

**ZESZYTY NAUKOWE NR 6(78)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

INŻYNIERIA RUCHU MORSKIEGO 2005

Tomasz Cepowski

**Aproksymacja kołysań bocznych kontenerowca S-175
na fali nieregularnej oparta na parametrach
eksploatacyjnych statku**

Słowa kluczowe: *właściwości morskie, kołysania boczne, sztuczne sieci neuronowe, aproksymacja, parametry eksploatacyjne, fala nieregularna.*

Przedstawiono aproksymację kołysań bocznych kontenerowca S-175 na fali nieregularnej opartą na parametrach eksploatacyjnych statku. Wartości wzorcowe kołysań bocznych obliczono dokładnymi metodami numerycznymi za pomocą programu SEAWAY. Funkcję aproksymacyjną opracowano za pomocą sztucznych sieci neuronowych i przedstawiono w postaci analitycznej. Prezentowana metodyka może pozwolić na prognozowanie rzeczywistych wartości kołysań bocznych, opartych na danych zarejestrowanych na statku.

**Approximation of Roll Amplitudes of a S-175 Containership
in Irregular Waves on the Basis of Main Service Parameters**

Keywords: *seakeeping, roll, artificial neural networks, approximation, service parameters, irregular wave.*

The paper presents approximations of roll amplitudes of a S-175 containership occurring in irregular waves on the basis of main service parameters. Standard values of ship's roll were determined by means of exact numerical methods by using the SEAWAY software. The relationships were elaborated by means of artificial neural networks and presented as an analytical function. The proposed approach may be used to approximate real values of roll angle amplitude on the basis of data recorded onboard the ship during its service.

Wstęp

W zagadnieniach współczesnej żeglugi poszukuje się trasy żeglugi spełniającej szereg kryteriów, spośród których najistotniejszymi są zwykle kryteria związane z czasem podróży przy ustalonych parametrach układu napędowego oraz kosztami eksploatacji, na które składają się zwykle koszty zużycia paliwa. Ograniczeniem, mającym istotny wpływ na wybór trasy jest warunek bezpiecznej żeglugi, który obejmuje szereg czynników, a spośród nich na szczególną uwagę zasługuje zachowanie się statku na fali sztormowej. Na zachowanie się statku na fali wpływa tak wiele parametrów, że uwzględnienie ich wszystkich, bardzo komplikuje proces planowania trasy żeglugi. Dlatego, spośród wszystkich tych parametrów, kapitan statku jest zmuszony wziąć pod uwagę tylko najistotniejsze, do których zwykle zalicza się parametry falowania, parametry ruchu statku czy też wybrane parametry hydromechaniczne statku. Ten skromny zasób informacji uniemożliwia wykorzystanie dokładnych metod wyznaczania ruchów statku na fali.

W literaturze naukowej brak jest metod pozwalających na rozwiązanie tego problemu w sposób zadowalający. Zalecenia projektowe dotyczące właściwości morskich statku publikowane w przepisach klasyfikacyjnych mają bardzo ograniczony charakter. Przedstawione tam procedury obliczeń są mało dokładne i pozwalają na wyznaczenie jedynie kołysań i przyspieszeń „projektowych”, które w małym stopniu są powiązane z rzeczywistym zachowaniem się statku na fali. Publikowane w literaturze naukowej aproksymacje właściwości morskich są zwykle zbyt ogólne, mało dokładne i można je zastosować jedynie do określonego kształtu kadłuba [1, 5].

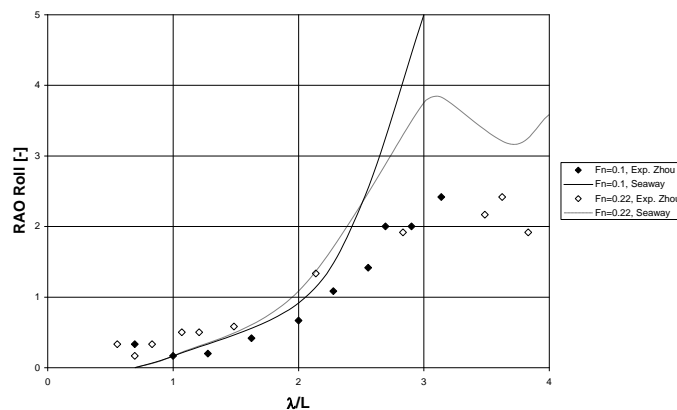
W publikacjach [9, 10] przedstawiono aproksymacje funkcji przenoszenia kołysań statku na fali regularnej oparte na parametrach projektowych statku. Powyższe aproksymacje znalazły zastosowanie w zagadnieniach wstępnego projektowania statku do modelowania wymiarów głównych, co przedstawiono w pracy [8]. Natomiast w publikacjach [2, 7] omówiono metody pozwalające na aproksymacje kołysań bocznych opartych na parametrach eksploatacyjnych statku oraz parametrach falowania dla wybranego statku. Przy czym powyższe aproksymacje kołysań bocznych opracowane zostały jedynie dla kołysań na fali bocznej.

W artykule podjęto próbę rozwiązania tego problemu oraz opracowanie uproszczonego i jednocześnie dokładnego modelu prognozowania kołysań bocznych statku na fali nieregularnej opartego na podstawowych parametrach eksploatacyjnych statku w pełnym zakresie kątów nabiegu fali oraz w pełnym zakresie prędkości.

1. Znaczące amplitudy kołysań bocznych statku na fali nieregularnej

Do aproksymacji kołysań bocznych statku na fali nieregularnej posłużono się metodą przedstawioną w pracach [1, 7]. W pierwszym etapie, posługując się

dokładnymi metodami numerycznymi, wyznaczono wartości wzorcowe kołysań bocznych. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu SEAWAY, który jest programem opartym na teorii płaskiego opływu, obliczającym ruchy statku na fali regularnej i nieregularnej. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyki amplitudowe kołysań bocznych, obliczone za pomocą tego programu w zestawieniu z charakterystykami wyznaczonymi z badań modelowych [11].



Rys. 1. Funkcje przenoszenia kołysań bocznych na fali bocznej kontenerowca „Nedlloyd Dejima” o wymiarach $L = 270$ m, $B = 32,20$ m, $d = 10,85$ m, $CB = 0,596$, $ZG = 16,45$ m [3]

Obliczenia znaczących amplitud kołysań bocznych $\phi_{1/3}$ przeprowadzono dla modelowego kontenerowca S-175 o wymiarach:

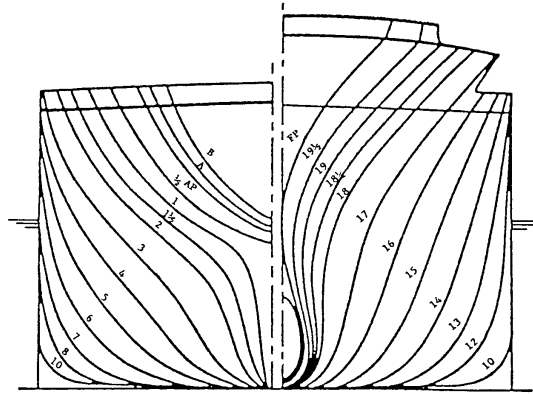
- L (długość między pionami) 175 m,
- B (szerokość) 25,4 m,
- d (zanurzenie konstrukcyjne) 9,5 m.

Na rysunku 2 przedstawiono kształt kadłuba tego statku. Do obliczeń przyjęto następujące parametry eksploatacyjne oraz parametry falowania:

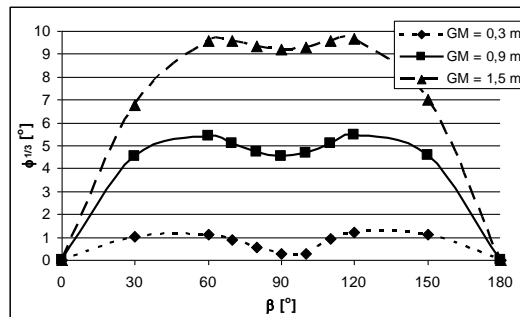
- prędkość statku V w zakresie od 0 do 20 w co 5 w;
- zanurzenie d w zakresie od 5 do 11 m co 2 m;
- początkowa poprzeczna wysokość metacentryczna GM w zakresie od 0,3 do 1,5 m co 0,6 m;
- kąty nabiegu fali na statek $b = 0^\circ$ (fala przeciwna), 30, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 150, 180° (fala nadążająca);
- wysokość znacząca fali H_s w zakresie od 2 do 5 m co 1 m;
- okres charakterystyczny fali T od 6,5 do 14,5 s co 2 s.

W wyniku obliczeń uzyskano zbiór danych liczący 13 200 rekordów, który w dalszej części badań wykorzystano do opracowania aproksymacji. Na rysun-

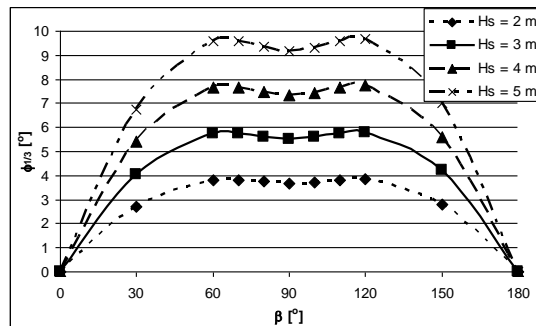
kach 3 – 7 przedstawiono wybrane zależności pomiędzy obliczonymi kołysaniami bocznymi, parametrami eksploatacyjnymi statku oraz parametrami falo-
wania w różnych kombinacjach.



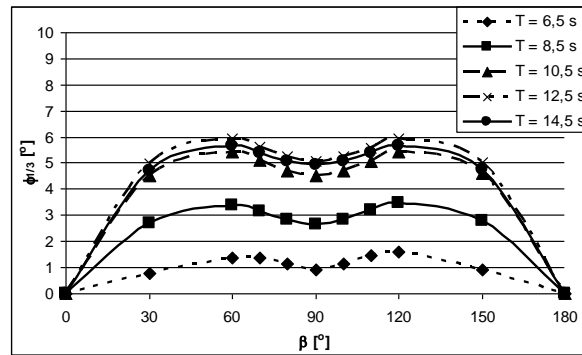
Rys. 2. Linie teoretyczne kontenerowca S-175



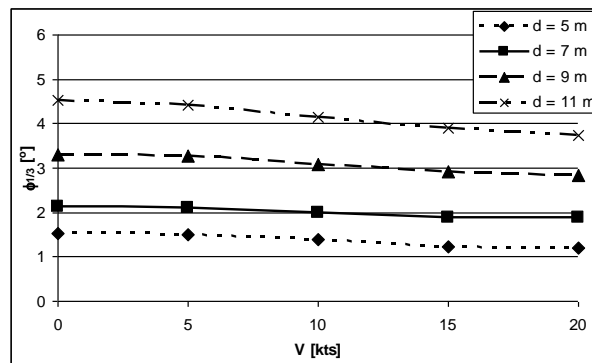
Rys. 3. Znaczące amplitudy kołysań bocznych $\phi_{1/3}$, kontenerowiec S-175,
 $GM = \text{var}$, $\beta = \text{var}$, $V = 0$ w, $H_s = 5$ m, $T = 10,5$ s, $d = 11$ m



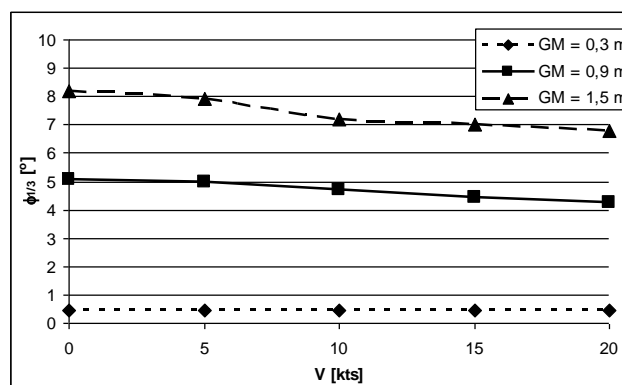
Rys. 4. Znaczące amplitudy kołysań bocznych $\phi_{1/3}$, kontenerowiec S-175,
 $H_s = \text{var}$, $\beta = \text{var}$, $V = 0$ w, $GM = 1,5$ m, $T = 10,5$ s, $d = 11$ m



Rys. 5. Znaczące amplitudy kołysań bocznych $\phi_{1/3}$, kontenerowiec S-175, $T = \text{var}$, $\beta = \text{var}$, $V = 0$ w, $GM = 0,9$ m, $Hs = 5$ m, $d = 11$ m



Rys. 6. Znaczące amplitudy kołysań bocznych $\phi_{1/3}$, kontenerowiec S-175, $d = \text{var}$, $V = \text{var}$, $\beta = 90^\circ$, $GM = 0,9$ m, $Hs = 5$ m, $T = 10,5$ s



Rys. 7. Znaczące amplitudy kołysań bocznych $\phi_{1/3}$, kontenerowiec S-175, $GM = \text{var}$, $V = \text{var}$, $\beta = 90^\circ$, $d = 11$ m, $Hs = 5$ m, $T = 12,5$ s

2. Aproksymacja kołysań bocznych za pomocą sztucznych sieci neuronowych

Na podstawie zbioru danych opracowanego w punkcie 1 rozpoczęto poszukiwania funkcji aproksymującej kołysania boczne w postaci:

$$X \xrightarrow{f} Y \quad (1)$$

gdzie:

- X – zbiór parametrów eksploatacyjnych (wejściowych),
- Y – zbiór wartości znaczących kołysań bocznych (wyjściowych),
- f – poszukiwana funkcja aproksymująca.

W badaniach założono, że aproksymacje kołysań bocznych zostaną przeprowadzone na podstawie następujących parametrów:

- zanurzenie d ,
- prędkość statku V ,
- poprzeczna początkowa wysokość metacentryczna GM ,
- kąt nabiegu fali na statek β ,
- wysokość znacząca fali H_s ,
- okres charakterystyczny fali T .

Wartości powyższych parametrów wchodziły w skład zbioru X równania (1), natomiast zbiór Y składał się z wartości amplitud znaczących kołysań bocznych.

Celem tego etapu badań było wyznaczenie funkcji aproksymującej f .

W publikacji [2] przedstawiono aproksymacje kołysań bocznych na fali regularnej i nieregularnej za pomocą metod statystycznych i sztucznych sieci neuronowych na fali bocznej. Z rozważań tych wynika, że sztuczne sieci neuronowe aproksymujące kołysania boczne na fali nieregularnej przynoszą zadowalające rezultaty zarówno w zakresie, jak i poza zakresem przyjętych wartości parametrów wejściowych. Natomiast aproksymacje za pomocą metod statystycznych dla tego typu kołysań są mniej dokładne.

Stąd też, do wyznaczenia funkcji f wykorzystano sztuczne sieci neuronowe. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do aproksymacji nieznanymi zależnościami należy do metod matematyczno-numerycznych, pochodzących z obszaru tzw. „sztucznej inteligencji” i jest częściej stosowane w różnych dziedzinach nauki i techniki. Rezultaty badań, opublikowane w pracach [6, 9, 10], wskazują na coraz szersze możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji w zagadnieniach dotyczących eksploatacji i projektowania statków.

W przeprowadzonych badaniach przetestowano następujące typy sieci neuronowych:

- perceptron wielowarstwowy (MLP – multilayer perceptron) z sigmoidową funkcją aktywacji;
- GRNN (Generalized Regression Neural Network), sieć regresyjna;
- RBF sieć o radialnych funkcjach bazowych.

Etap poszukiwania najlepszej sieci składał się z następujących kroków:

- 1) określenie najlepszej struktury sieci za pomocą algorytmów genetycznych,
- 2) uczenie sieci (zwykle metodą Backpropagation),
- 3) testowanie sieci,
- 4) ocena dokładności aproksymacji sieci oparta na danych testowych.

Do walidacji i testowania sieci wykorzystano zbiór liczący 50% ilości wariantów, które usunięto ze zbioru danych uczących na drodze losowania.

Najdokładniejszą siecią okazała się sieć typu MLP o strukturze 6 (wejść) x 3 (neuronów ukrytych) x 1 wyjście (rys. 7), która charakteryzuje się:

- najmniejszym błędem uczenia $RMS = 1,26^\circ$,
- najmniejszym błędem testowania $RMS = 1,27^\circ$.

Wartości błędu RMS obliczono wg równania (2):

$$RMS = \sqrt{\frac{(\phi_w - \phi_{1/3})^2}{n}} \quad (2)$$

gdzie:

RMS – wartość błędu,

ϕ_w – wartości wzorcowe znaczących amplitud kołysań bocznych wykorzystywane do uczenia lub testowania sieci neuronowej,

$\phi_{1/3}$ – aproksymowane znaczące amplitudy kołysań bocznych,

n – liczba rekordów.

Obliczenia przeprowadzono za pomocą pakietu STATISTICA Neural Networks. Poszukiwaną funkcję aproksymującą znaczące amplitudy kołysań bocznych $\phi_{1/3}$, opracowaną za pomocą powyższej sieci neuronowej, przedstawiono w postaci analitycznej za pomocą równania (3):

$$\phi_{1/3} = \frac{14,6994}{2,3436 + \exp \left(-1 \cdot \begin{bmatrix} d \cdot 0,1667 - 0,8333 \\ GM \cdot 0,8333 - 0,25 \\ V \cdot 0,05 \\ \beta \cdot 0,0056 \\ Hs \cdot 0,3333 - 0,6667 \\ T \cdot 0,5 + 0,125 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,5547 & 2,0838 & -0,3376 & -3,5700 & 0,9443 & 1,1397 \\ -0,3584 & -1,1482 & -0,1031 & 6,6863 & -0,3397 & -0,5362 \\ -0,2620 & -1,5215 & -0,8529 & 12,3731 & -0,6921 & -0,1976 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,7077 \\ -0,2457 \\ 1,5985 \end{bmatrix} \right)} \quad (3)$$

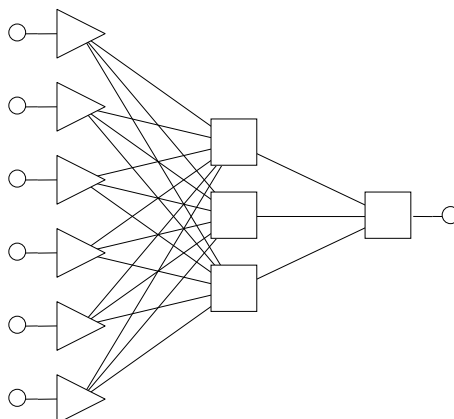
gdzie:

- $\phi_{1/3}$ – znacząca amplituda kołysań bocznych [°],
- d – zanurzenie statku [m],
- GM – poprzeczna początkowa wysokość metacentryczna [m],
- V – prędkość statku [w],
- β – kąt nabiegu fali na statek [°],
- T – okres charakterystyczny fali [s],
- Hs – wysokość znacząca fali [m].

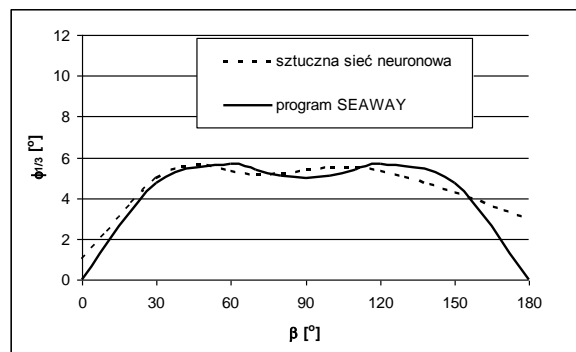
Analiza wrażliwości opracowanej sieci neuronowej wykazała, że istotne są wszystkie parametry wejściowe, o istotności wg kolejności:

- 1) poprzeczna początkowa wysokość metacentryczna GM ,
- 2) kąty nabiegu fali na statek β ,
- 3) wysokość znacząca fali Hs ,
- 4) okres charakterystyczny fali T ,
- 5) prędkość statku V ,
- 6) zanurzenie d .

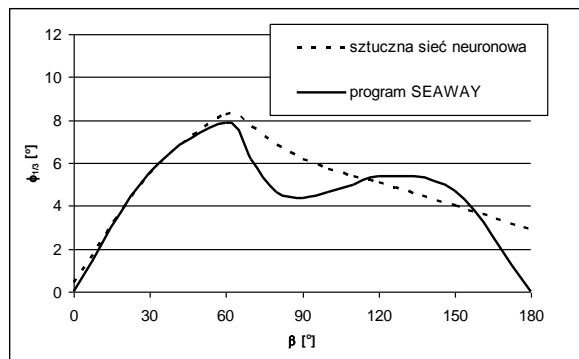
Na rysunkach 8 – 10 przedstawiono porównanie aproksymacji kołysań bocznych obliczonych wg równania (3) z wartościami obliczonymi metodami dokładnymi za pomocą programu SEAWAY w zakresie interpolacji i ekstrapolacji. Z powyższych zestawień wynika, że funkcja aproksymująca znaczące amplitudy kołysań bocznych opisana równaniem (3) charakteryzuje się odpowiednią dokładnością oraz odpowiednimi trendami w stosunku do wartości kołysań obliczonych programem SEAWAY.



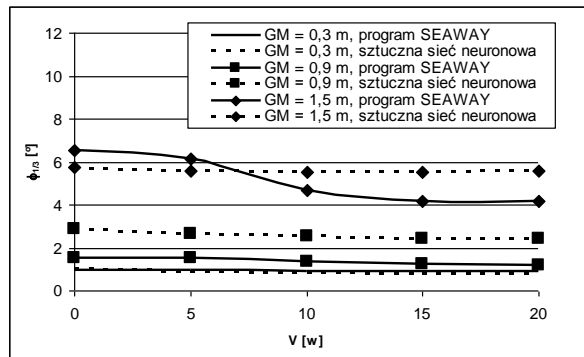
Rys. 7. Struktura sztucznej sieci neuronowej aproksymującej kołysania boczne



Rys. 8. Porównanie aproksymacji znaczących amplitud kołysań bocznych z wartościami testowymi, $\beta = \text{var}$, $V = 0$ w, $GM = 0,9$ m, $T = 14,5$ m, $Hs = 5$ m, $d = 11$ m



Rys. 9. Porównanie aproksymacji znaczących amplitud kołysań bocznych z wartościami testowymi, $\beta = \text{var}$, $V = 0$ w, $GM = 1,5$ m, $T = 12,5$ m, $Hs = 5$ m, $d = 5$ m



Rys. 10. Porównanie aproksymacji znaczących amplitud kołysań bocznych z wartościami testowymi, $V = \text{var}$, $GM = \text{var}$, $\beta = 90^\circ$, $T = 10,5$ m, $H_s = 5$ m, $d = 5$ m

Podsumowanie

Zaprezentowana w badaniach metodyka umożliwia aproksymowanie odpowiedzi statku na falowanie oparte na podstawowych parametrach eksploatacyjnych statku.

W artykule przedstawiono aproksymację kołysań bocznych opartych na następujących parametrach eksploatacyjnych:

- prędkość statku,
- zanurzenie,
- początkowa poprzeczna wysokość metacentryczna,
- kierunek nabiegu fali na statek,

oraz parametrach falowania:

- wysokość znacząca fali,
- okres charakterystyczny fali.

Funkcja aproksymująca kołysania boczne została opracowana z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i przedstawiona w postaci funkcji analitycznej. Opracowana funkcja aproksymująca charakteryzuje się odpowiednią dokładnością w stosunku do wartości testowych kołysań bocznych.

Wartości wzorcowe kołysań bocznych zostały wyznaczone dokładnymi metodami numerycznymi. Zakładając, że wartości te nie odbiegają znacząco od rzeczywistych kołysań bocznych statku, powyższą metodykę można zastosować do prognozowania tych kołysań opartych na danych zarejestrowanych na statku.

Literatura

1. Calisal S.M., Howard D., Mikkelsen J., *A Seakeeping Study of the UBS Series*. Marine Technology, Vol. 34, No. 1, Jan. 1977.

2. Cepowski T., *Application of statistical method and artificial neural networks for approximating ship's roll in beam waves*. Polish Maritime Research, No 2, April 2005.
3. Journée J.M.J., *Verification and Validation of Ship Motions Program SEAWAY*. Report1213a, Delft University of Technology, The Netherlands 2001.
4. Kukner A., Aydm M., *Influence of Design Parameters on Vertical Motions of Trawler Hull Forms in Head Seas*. Marine Technology, Vol. 34, No. 3, July 1997.
5. Karppinen T., *Criteria for Seakeeping Performance Predictions*. ESPOO 1987.
6. Mesbashi E., Bertram V., *Empirical Design Formulae Using Artificial Neural Nets*. 1st International EuroConference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, COMPIT'2000, Potsdam 2000.
7. Staszewska K., Cepowski T., *Prognozowanie kołysań bocznych statku za pomocą sztucznych sieci neuronowych*. Zeszyty Naukowe AM Nr 2(74), Szczecin 2004.
8. Szlangiewicz T., *Ship's Operational Effectiveness Factor as Criterion Cargo Ship Design Estimation*. Marine Technology Transaction, Polish Academy of Sciences, Branch in Gdańsk, Vol. 11, 2000.
9. Szlangiewicz T., Cepowski T., *Application of artificial neural networks to investigation of ship seakeeping ability, Part 1*. Polish Maritime Research, Vol 8, no 3, September 2001.
10. Szlangiewicz T., Cepowski T., *Application of artificial neural networks to investigation of ship seakeeping ability, Part 2*. Polish Maritime Research, Vol 8, no 4, December 2001.
11. Zhou Z., Zhou D., Xie N., *A Seakeeping Experiment Research on Flokstra Container Ship Model*. Technical Report 4 of Study on Reviewing Freeboards of ICLL 1966, China Classification Society, Shanghai Rules and Research Institute Shanghai, China 1996

Recenzenci

dr hab. inż. Tadeusz Szlangiewicz, prof. PS

dr inż. Zbigniew Szozda

Adres Autora

dr inż. Tomasz Cepowski

Akademia Morska w Szczecinie

Instytut Nawigacji Morskiej
ul. Wały Chrobrego 1/2
70-500 Szczecin