrednie wskaźniki jakości sterowania: czas narastania  $t_n = 64[s]$  - dla modelu złożonego i  $t_n = 59[s]$  - dla modelu uproszczonego, bez przeregulowania z dokładnością 0.01 i czasem regulacji  $t_R = 198[s]$  - dla modelu złożonego i  $t_R = 298[s]$  - dla modelu uproszczonego, wyznaczany dla 1% strefy przebiegu przejściowego od wartości ustalonej kursu. W *Przepisach Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich* zakłada się utrzymywanie wyznaczonego kursu statku z maksymalną pojedynczą amplitudą 1.5[deg] i dokładnością do 1[deg]. Podczas manewru zmiany kursu prędkość statku zmalała. Po zakończeniu manewru prędkość powraca do wartości początkowej sprzed manewru (po ok. 300[s]). Widoczne na rysunku 2 różnice w otrzymanej charakterystyce prędkości chwilowej modeli statku są częściowo wynikiem przyjętych założeń uproszczonego modelu statku. Składowe wektora zmiennych stanu  $z(t) = [z_1(t), z_2(t), z_3(t), z_4(t)]^T$  dążą do zera (rys. 3). Sugeruje to, że układ zachowuje się stabilnie. Początkowe wartości parametrów modelu, dla których dobierano nastawy regulatora w strukturze sterowania przedstawionej na rysunku 2 wynosiły  $b_0(0) = 17.2103, b_1(0) = -5.4348, b_2(0) = 0.017935, b_3(0) = -0.0086957, a(0) = -12.6087, c(0) = 8.6957, \rho(0) = 0.1150$ . Przyjęte wartości początkowe estymowanych parametrów były równe 25% wartości rzeczywistych parametrów. Wartości rzeczywiste oraz dokładne wartości estymowanych parametrów uzyskane podczas próby dla modelu uproszczonego i złożonego przedstawia tabela 1.

Tab. 1. Wartości rzeczywiste parametrów oraz estymowane dla przyjętych wartości wzmożeń

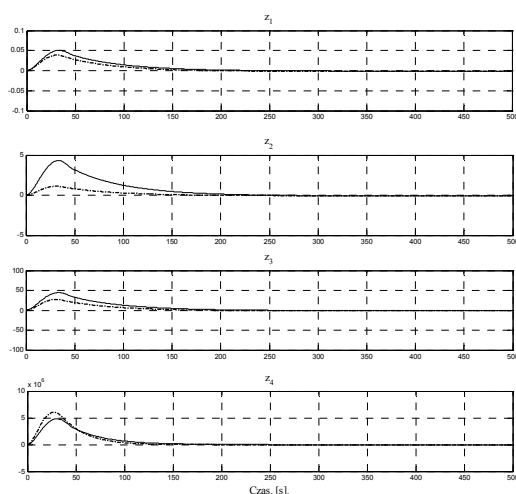
Tab. 1. Real and estimated values of the parameters obtained for the assumed amplifications

	$b_0$ [deg]	$b_1$ [-]	$b_2$ [1/deg]	$b_3$ [1/deg <sup>2</sup> ]	$a$ [-]	$c$ [-]	$\rho$ [-]
w. rzeczywista	68.8413	-21.7391	0.0717	-0.0347	-50.4348	34.7826	0.02875
<b>Model złożony</b>							
w. estymowana	68.8452	-21.738	0.07571	-0.03449	-50.4386	34.1723	0.1397
	$\gamma_0$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_a$	$\gamma_c$	$\gamma_c$
w. wzmożeń	$6.184 \cdot 10^{-11}$	$63.55 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^7$	$62.63 \cdot 10^9$	$58.12 \cdot 10^{10}$	$58.12 \cdot 10^{10}$
<b>Model uproszczony</b>							
w. estymowana	68.8433	-21.7399	0.07188	-0.03466	-50.4348	34.7827	0.1284
	$\gamma_0$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_a$	$\gamma_c$	$\gamma_c$
w. wzmożeń	$4.414 \cdot 10^{-11}$	$8.64 \cdot 10^9$	$1.57 \cdot 10^8$	$3.86 \cdot 10^7$	$2.893 \cdot 10^8$	$9.483 \cdot 10^9$	$9.483 \cdot 10^9$



Rys. 2. Charakterystyki czasowe kursu, kąta wychylenia steru, prędkości zwrotu oraz prędkości statku, przy skokowej zmianie kursu zadanego - model złożony (l. ciągła), model uproszczony (l. przerywana)

Fig. 2. Time-histories of the ship course, rudder deflection angle, turning speed and ship speed during a rapid change of the set course – complex model (solid line), simplified model (dashed line)

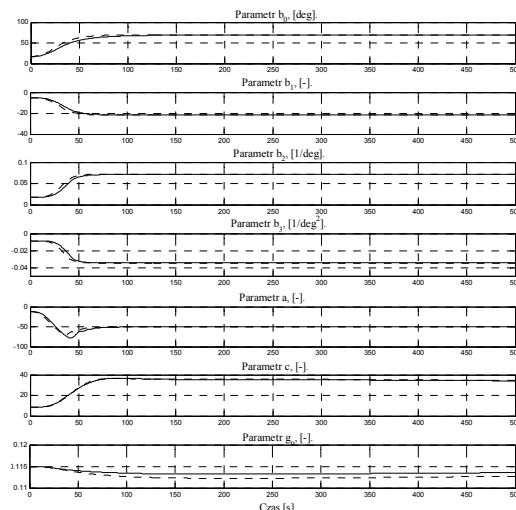


Rys. 3. Charakterystyki czasowe składowych wektora zmiennych stanu, przy skokowej zmianie wartości zadanej kursu - model złożony (l. ciągła), model uproszczony (l. przerywana)

Fig. 3. Time-histories of state variable vector components during a rapid change of the set course – complex model (solid line), simplified model (dashed line)

Metoda backstepping w ogólnym przypadku nie zapewnia zbieżności wszystkich parametrów do wartości rzeczywistych. W rozważanym przypadku odpowiedni dobór macierzy adaptacji

zapewnia zbieżność estymowanych parametrów  $b_1, b_2, b_3, a, c$  do wartości rzeczywistych po ok. 60[deg]. Wartość parametru  $\rho$  zmienia się stosunkowo wolno i nie osiąga wartości rzeczywistej  $1/c$ . Przebiegi parametrów estymowanych dla modelu uproszczonego i złożonego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyki czasowe estymowanych parametrów przy skokowej zmianie kursu zadanego - model złożony (l. ciągła), model uproszczony (l. przerywana)

Fig. 4. Time-histories of the estimated parameters at a rapid change of the set course – complex model (solid line), simplified model (dashed line)

## 5. Wnioski

Opracowany algorytm regulacji kursu statku z zastosowaniem adaptacyjnej metody backstepping zapewnia prawidłową pracę układu sterowania i śledzenie wartości zadanej kursu. Układ automatycznie dostosowuje parametry regulatora do zmieniających się właściwości obiektu sterowania i jego otoczenia. Przy rozpatrywaniu zagadnienia odporności, nieliniowości występujące w układzie są wykorzystywane podczas projektowania prawa sterowania metodą backstepping. Ma to duże znaczenie badając odporność układów sterowania na błędy modelowania. Ponadto nie jest konieczna dokładna znajomość sił i momentów działających na statek. Ponadto uzyskane wyniki sterowania mogą być w pełni akceptowalne dla rzeczywistej praktyki nawigacyjnej.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy N N514 472039.

## 6. Literatura

- [1] Amerongen J.: Adaptive steering of ships - A model reference approach to improved maneuvering and economical course keeping. Ph.D Thesis, Huisdrukkerij, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1982.
- [2] Fossen T.I.: Nonlinear backstepping design: Applications to Mechanical Systems and Ships Control. Automatica 35, 1999.
- [3] Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V.: Nonlinear and Adaptive Control Design. John Wiley&Sons Ltd., New York, 1995.
- [4] Kokotović P., Arcak M.: Constructive nonlinear control: a historical perspective. Automatica 37: 637-662, 2001.
- [5] Witkowska A., Śmierczalski R.: Nonlinear Backstepping Ship Course Controller. International Journal of Automation and Computing 2009; Vol.6 No.3 pp. 277-284.
- [6] Witkowska A., Tomera M., Śmierczalski R.: A backstepping approach to ship course control. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2007, vol. 17, no. 1, 73-85.
- [7] Galbas J.: Synteza układu sterowania precyzyjnego statkiem za pomocą sterów strumieniowych. Rozprawa doktorska, Gdańsk 1988.

otrzymano / received: 25.05.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2012

artykuł recenzowany / revised paper