

XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom II



Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom II



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓŁORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

| | |
|---------------------------|-------------------|
| Przewodniczący | Zdzisław BUBNICKI |
| Zastępca Przewodniczącego | Roman KULIKOWSKI |

CZŁONKOWIE

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Stanisław BAŃKA | Michał BIAŁKO |
| Mikołaj BUSŁOWICZ | Władysław FINDEISEN |
| Ryszard GESSING | Henryk GÓRECKI |
| Jakub GUTENBAUM | Jerzy JÓZEFczyk |
| Stanisław KACZANOWSKI | Tadeusz KACZOREK |
| Janusz KACPRZYK | Jerzy KLAMKA |
| Józef KORBICZ | Zbigniew KOWALSKI |
| Krzysztof KOZŁOWSKI | Juliusz L. KULIKOWSKI |
| Krzysztof KUŹMIŃSKI | Kazimierz MALANOWSKI |
| Krzysztof MALINOWSKI | Wojciech MITKOWSKI |
| Antoni NIEDERLIŃSKI | Władysław PEŁCZEWSKI |
| Tadeusz PUCHAŁKA | Leszek RUTKOWSKI |
| Stanisław SKOCZOWSKI | Roman SŁOWIŃSKI |
| Jerzy ŚWIĄTEK | Andrzej ŚWIERNIAK |
| Ryszard TADEUSIEWICZ | Piotr TATJEWSKI |
| Krzysztof TCHOŃ | Leszek TRYBUS |
| Jan WĘGLARZ | Andrzej P. WIERZBICKI |

KOMITET ORGANIZACYJNY

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Przewodniczący | Roman KULIKOWSKI |
| Zastępcy Przewodniczącego | Janusz KACPRZYK |
| | Stanisław KACZANOWSKI |
| | Tadeusz KACZOREK |
| | Krzysztof MALINOWSKI |
| Członkowie | Roman OSTROWSKI |
| | Tadeusz PUCHAŁKA |
| | Dariusz WAGNER |
| Sekretarze naukowci | Jan STUDZIŃSKI |
| | Jan W. OWSIŃSKI |

ISBN 83-89475-01-4

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

ROBOTY

MODELOWANIE DYNAMIKI ROBOTÓW PODWODNYCH*

Andrzej ŻAK

Akademia Marynarki Wojennej, Zakład Radiolokacji i Hydrolokacji
ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, e-mail: andrzej-zak@wp.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono dwie metody modelowania dynamiki obiektów wielowymiarowych. Pierwsza z nich wykorzystuje algorytmy sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji dynamiki obiektów typu MIMO zaś druga metoda bazuje na transformacie Walsh'a. Na zakończenie pracy przedstawiono wyniki badań poświęconych modelowaniu dynamiki robota podwodnego z wykorzystaniem dwóch przedstawionych metod.

Słowa kluczowe: Robot podwodny, modelowanie, identyfikacja, dynamika, transformata Walsh'a.

1. WSTĘP

Oceany zajmują dwie trzecie powierzchni Ziemi i są domem większości organizmów żywych naszej planety. Jednak ludzkie możliwości poznawania tego środowiska są bardzo ograniczone. Aby pokonać te ograniczenia, większość naukowców zajmujących się eksploracją głębin skupia się na bezzałogowych, zdalnie sterowanych podwodnych robotach pływających. Od lat siedemdziesiątych nastąpił rozwój bezzałogowych pojazdów podwodnych dysponujących obecnie wszystkimi charakterystycznymi cechami robota, a więc możliwością przemieszczania się i manipulacji, zdolnością technicznej obserwacji otoczenia, a także niekiedy samodzielnego wypracowywania decyzji w sytuacjach typowych i powtarzalnych. Obecnie roboty podwodne stały się podstawowym wyposażeniem wielu jednostek pływających ze szczególnym uwzględnieniem platform wiertniczych. Są one także na wyposażeniu wielu ośrodków naukowych i służb ratownictwa morskiego oraz firm zajmujących się pracami podwodnymi. Na całym świecie jest kilkadziesiąt miejsc gdzie prace prowadzone za pomocą robotów podwodnych mają szczególne znaczenie.

Do realizacji prac pod wodą wykorzystuje się manipulatory wyposażone w odpowiednie narzędzia. Łańcuch kinematyczny w bardziej złożonych konstrukcjach sięga odległości nawet do trzech metrów. Tak znaczne wychylenie powoduje zmiany rozkładu masy a tym samym zmienia się dynamika robota podwodnego. W takich przypadkach pojawia się problem pozycjonowania pojazdu podwodnego a tym samym wydłuża się czas potrzebny na wykonanie zadania. W praktyce nie ma moż-

liwości unieruchomienia pojazdu, a jedyną metodą pozwalającą na utrzymanie robota w zadanym miejscu jest pozycjonowanie dynamiczne. Zadanie to jest możliwe do wykonania, jeżeli będzie znana bieżąca dynamika obiektu sterowania. Innym zadaniem stojącym przed robotem podwodnym i wymagającym bieżącej znajomości jego dynamiki jest precyzyjne prowadzenie po zadanej trajektorii z dużą dokładnością i z zachowaniem bezpieczeństwa ruchu. Zadanie to jest szczególnie istotne przy rozpoznaniu przez pojazd podejścia do brzegu ogólniej penetracji dna morskiego, zadań poszukiwania wybranych obiektów w akwenie oraz podczas inspekcji konstrukcji podwodnych. Z powyższych względów w referacie przedstawiono metodę modelowania dynamiki bezzałogowych, zdalnie sterowanych, podwodnych pojazdów pływających.

Przez podwodny obiekt pływający będzie się rozumiało bezzałogowy obiekt całkowicie zanurzony w wodzie, posiadający sześć stopni swobody i połączony z bazą nawodną przewodem lub za pomocą hydroakustycznego kanału łączności. W referacie podwodny obiekt pływający będzie utożsamiany z grupą bezzałogowych pojazdów podwodnych, do których zalicza się: zdalnie sterowane pojazdy podwodne oraz autonomiczne roboty podwodne.

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań jest bezzałogowy zdalnie sterowany pojazd podwodny typu Ukwiąg. Jego parametry techniczne to:

- głębokość robocza: 200 m;
- masa pojazdu: od 50 do 175 kg;
- wyposażenie: dwie kamery TV, sonar omiatający, echosonda, log, przechyłomierz elektrolityczny, kompas magnetyczny i elektroniczny;
- ilość pędników: 6, 4 w poziomie i 2 w pionie;
- napór pojedynczego pędnika: 220 N;
- prędkość maksymalna do przodu 1,5 m/s.

Dla potrzeb prowadzenia symulacji opracowano model matematyczny obiektu badań. Wielkości opisujące ruch pojazdu są zdefiniowane zgodnie z notacją SNAME. Nieliniowe równania ruchu robota podwodnego trakto-

wanego jako ciało sztywne mogą być zapisane w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + \omega q - x_G(q^2 + r^2) + \\
 + y_G(pq - r) + z_G(pr + q)] = X \\
 m[v - \omega p + ur - y_G(r^2 + p^2) + \\
 + z_G(qr - p) + x_G(qp + r)] = Y \\
 m[\dot{\omega} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + \\
 + x_G(rp - q) + y_G(rq + p)] = Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + \\
 + m[y_G(\omega - uq + vp) - z_G(v - \omega p + ur)] = K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + \\
 + m[z_G(u - vr + \omega q) - x_G(\omega - uq + vp)] = M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + \\
 + m[x_G(v - \omega p + ur) - y_G(u - vr + \omega q)] = N
 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: I_x, I_y, I_z – momenty bezwładności względem osi symetrii; m – masa pojazdu; x_G, y_G, z_G – środek masy pojazdu.

Ogólną reprezentację równania ruchu w układzie związanym z ciałem można przedstawić jako:

$$Mv + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2)$$

gdzie: M – macierz mas pojazdu i mas wody dołączonej; C – macierz sił dośrodkowych i Coriolisa; D – macierz oporów hydrodynamicznych; g – macierz momentów i sił przywracających; η – wektor stanu; τ – wektor wymuszeń; v – wektor prędkości.

Współczynniki równań ruchu dla robota podwodnego typu Ukwał zostały wyznaczone podczas badań eksperymentalnych.

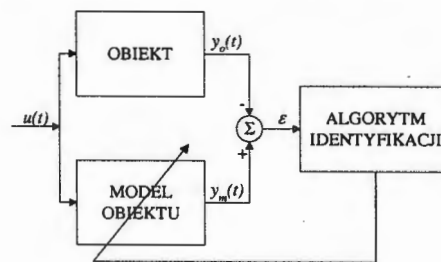
3. METODY MODELOWANIA

W badaniach posłużono się dwoma metodami identyfikacji. Jedną z nich należy do grupy metod numerycznych i wykorzystuje ona funkcje odcinkowo stałe a w szczególności funkcje Walsh, których binarny charakter odgrywa dużą rolę, gdy do realizacji zadań identyfikacji wykorzystywana jest technika cyfrowa. Druga metoda wykorzystuje coraz powszechniej stosowaną sztuczną inteligencję. Z tej grupy metod w artykule rozpatrzone zostały sztuczne sieci neuronowe ze względu na ich atrakcyjne właściwości, takie jak:

- możliwość aproksymacji dowolnych odwzorowań nieliniowych;
- równoległość przetwarzania informacji;
- możliwość uczenia się i adaptacji;
- przetwarzanie sygnałów z wielu wejść i generowanie wielu wyjść (układy wielowymiarowe).

Symbolicznie procedurę identyfikacji rozumianą jako procedurę w wyniku, której na podstawie sygnałów wejściowych i wyjściowych obiektu identyfikacji po-

wstaje jego model uznany za najlepszy zgodnie z przyjętym kryterium jakości, przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Diagram procedury identyfikacji

3.1. Transformata Walsh

Spośród funkcji odcinkowo-stałych najszerze zastosowanie praktyczne znalazły funkcje Walsh, których binarny charakter odgrywa szczególnie dużą rolę, gdy do realizacji zadań identyfikacji wykorzystywana jest technika cyfrowa. Obiekt rozpatrywany jest jako n-wymiarowy liniowy obiekt dynamiczny opisany równaniem:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (3)$$

Celem identyfikacji jest określenie nieznanymi współczynników macierzy A i B na podstawie pomiarów wektorów x i u . Wektory te przedstawić można w postaci rozwinięcia ortogonalnego względem funkcji bazowych Walsh w postaci:

$$x_k = Fw_k, \quad u_k = Hw_k \quad (4)$$

gdzie: w_k – k -ty wektor dyskretnych wartości funkcji Walsh; F – macierz współczynników rozwinięcia ortogonalnego wektora stanu; H – macierz współczynników rozwinięcia ortogonalnego wektora sterującego.

Po obustronnym zsumowaniu równania opisującego obiekt powstanie wyrażenie

$$\sum_{i=0}^k x_{i+1} = \sum_{i=0}^k (Ax_i + Bu_i) \quad (5)$$

Dokonując prostych przekształceń i podstawień równanie to można sprowadzić do postaci:

$$\sum_{i=0}^k Fw_i - Fw_{k+1} - x_0 = \sum_{i=0}^k AFw_i + \sum_{i=0}^k BHw_i \quad (6)$$

Początkowy wektor stanu można także przedstawić w postaci rozwinięcia ortogonalnego względem funkcji Walsh. Korzystając z własności funkcji Walsh, powstanie zależność:

$$FSw_k + FZw_k - x_0w_k = AFSw_k + BHSw_k \quad (7)$$

gdzie: S – macierz operacyjna dla operacji sumowania funkcji Walsh; Z – macierz operacyjna dla operacji przesunięcia funkcji Walsh.

Za wyjątkiem macierzy A i B będącym celem identyfikacji wszystkie pozostałe wektory i macierze w równaniu są znane. Przy założeniu, że wszystkie współ-

czynniki macierzy A i B są nieznaną liczbą niewiadomych jest równa iloczynowi:

$$n(n+r) \quad (8)$$

gdzie: n – rozmiar wektora stanu, r – rozmiar wektora sterującego.

Ponieważ powyższe równanie zawiera n równań, w celu otrzymania jednoznacznego rozwiązania należy rozszerzyć układ równań, biorąc przykładowo $n+r$ dowolnie wybranych próbek funkcji Walsha. Postać rozszerzonego układu równań można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned} FSw_{k_1} + FZw_{k_1} - x_0w_{k_1} &= AFSw_{k_1} + GHSw_{k_1} \\ FSw_{k_2} + FZw_{k_2} - x_0w_{k_2} &= AFSw_{k_2} + GHSw_{k_2} \\ &\vdots \\ FSw_{k_{n+r}} + FZw_{k_{n+r}} - x_0w_{k_{n+r}} &= AFSw_{k_{n+r}} + GHSw_{k_{n+r}} \end{aligned} \quad (9)$$

Z tak utworzonego układu równań można wyznaczyć współczynniki macierzy stanu i macierzy sterowania

3.2. Sztuczne sieci neuronowe

Ponieważ w układach sterowania procesy mają charakter dynamiczny, neuronowe modelowanie wymaga stosowania specjalnych rozwiązań. Jednym z nich może być zastosowanie sieci rekurencyjnych typu Hopfielda lub prostszych sieci typu propagacji wstecznej. W ostatnim przypadku jest to typowa sieć statyczna, ale poprzez umowne rozszerzenie wektora wejściowego i wyjściowego modelowanego obiektu o wartości w chwilach poprzednich uzyskuje się efekt zachowania dynamicznego. W ostatnich badaniach w celu otrzymania charakteru dynamicznego sieci neuronowych dynamika zostaje wprowadzona do neuronu w taki sposób, aby aktywność neuronu zależała od jego wewnętrznych stanów. Ciekawym rozwiązaniem jest zamodelowanie połączeń zamiast stałymi wartościami współczynników wagowych, liniową dyskretną transmitancją operatorową G . W takim przypadku równanie neuronu przyjmuje postać:

$$y(k) = F\left(\sum_{i=1}^N G_i(z^{-1})x_i(k)\right) \quad (10)$$

gdzie: k - indeks dyskretnego czasu; N - liczba wejść; G - liniowa dyskretna transmitancja operatorowa.

Uwzględniając sposób wprowadzenia dynamiki w równaniu, każdy neuron w dynamicznej sieci neuronowej odtwarza przeszłe wartości sygnałów mając do dyspozycji dwa sygnały: sygnał wejściowy i sygnał wyjściowy. Rys. 2 przedstawia strukturę neuronu, z jednym wyjściem i wieloma wejściami.

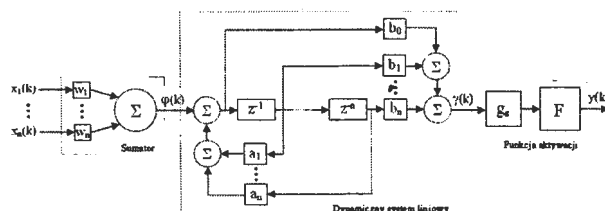
W bloku sumowania następuje obliczanie sumy ważonej informacji dochodzących do neuronu na podstawie zależności

$$\varphi(k) = \sum_{i=1}^N w_i x_i \quad (11)$$

Obliczona suma ważona jest przetwarzana w bloku filtru, który może być liniowym systemem dynamicznym dowolnego rzędu. Strukturę tą można opisać następującym równaniem różnicowym

$$\begin{aligned} \gamma(k) &= -a_1\gamma(k-1) - \dots - a_n\gamma(k-n) + \\ &+ b_0\varphi(k) + b_1\varphi(k-1) + \dots + b_n\varphi(k-n) \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie: φ – wejście bloku filtru w danej chwili; γ – wyjście filtru w danej chwili; a, b – wektory wag sprzężeń zwrotnych i połączeń jednokierunkowych.



Rys. 2. Model neuronu dynamicznego

Ostatecznie sygnał wyjściowy neuronu będący sygnałem wyjściowym bloku aktywacji wyznaczamy z zależności:

$$y(k) = F[g_s \gamma(k)] \quad (13)$$

gdzie: F – nieliniowa funkcja aktywacji; g_s – współczynnik nachylenia funkcji aktywacji.

Celem algorytmu nauczania neuronu o takiej postaci jest wyznaczenie wartości jego parametrów (wartości wag w oraz wartości parametrów filtru a i b oraz współczynnika nachylenia funkcji aktywacji g_s), bazując na danym zbiorze par wzorców wejściowych i wyjściowych zgodnie z ogólnie przyjętymi metodami w teorii sieci neuronowych.

4. WYNIKI BADAŃ

Do badań wykorzystano nieliniowy model robota podwodnego typu Ukwał. Przyjęty wektor stanu ma postać:

$$[u, v, w, \varphi, \phi, \psi]$$

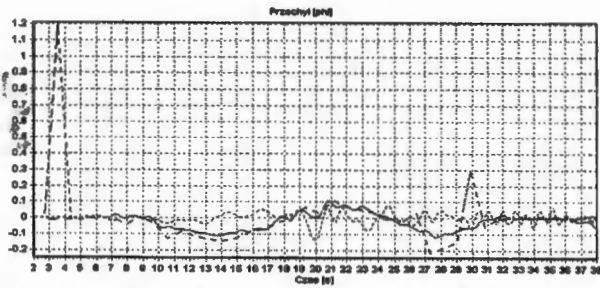
gdzie: u, v, w – prędkość postępową, dryfu i pionową; φ, ϕ, ψ – kąt przechyłu, przygiębnienia i kursu.

Wektor sterujący ma postać:

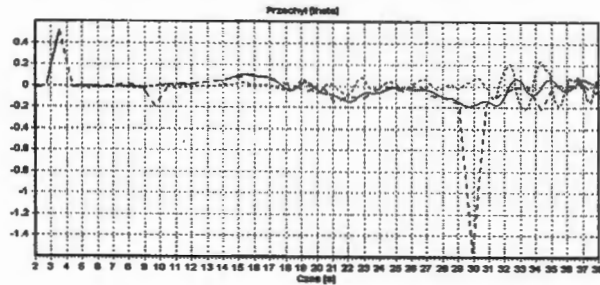
$$[\tau_x, \tau_y, \tau_z]$$

gdzie: τ_x, τ_y, τ_z – napory w trzech osiach pojazdu wzdłużnej, poprzecznej i normalnej.

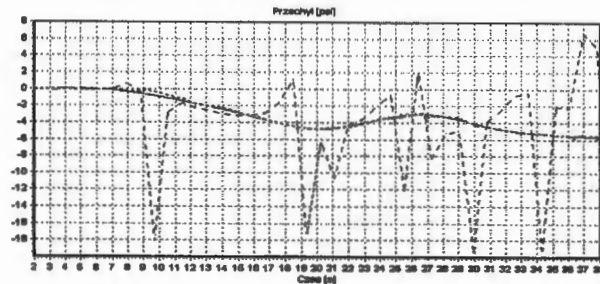
Przykładowe wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów na rys. 2 do rys. 8. Na wykresach tych linią ciągłą zaznaczono odpowiedź obiektu, linią kropkowaną odpowiedź modelu neuronowego zaś linią przerywaną odpowiedź modelu utworzonego z wykorzystaniem funkcji Walsha.



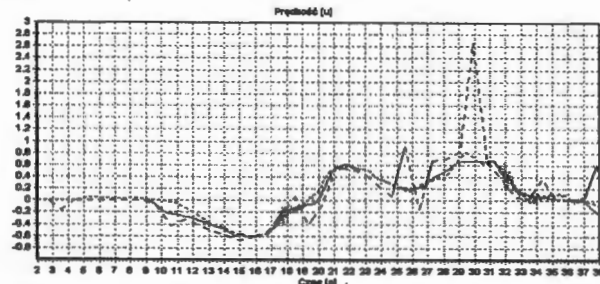
Rys. 3. Wykres odpowiedzi obiektu, modelu neuronowego i modelu numerycznego dla kąta przechyłu



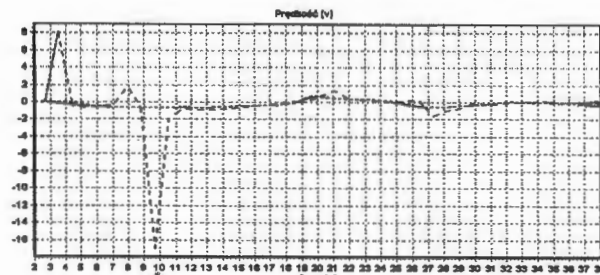
Rys. 4. Wykres odpowiedzi obiektu, modelu neuronowego i modelu numerycznego dla kąta przygiębnia



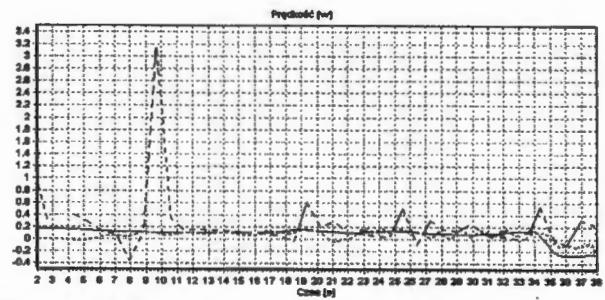
Rys. 5. Wykres odpowiedzi obiektu, modelu neuronowego i modelu numerycznego dla kąta kursu



Rys. 6. Wykres odpowiedzi obiektu, modelu neuronowego i modelu numerycznego dla prędkości postępowej



Rys. 7. Wykres odpowiedzi obiektu, modelu neuronowego i modelu numerycznego dla prędkości dryfu



Rys. 8. Wykres odpowiedzi obiektu, modelu neuronowego i modelu numerycznego dla prędkości pionowej

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników prowadzonych badań można między innymi wnioskować iż:

- identyfikacja z wykorzystaniem przyjętej metody numerycznej w odróżnieniu od metody neuronowej nie pozwala na prowadzenie identyfikacji obiektu w czasie rzeczywistym;
- metoda identyfikacji wykorzystująca sztuczne sieci neuronowe charakteryzuje się mniejszym uchybem odpowiedzi obiektu i tworzonych modeli;
- przy sygnałach szybkozmiennych występują większe błędy pomiędzy odpowiedzią obiektu i modelem

W dalszym etapie badań należy przebadać wpływ struktury sieci neuronowej, metody uczenia oraz jej parametrów na szybkość tworzenia i dokładność tworzonych modeli a także przeprowadzić badania na obiekcie rzeczywistym pracującym w warunkach eksploatacyjnych.

MODELING OF UNDERWATER VEHICLES' DYNAMICS

Abstract: The paper presents two methods of modeling of multiply input multiply output objects. First of them uses the algorithms of artificial neural networks to identify the dynamics of multidimensional objects, second method is based on Walsh transform. At the end of the paper the results of research in which introduced methods were used to identify the dynamics of remotely operated underwater vehicle were presented.

Literatura

- [1] Fossen Thor I. (1994) *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons, Chichester.
- [2] Garus J. (1993) *Identyfikacja parametrów ruchu obiektów pływających w warunkach eksploatacyjnych z zastosowaniem metod numerycznych*, AMW, Gdynia.
- [3] Kitowski Z., Żak A. (2004) *Dynamical system identification using Walsh Transform*, WSEAS Multi-conference, Turcja 2004, CD-ROM.
- [4] Ossowski S. (1996) *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. WNT, Warszawa.



Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4