



„Parametryczne metody modelowania właściwości morskich
statku”

Tomasz Cepowski

Szczecin, 2010



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Parametryczne metody modelowania właściwości morskich statku

Streszczenie: W artykule przedstawiono parametryczne metody modelowania właściwości morskich statku bazujące na podstawowych uogólnionych parametrach geometrycznych kadłuba. Powyższe metody mogą znaleźć zastosowanie na etapie wstępnego projektowania statków lub ocenie zachowania się statku na fali przy ograniczonych informacjach o kształcie kadłuba.

Słowa kluczowe: statek, właściwości morskie, modelowanie, parametry projektowe, wymiary główne

1 Wstęp

Pojęcie: *właściwości morskie statku* dotyczy zachowania się statku na wzburzonym morzu i obejmuje szereg zjawisk dotyczących oddziaływania fali na statek, tj. kołysań oraz pochodnych i towarzyszących im efektów takich jak

1. uderzanie fali o dno i burty statku, czyli tzw. sleming,
2. zalewanie pokładu w różnych rejonach statku,
3. wynurzanie się śruby napędowej,
4. przyspieszenia pionowe i poziome poprzeczne w różnych rejonach statku:
5. dodatkowe obciążenia dynamiczne kadłuba i ładunku,
6. pogorszenie stateczności i pogorszenie właściwości manewrowych,
7. drgania kadłuba,
8. wzrost oporów statku i spadek prędkości,
9. choroba morska.

Metody przedstawiania właściwości morskich na etapie projektowania wstępnego mają zwykle charakter opisowy, uznaniowy i nie zawsze są ściśle. Wynika to z trudności związanych z opisaniem i prognozowaniem właściwości morskich. Dlatego, zwykle kołysania statku oraz towarzyszące im zjawiska rozpatruje się w kategoriach funkcji losowych i opisuje się je za pomocą statystycznych parametrów lub wskaźników.

Na rys. 1.1 przedstawiono model prognozowania właściwości morskich na podstawie parametrów projektowych dostępnych na wstępnym etapie projektowania statku opierający się na liniowej teorii kołysań. W tym modelu funkcje przenoszenia kołysań oraz towarzyszących im zjawisk na fali regularnej są wyznaczane na podstawie parametrów projektowych statku przy założonych parametrach ruchu statku. Stosując liniową teorię kołysań i zakładając:

- warunki falowania,
- kryteria dla właściwości morskich,
- prawdopodobieństwa występowania falowania na trasie żeglugowej,

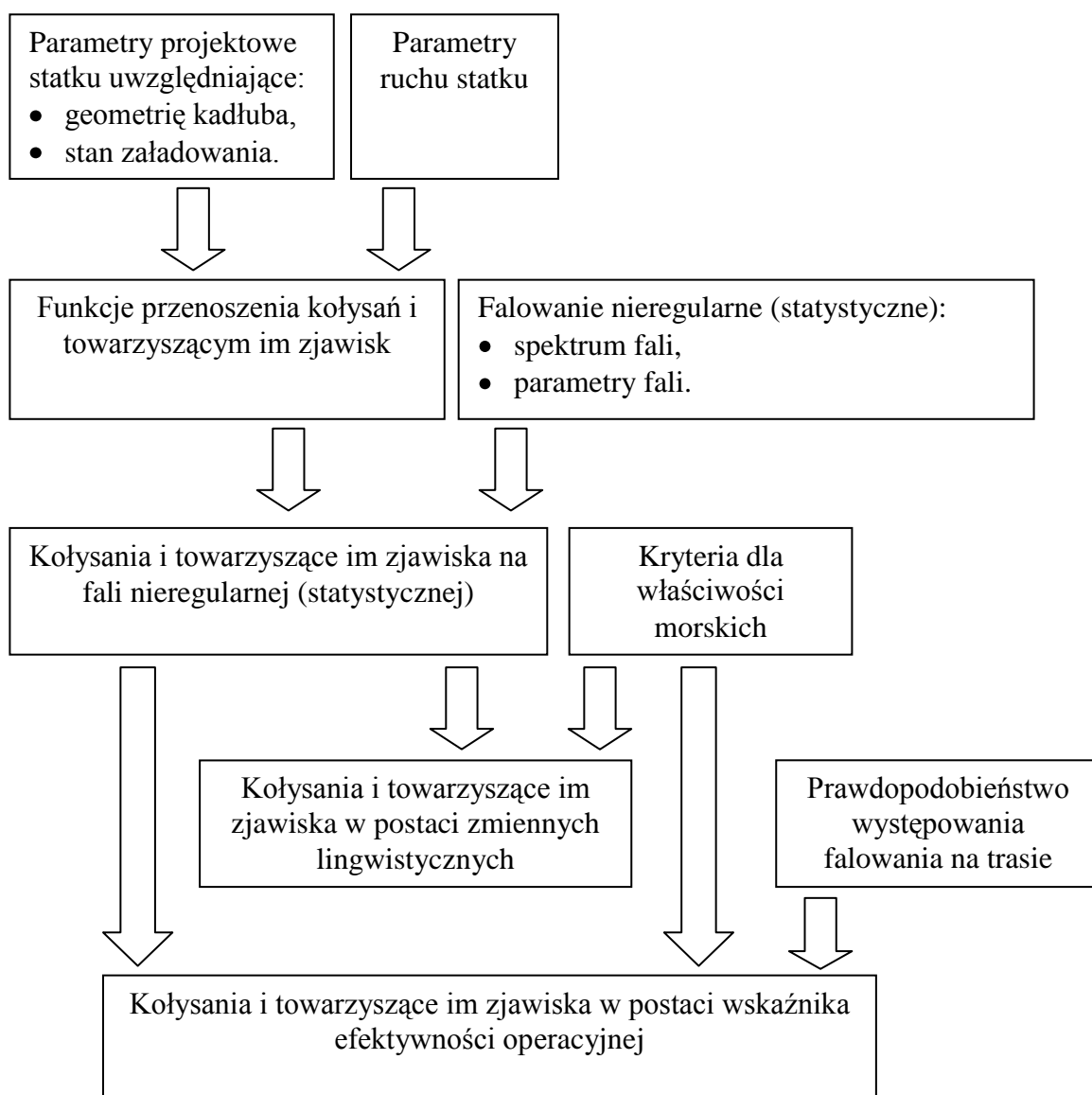
można obliczyć i przedstawić kołysania statku oraz towarzyszące im zjawiska w postaci:

- parametrów statystycznych na fali nieregularnej (statystycznej),
- zmiennych lingwistycznych,
- wskaźnika efektywności operacyjnej.

W ten sposób obliczone właściwości morskie można opisać za pomocą umownego parametru lub wskaźnika, który w sposób ogólny został przedstawiony symbolem „K”.

W następujących rozdziałach przedstawiono:

1. modelowanie właściwości morskich w postaci funkcji przenoszenia na fali regularnej,
2. modelowanie właściwości morskich w postaci parametrów statystycznych na tzw. fali statystycznej,
3. modelowanie właściwości morskich w postaci zmiennych lingwistycznych,
4. modelowanie właściwości morskich w postaci wskaźnika efektywności operacyjnej.



Rys. 1.1 Model prognozowania właściwości morskich na podstawie parametrów projektowych statku opierający się na liniowej teorii kołysań

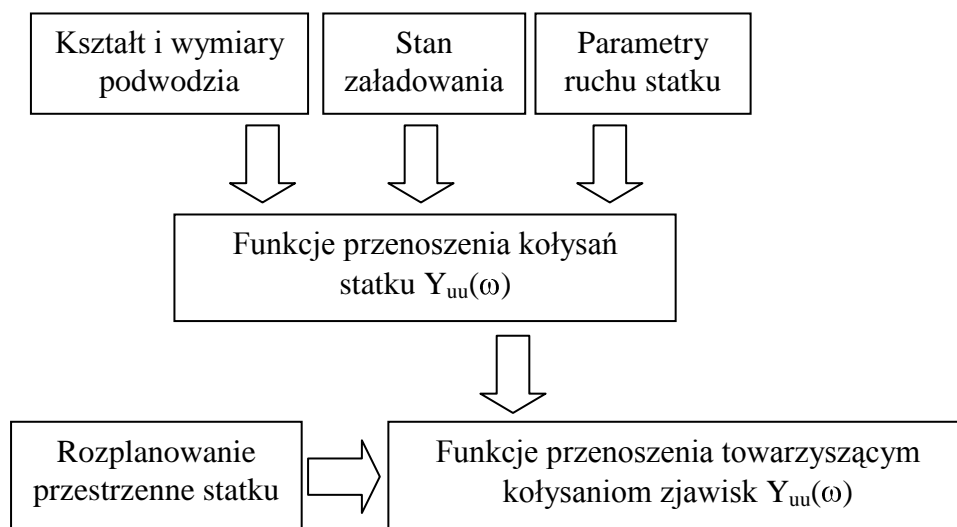
2 Modelowanie właściwości morskich w postaci funkcji przenoszenia

Do obliczenia kołysań i towarzyszących im zjawisk wymagane są dane dotyczące m.in.:

1. kształtu i wymiarów podwozia,
2. rozplanowania przestrzennego statku,
3. stanu załadowania,
4. parametrów ruchu statku.

Na rys. 2.1 przedstawiono schemat blokowy przedstawiający wpływ poszczególnych danych wejściowych na funkcje przenoszenia kołysań i towarzyszących im zjawisk.

Wartości funkcji przenoszenia przedstawione są w postaci bezwymiarowej najczęściej w zależności od okresu (lub częstości) fali regularnej (rys. 2.2).



Rys. 2.1 Wielkości mające wpływ na funkcje przenoszenia kołysań i towarzyszących im zjawisk

Na podstawie funkcji przenoszenia kołysań i towarzyszących im zjawisk można:

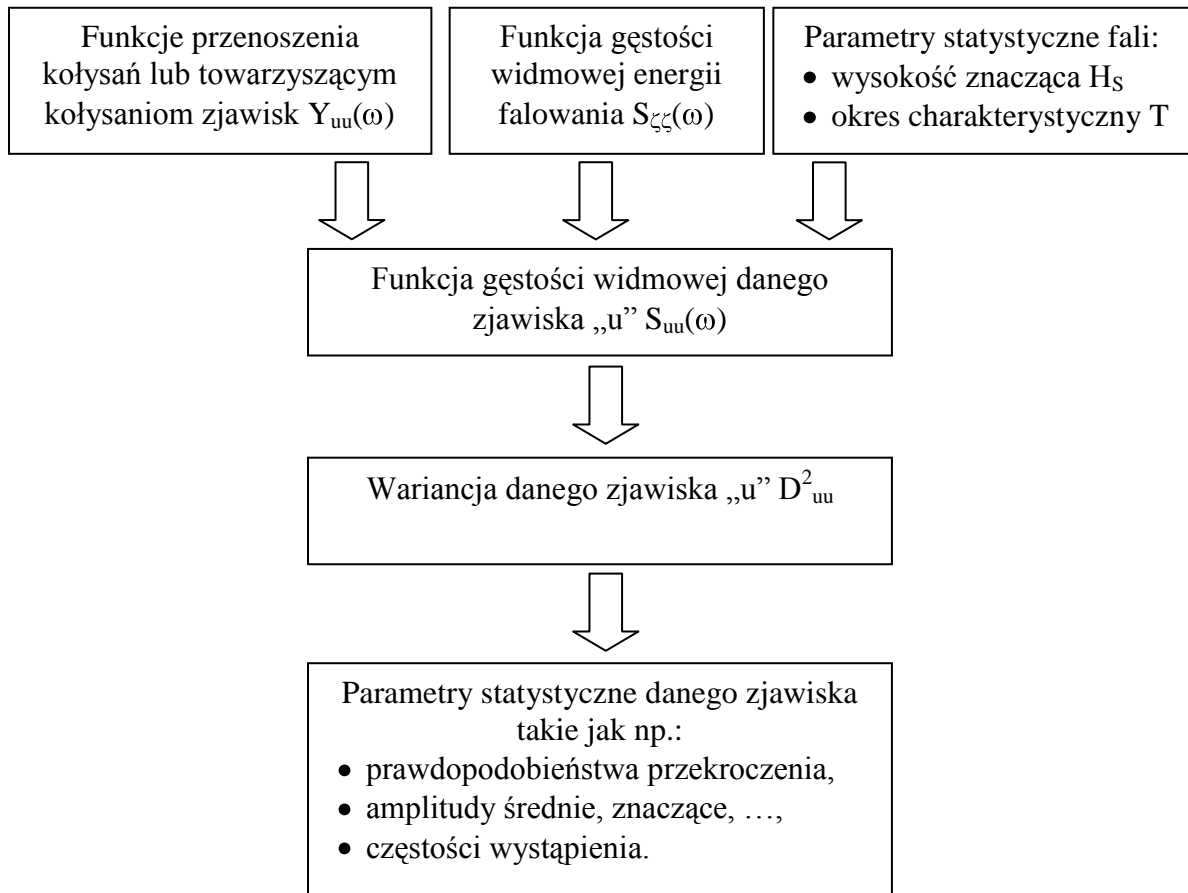
1. wyznaczyć m.in. parametry statystyczne danego zjawiska na fali nieregularnej statystycznej o dowolnych parametrach i dowolnej funkcji gęstości widmowej energii falowania,
2. prowadzić analizy wpływu poszczególnych danych wejściowych na przebiegi tych funkcji.

Pierwsze podejście pozwala na prowadzenie wszelkiego rodzaju analiz zachowania się statku znajdującego się w dowolnych (statystycznych) warunkach pogodowych. Na rys. 2.2 przedstawiono ogólny algorytm obliczania właściwości morskich na fali nieregularnej w oparciu o funkcje przenoszenia. Znając model właściwości morskich statku w postaci funkcji przenoszenia jest możliwe m.in. prognozowanie statystycznych wartości właściwości morskich statku znajdującego się w warunkach operacyjnych opisanych dowolnym scenariuszem deterministycznym.

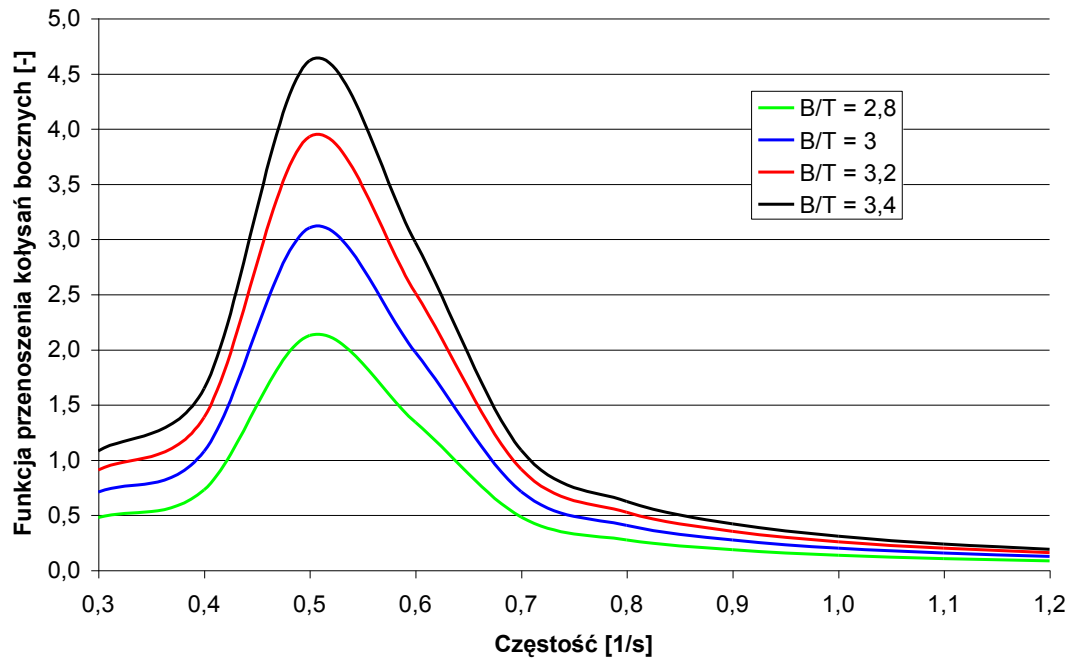
Drugie podejście pozwala na badanie wpływu poszczególnych danych wejściowych na funkcje przenoszenia. Przykładowo na rys. 2.3 przedstawiono wpływ stosunku szerokości B do zanurzenia T masowca o wyporności $D = 45\ 000$ t na przebiegi funkcji przenoszenia kołysań bocznych na fali bocznej. Podobnie można prowadzić różnego rodzaju analizy dotyczące:

- wpływu parametrów kształtu i wymiarów podwodzia,
- wpływu stanu załadowania,
- wpływu parametrów ruchu,
- wpływu rozplanowania przestrzennego statku,

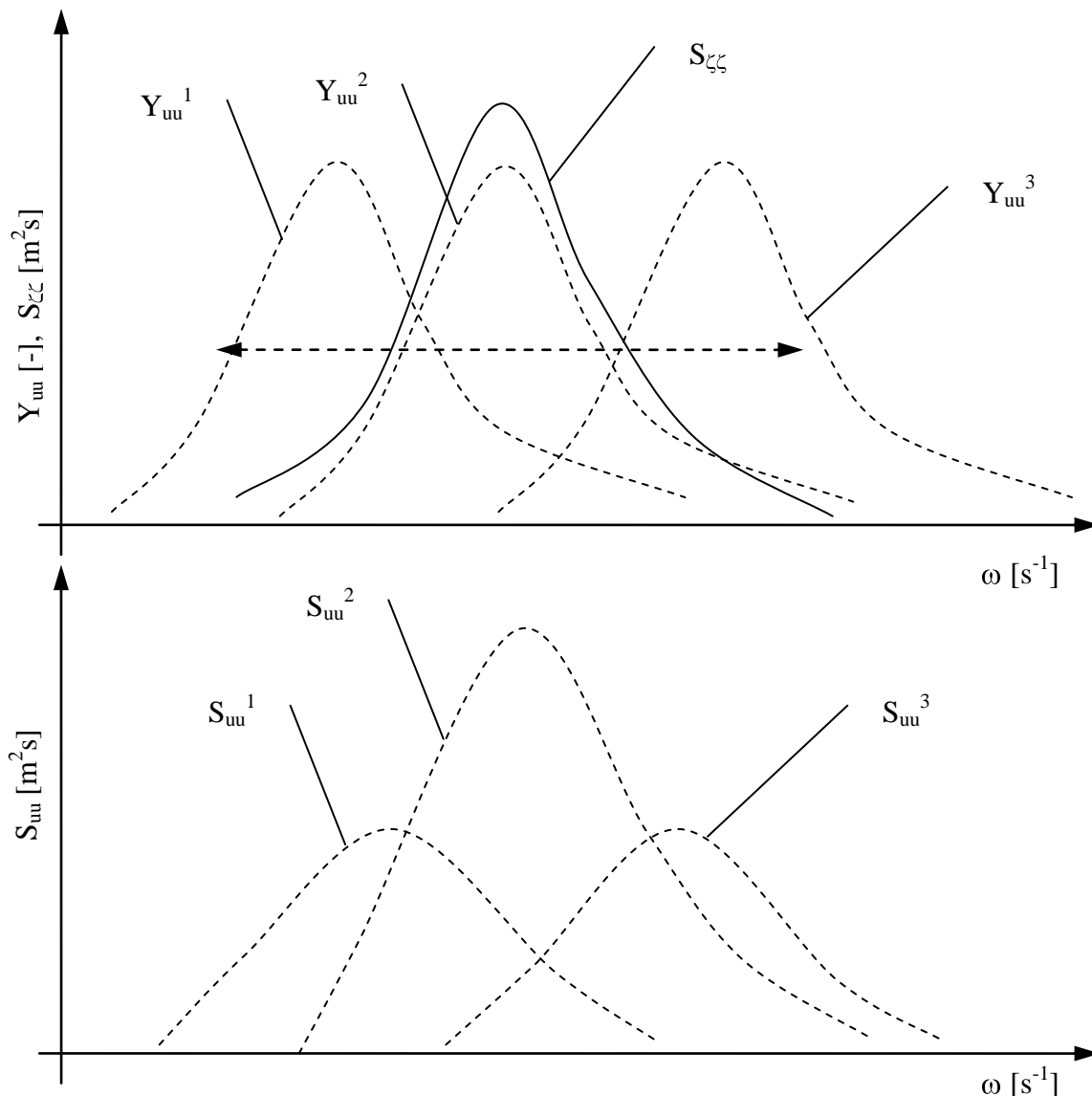
na przebiegi funkcji przenoszenia. Takie podejście pozwala przeprowadzić analizę wpływu przebiegu funkcji przenoszenia kołysań na przebieg funkcji gęstości widmowej kołysań przy ustalonej funkcji gęstości widmowej energii falowania (rys. 2.4). W ten sposób jest możliwe porównanie alternatywnych rozwiązań projektowych i wybór rozwiązania najlepszego bez konieczności obliczania właściwości morskich na fali nieregularnej.



Rys. 2.2 Algorytm obliczania wartości statystycznych kołysań lub towarzyszących im zjawisk na fali statystycznej



Rys. 2.3 Wpływ B/T na funkcję przenoszenia kołysań bocznych masowca a wyporności $D = 45\ 000\ t$
 $\beta_w = 90^\circ$, $V = 4\ w.$, $B/T = var$



Rys. 2.4 Wpływ przebiegu funkcji przenoszenia Y_{uu} na przebieg funkcji gęstości widmowej kołysań S_{uu} przy ustalonej funkcji gęstości widmowej energii falowania $S_{\zeta\zeta}$. Wartości funkcji S_{uu} obliczone wg zależności: $S_{uu}^i(\omega) = |Y_{uu}^i(\omega)|^2 S_{\zeta\zeta}(\omega)$, $i = 1, 2, 3$

Modelowanie wybranych właściwości morskich w postaci funkcji przenoszenia rzedstawiono w pracach [2] [3] [5] [11]. Na podstawie badań opisanych w [2] i [3] okazało się, że dosyć charakterystyki amplitudowe i fazowe kołysań bocznych można zamodelować za pomocą następujących zależności:

$$Y_{\Phi}(\omega_E) = \frac{a_{\Phi} \cdot \sin \beta_W}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_E^2}{\omega_{\Phi 0}^2}\right)^2 + \left(b_{\Phi} \frac{\omega_E}{\omega \omega_{\Phi 0}}\right)^2}} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{\Phi}(\omega_E) = \varepsilon_0 + \operatorname{arctg}\left(\frac{b_{\Phi} \cdot \omega_{\Phi 0} \cdot \omega_E}{\omega_{\Phi 0}^2 - \omega_E^2}\right) \quad (1.2)$$

gdzie:

Y_{Φ} - charakterystyka amplitudowa kołysań bocznych,

ε_{Φ} - charakterystyka fazowa kołysań bocznych,

$a_{\Phi}, b_{\Phi}, \varepsilon_0$ – współczynniki zależne od parametrów projektowych,

ω_E – częstość spotkaniowa,

$\omega_{\Phi 0}$ – częstość kołysań własnych,

β_w – kąt nabiegu fali na statek.

Natomiast charakterystyki amplitudowe kiwań można opisać za pomocą zależności [2] i [3]:

$$Y_{\Theta} \cdot \psi_E \approx \frac{c_{\Theta}}{\left(\left(1 - \frac{\omega_E^2}{a_{\Theta}^2} \right)^2 + \left(b_{\Theta} \frac{\omega_E}{a_{\Theta}} \right)^2 \right)^3} \quad (1.3)$$

gdzie:

Y_{Θ} - charakterystyka amplitudowa kiwań,

$a_{\Theta}, b_{\Theta}, c_{\Theta}$ – współczynniki zależne od parametrów projektowych.

Natomiast w publikacji [11] opracowano model aproksymacji bezwymiarowego współczynnika dodatkowego oporu na fali:

$$\rho_{AW} = \frac{a \cdot \omega}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \left(b \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (1.4)$$

gdzie:

ρ_{AW} – bezwymiarowy aproksymowany współczynnik dodatkowego oporu na fali,

ω – częstość fali,

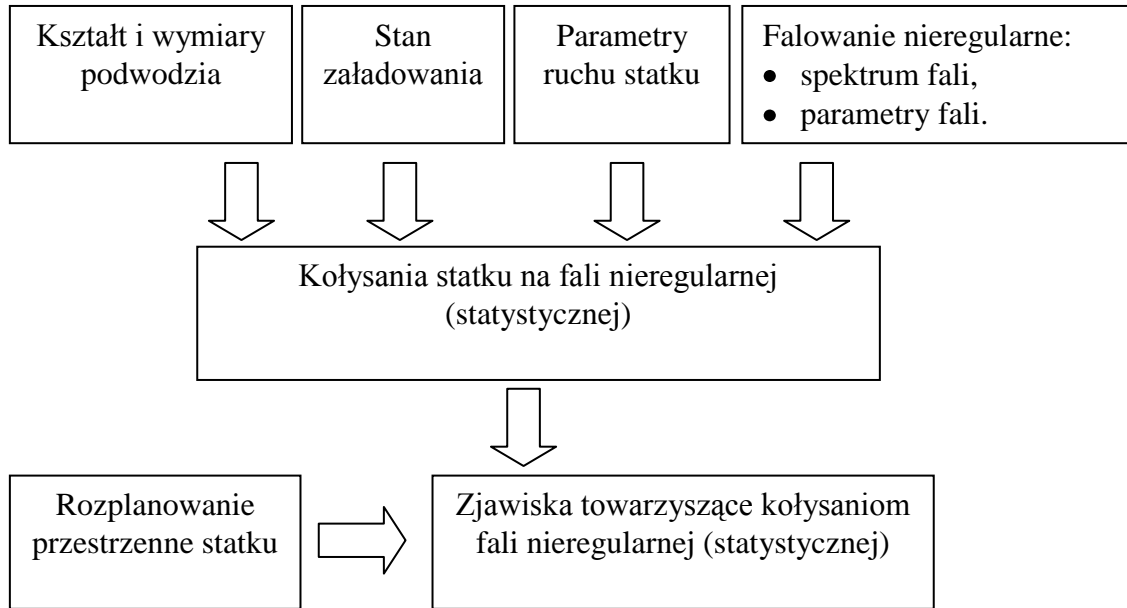
a, b, ω_0 – parametry uzależnione od parametrów geometrycznych kadłuba statku.

Współczynniki we wzorach (1.2) - (1.4) zależą m.in. od parametrów projektowych. Te współczynniki można aproksymować za pomocą metod statystycznych i metod opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych.

3 Modelowanie właściwości morskich na fali statystycznej

Do obliczenia kołysań i towarzyszących im zjawisk na fali nieregularnej wymagane są dane dotyczące (rys. 3.1):

- kształtu i wymiarów podwodzia,
- rozplanowania przestrzennego statku,
- stanu załadowania,
- parametrów ruchu statku,
- warunków falowania:
 - spektrum falowania,
 - parametry fali nieregularnej.



Rys. 3.1 Wielkości wpływające na właściwości morskie na fali nieregularnej (statystycznej)

Właściwości morskie przedstawione w postaci wartości statystycznych można wykorzystać do oceny zachowania statku na fali nieregularnej. Zgodnie z [1], [18] na tej podstawie można opracować analizę efektywności operacyjnej statku na założonej trasie żeglugi, co może być wykorzystane do oceny zachowania się statku znajdującego się w założonych umownych warunkach operacyjnych.

Modelowanie właściwości morskich statku przedstawionych w postaci wartości statystycznych przedstawiono m.in. w pracach [4][5][6][8][9][10][12][14].

Przykładowo amplitudy znaczące kołysań bocznych kontenerowca na fali nieregularnej zamodelowano za pomocą następujących zależności [5]:

$$\phi_{1/3} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot GM \cdot T \cdot Hs + \alpha_2 \cdot d \cdot GM \cdot V \cdot T \cdot Hs + \alpha_3 \cdot d^2 \cdot GM^2 + \alpha_4 \cdot GM^2, \quad (1.5)$$

$$\phi_{1/3} = \alpha_0 + \exp(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot d + \alpha_3 \cdot GM + \alpha_4 \cdot V + \alpha_5 \cdot T + \alpha_6 \cdot Hs), \quad (1.6)$$

lub

$$\phi_{1/3} = \frac{\left(\frac{1}{1 + e^{-(d, GM, V, T, Hs) \times S + P} \times A - B} \times C - \alpha_0 \right) - \alpha_1}{\alpha_2} \quad (1.7)$$

gdzie:

$\phi_{1/3}$ – znacząca amplituda kołysań bocznych [°],

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ – współczynniki,

A, B, C – macierze wartości wag sztucznej sieci neuronowej,

d – zanurzenie statku [m],

GM – początkowa poprzeczna wysokość metacentryczna [m],

V – prędkość statku [w],

T – okres charakterystyczny fali [s],

Hs – wysokość znacząca fali [m].

W pracy [6] przedstawiono model kiwań kontenerowca na fali nieregularnej:

$$\Psi_{1/3} = \frac{\left(\frac{1}{1 + e^{-((d, V, \beta, Hs, T) \times S + P) \times A - B}} \times C - \alpha_0 \right) - \alpha_1}{\alpha_2} \quad (1.8)$$

gdzie:

$\Psi_{1/3}$ – znacząca amplituda kiwań [°],

d – zanurzenie statku [m],

V – prędkość statku [kts],

β – kąt nabiegu fali na statek [deg],

T – okres charakterystyczny fali [s],

Hs – wysokość znacząca fali [m],

A, B, C – macierze wartości wag sztucznej sieci neuronowej,

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ – współczynniki.

Na podstawie analizy statystycznej opracowano następujące zależności pozwalające na prognozowanie dodatkowego oporu na fali R:

(1.9)

(1.10)

gdzie:

R – wartość znacząca dodatkowego oporu na fali [kN],

B – szerokość wodnicy [m],

C_M – współczynnik pełnotliwości owręża [-],

H_S – wysokość znacząca fali [m].

W pracy [5] przeanalizowano dwa podejścia modelowania kołysań bocznych na fali nieregularnej:

1. modelowanie kołysań bocznych na fali regularnej i następnie obliczenie ich znaczących amplitud na fali nieregularnej,
2. bezpośrednie modelowanie kołysań bocznych na fali nieregularnej.

Z badań [5] wynika, że modelowanie kołysań bocznych w postaci funkcji przenoszenia zapewnia zadowalające wyniki jedynie w zakresie interpolacji. Natomiast drugi sposób daje dosyć dokładne rozwiązania zarówno w zakresie interpolacji jak i ekstrapolacji.

Ponadto metoda modelowania właściwości morskich na fali nieregularnej w porównaniu do modelowania właściwości morskich w postaci funkcji przenoszenia, charakteryzuje się:

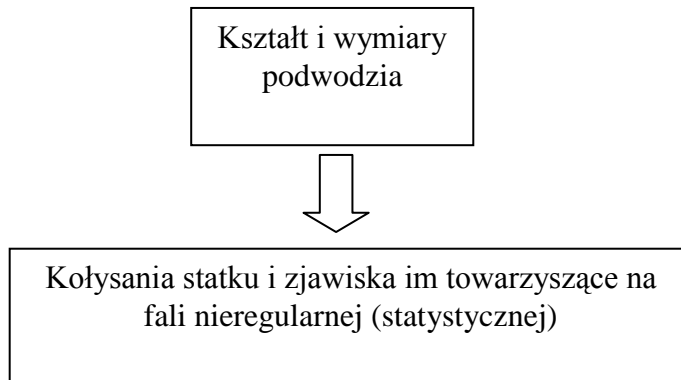
- prostszą strukturą, ponieważ nie ma konieczności prowadzenia dodatkowych obliczeń,
- opracowane zależności mogą być wykorzystane do opracowania wskazówek projektowych w postaci prostych wzorów,
- do opracowania modelu można wykorzystać wyniki obliczone metodami numerycznymi lub wyniki pomiarów właściwości morskich na statku.

W stosunku do metody modelowania właściwości morskich w postaci funkcji przenoszenia, wadą tej metody jest:

- brak możliwości wykorzystania opracowanych zależności do innych warunków falowania,
- większa liczba danych wejściowych (parametry falowania).

Przyjmując metodę modelowania właściwości morskich na fali statystycznej w warunkach operacyjnych opisanych scenariuszem deterministycznym można ustalić szereg parametrów opisujących:

- rozplanowanie przestrzenne statku,
- stan załadowania,
- ruch statku,
- warunki falowania (spektrum falowania, parametry fali nieregularnej).



Rys. 3.2 Wielkości wpływające na właściwości morskie na fali nieregularnej (statystycznej) w warunkach operacyjnych ustalonych scenariuszem deterministycznym (ustalone parametry opisujące stan załadowania, ruch statku, warunki falowania, rozplanowanie przestrzenne statku)

Takie podejście pozwala na znaczące zmniejszenie ilości zmiennych niezależnych i może wpłynąć na zwiększenie dokładności aproksymacji właściwości morskich. Niedogodnością tego modelu jest brak możliwości wykorzystania go do innych warunków operacyjnych. Dlatego, ważne w tym podejściu jest przyjęcie istotnych warunków operacyjnych.

4 Modelowanie właściwości morskich za pomocą wskaźnika efektywności operacyjnej (na określonej trasie żeglugowej)

Wskaźnik efektywności operacyjnej E_T oznacza prawdopodobieństwo, że ruchy statku na fali w określonych warunkach nie przekroczą dopuszczalnego poziomu. Wartość tego wskaźnika zależy m.in. od (rys. 4.1):

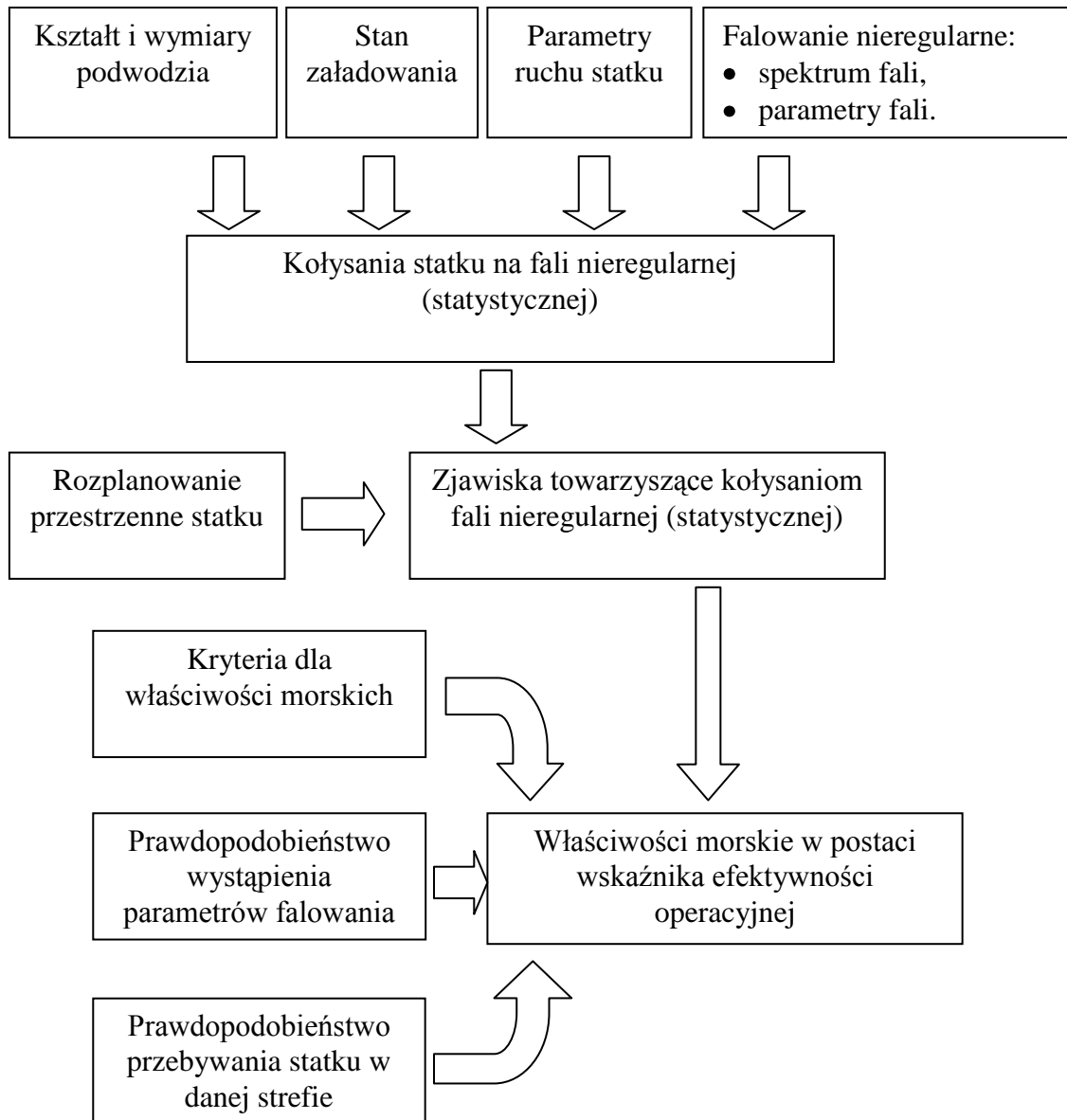
- wartości właściwości morskich na fali nieregularnej (statystycznej),
- kryteriów dla właściwości morskich,
- prawdopodobieństwa wystąpienia parametrów falowania i przebywania statku w określonej strefie.

Zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 4.1 do obliczenia właściwości morskich na fali nieregularnej (statystycznej) wymagane są takie dane jak:

- kształt i wymiary podwozia,
- rozplanowanie przestrzenne statku,
- stan załadowania,
- parametry ruchu statku,
- warunki falowania:
 - spektrum falowania,
 - parametry fali nieregularnej.

Wartości właściwości morskich na fali nieregularnej można obliczyć stosując:

- metody numeryczne bazujące np. na liniowej teorii kołysań,
- metody aproksymacyjne opisane w rozdziałach.



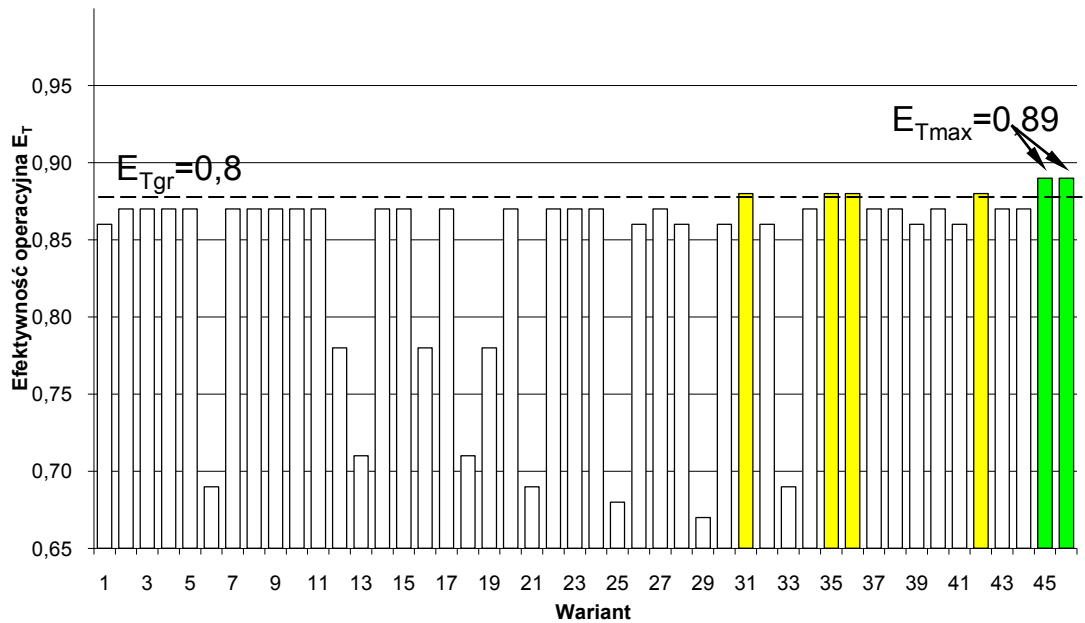
Rys. 4.1 Wielkości wpływające na właściwości morskie w postaci wskaźnika efektywności operacyjnej

W pracy [1] wykorzystano metodę aproksymacji kołysań przedstawionych za pomocą wskaźnika efektywności operacyjnej. W tych badaniach wykorzystano ten wskaźnik do wyboru wariantu projektu najlepszego pod kątem właściwości morskich i jednocześnie spełniającego ogólne kryteria projektowe. W celu spełnienia tego drugiego warunku przeprowadzono dwuetapowe badania.

W pierwszym etapie przeprowadzono wielokryterialną optymalizację parametrów projektowych przyjmując ogólne kryteria projektowe (techniczne i ekonomiczne) i opierając mechanizm optymalizacyjny na algorytmach genetycznych. W rezultacie przeprowadzonej optymalizacji uzyskano zbiór 46 rozwiązań kompromisowych Ω , który spełniał najważniejsze kryteria projektowe.

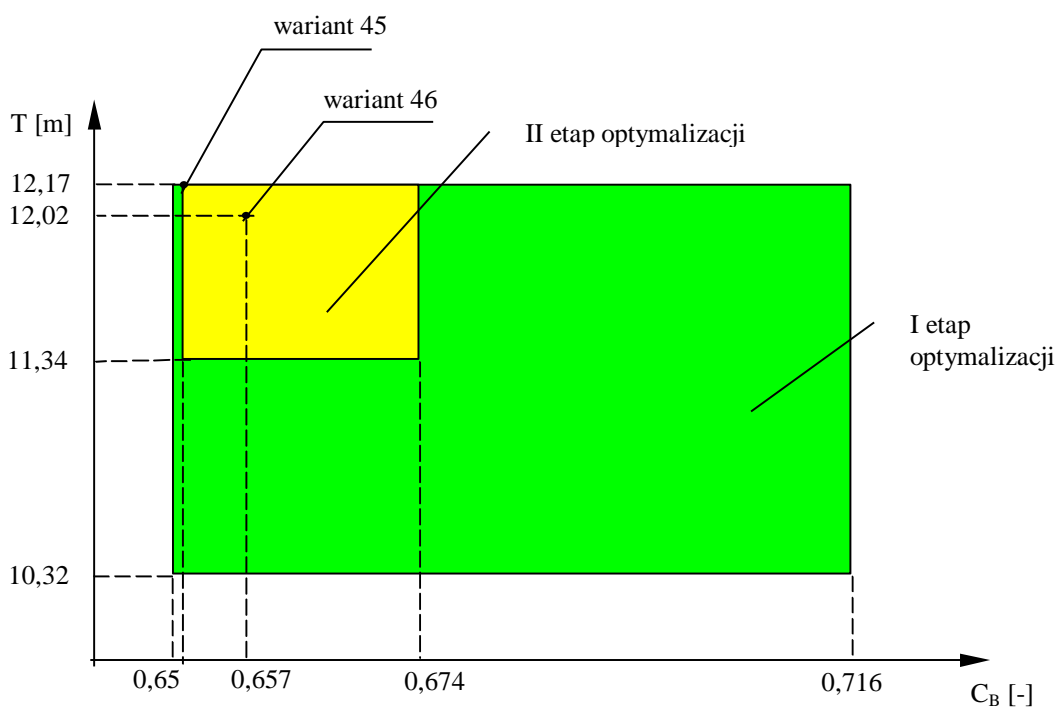
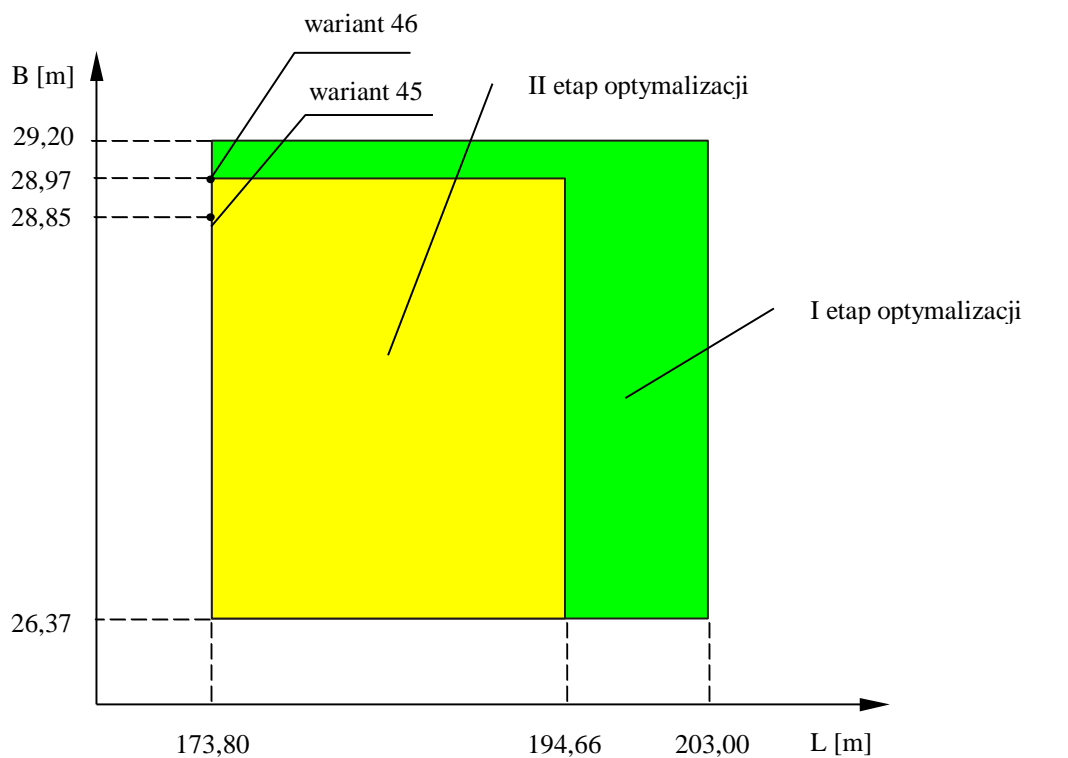
W drugim etapie przeprowadzono weryfikację zbioru Ω pod kątem optymalnych właściwości morskich projektowanego statku. Do oceny właściwości morskich wykorzystano wskaźnik efektywności operacyjnej statku E_T . Wartości statystyczne właściwości morskich aproksymowano wykorzystując metode przedstawiono w rozdziale „Modelowanie

właściwości morskich w postaci funkcji przenoszenia”. Następnie sprawdzono, który wariant projektowy charakteryzuje się najlepszymi właściwościami morskimi (rys. 4.2). Takie podejście pozwoliło zawęzić pole rozwiązań kompromisowych otrzymane z pierwszego etapu do pola rozwiązań z drugiego etapu i wybrać najlepsze rozwiązanie (rys. 4.3).



Rys. 4.2 Wartość wskaźnika efektywności operacyjnej statku E_T dla badanych wariantów, gdzie: E_{Tgr} – wskaźnik o wartości granicznej, E_{Tmax} – wskaźnik o wartości maksymalnej [5]

Badania [1] wykazały, że wykorzystanie aproksymacji kołysań statku na fali regularnej do obliczenia wskaźnika E_T znacznie upraszcza model obliczeniowy i może być wykorzystane do oceny określonych wariantów projektowych pod kątem właściwości morskich. Jednak takie podejście wiąże się z koniecznością przeprowadzenia wielu iteracji i tym samym nie może zostać wykorzystane w wielokryterialnych metodach optymalizacji z uwagi na zbyt skomplikowaną postać funkcji celu.



Rys. 4.3 Pole rozwiązań kompromisowych po pierwszym i drugim etapie optymalizacji parametrów projektowych statku, gdzie: L – długość, B – szerokość, T – zanurzenie konstrukcyjne, C_B – współczynnik pełnotliwości podwodzia [5]

W celu uproszczenia modelu obliczeniowego wskaźnika efektywności operacyjnej można ustalić szereg wielkości wpływających na ten wskaźnik. Do tych ustalonych wielkości można zaliczyć parametry opisujące:

- rozplanowanie przestrzenne statku,

- warunki operacyjne występujące na trasie żeglugi:
 - warunki falowania: spektrum falowania, parametry fali nieregularnej,
- parametry ruchu statku,
- prawdopodobieństwa wystąpienia parametrów falowania i przebywania statku w określonej strefie,
- kryteria dla właściwości morskich.

W ten sposób poszukiwana funkcja aproksymująca f wskaźnik efektywności operacyjnej E_T będzie zależała jedynie od parametrów opisujących kształt i wymiary podwozia oraz stan załadowania statku (rys. 4.4):

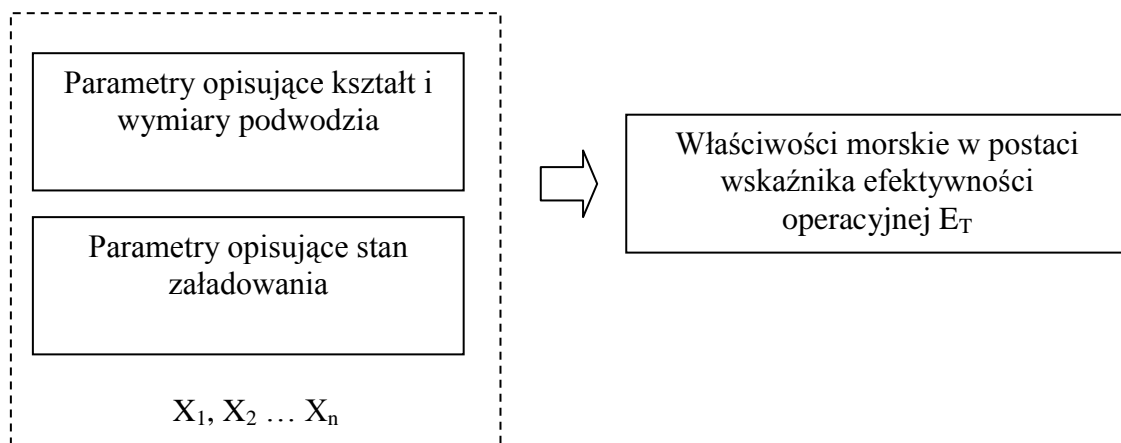
$$E_T = f(X_1, X_2 \dots X_n) \quad (1.1)$$

gdzie:

E_T – wskaźnik efektywności operacyjnej,

$X_1, X_2 \dots X_n$ – parametry opisujące kształt i wymiary podwozia oraz stan załadowania statku,

f – poszukiwana funkcja aproksymująca.



Rys. 4.4 Schemat blokowy aproksymacji wskaźnika właściwości morskich E_T , gdzie: $X_1, X_2 \dots X_n$ – parametry projektowe statku, E_T – wskaźnik efektywności operacyjnej

W powyższym modelu, funkcja aproksymująca f może dotyczyć wszystkich wybranych właściwości morskich lub też określonych kołysań lub zjawisk im towarzyszących (np. kołysania boczne lub slamming).

Aproksymacje f można opracować różnymi metodami. W pracy [1] opracowano funkcje aproksymujące wskaźnik E_T odnoszący się do:

- jednocześnie kołysań bocznych, slammingu, zalewania pokładu i wynurzania się śruby napędowej,
- jedynie kołysań bocznych,
- jedynie slammingu,
- jedynie zalewania pokładu,
- jedynie wynurzania się śruby napędowej.

Te funkcje opracowano przy użyciu sztucznych sieci neuronowych. Jako parametry projektowe statku przyjęto:

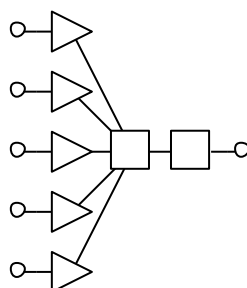
- długość,
- szerokość,
- zanurzenie konstrukcyjne,
- współczynnik pełnotliwości podwozia,

– poprzeczna początkowa wysokość metacentryczna.

W badaniach [1] najlepszą sztuczną siecią neuronową aproksymującą wskaźnik efektywności operacyjnej E_T dla wszystkich właściwości morskich okazała się sieć typu MLP o strukturze 5x1x1 (rys. 4.5) charakteryzująca się statystykami opisanymi w tabeli 4.1 .

Tabela 4.1. Statystyki zagadnień regresyjnych dla sieci neuronowej aproksymującej wskaźnik E_T

	uczenie	testowanie (interpolacja)	testowanie (ekstrapolacja)
współczynnik korelacji R	0,99	0,94	0,98
błąd RMS	0,017	0,018	0,021



Rys. 4.5 Struktura sztucznej sieci neuronowej typu MLP aproksymującej wskaźnik E_T

Tą funkcję aproksymującą przedstawiono w postaci analitycznej za pomocą równania:

$$E_T = \frac{1 + e^{\left(\frac{2,5614 - \left[\begin{matrix} 0,0088L-1,4110 \\ 0,0614B-1,4110 \\ 9,0909Cb-6,0909 \\ 0,4785GM_0-1,1531 \\ 5,5556T-1,2203 \end{matrix} \right] \times \begin{bmatrix} 0,6815 & -0,0286 & -0,1163 & 0,3014 & 2,3751 \end{bmatrix} - 0,1378 \right)}{5,5556}} + 4,1667 \quad (1.2)$$

gdzie:

L – długość statku,

B – szerokość statku,

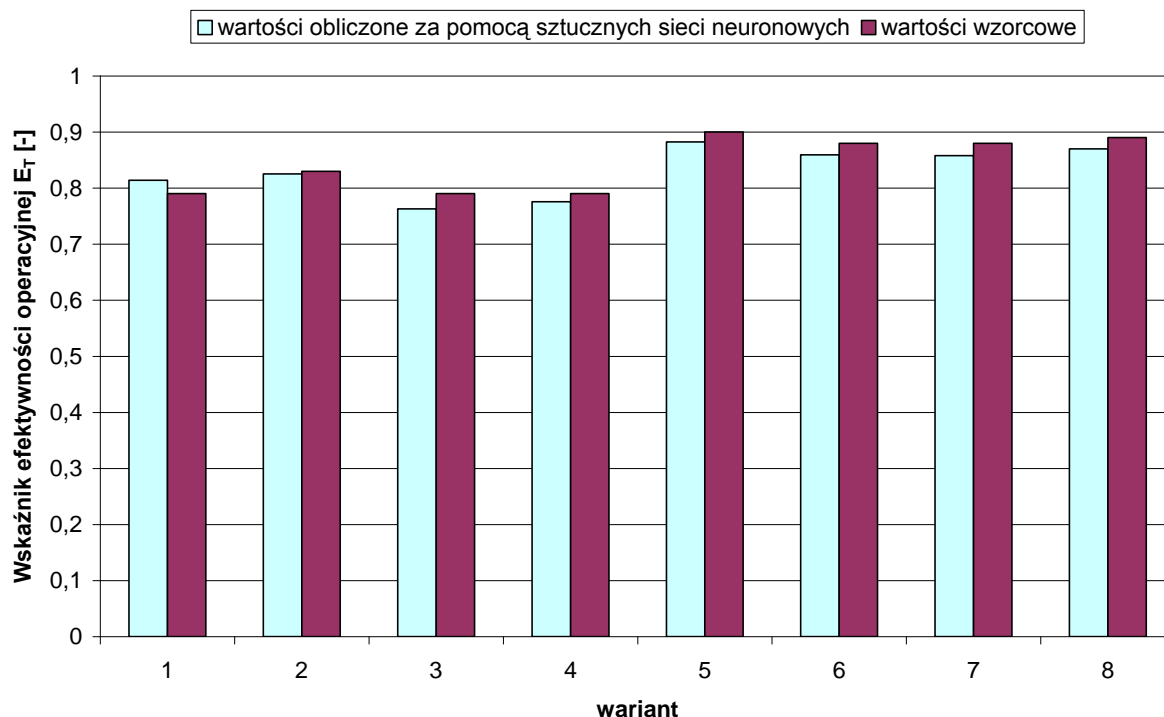
Cb – współczynnik pełnotliwości podwodzia,

GM_0 – poprzeczna początkowa wysokość metacentryczna,

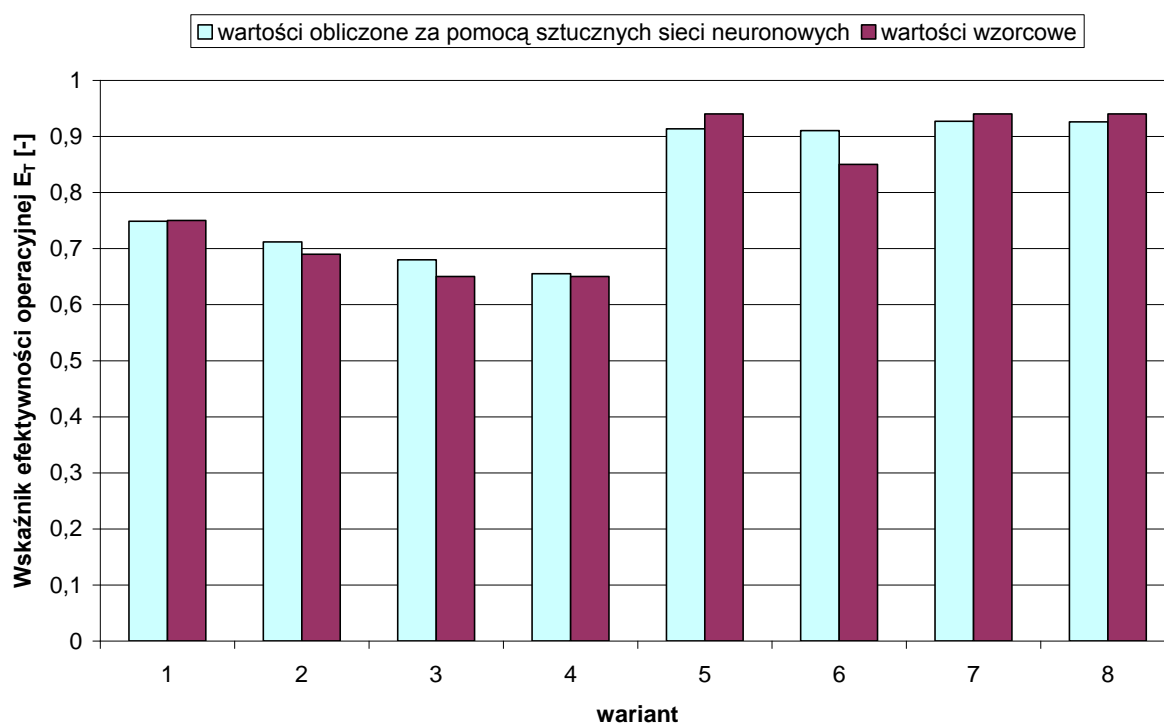
T – zanurzenie statku.

Z tabeli 4.1 oraz rysunków 4.6 i 4.7 wynika, że powyższa funkcja charakteryzuje się:

- dość dużą dokładnością zarówno w zakresie interpolacji jak i ekstrapolacji
- bardzo prostą strukturą.



Rys. 4.6 Interpolacja wskaźnika efektywności operacyjnej E_T dla wariantów testowych z tabeli 2



Rys. 4.7 Ekstrapolacja wskaźnika efektywności operacyjnej E_T dla wariantów testowych z tabeli 3

W tabeli 4.2 opisano sztuczne sieci neuronowe aproksymujące pozostałe wskaźniki efektywności dla takich właściwości morskich jak:

- kołysania boczne (E_{Troll}),
- slamming (E_{Tslam}),
- zalewanie pokładu (E_{Tgreen}),
- wynurzanie śruby napędowej (E_{Tprop}).

Wartości parametrów statystycznych wskazują na dosyć dużą dokładność aproksymacji tych sieci zarówno w zakresie interpolacji jak i ekstrapolacji. Powyższe funkcje aproksymujące również charakteryzują się dosyć prostą strukturą.

Tabela 4.2. Typy, struktura oraz parametry statystyczne sieci neuronowych aproksymujących wskaźniki efektywności operacyjnej: E_{Troll} - dla kołysań bocznych, E_{Tslam} - dla slammingu, E_{Tprop} - dla wynurzania śruby napędowej, E_{Tgreen} – dla wynurzania śruby napędowej, gdzie: R – korelacja, RMS – błąd sieci

parametr	typ sieci	struktura	parametr	uczenie	testowanie	
					interpolacja	ekstrapolacja
E_{Troll}	MLP	5x8x1	R	0,88	0,85	0,62
			RMS	0,015	0,031	0,035
E_{Tslam}	MLP	4x2x1	R	0,99	0,97	0,99
			RMS	0,003	0,016	0,013
E_{Tprop}	MLP	4x4x1	R	0,99	0,95	0,99
			RMS	0,005	0,021	0,019
E_{Tgreen}	MLP	4x3x1	R	0,99	0,98	0,99
			RMS	0,008	0,044	0,042

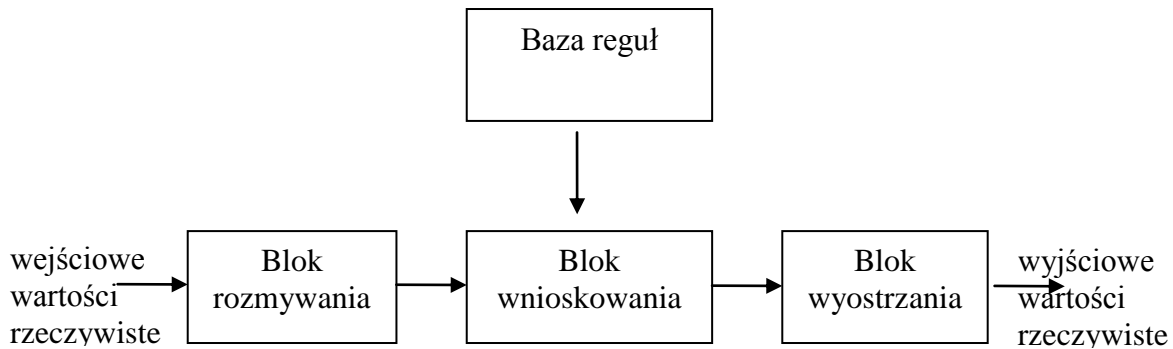
5 Modelowanie właściwości morskich za pomocą zmiennych lingwistycznych

W klasycznej logice każde zdanie przyjmuje dokładnie jedną spośród dwóch wartości logicznych: „prawda” lub „fałsz”. Z uwagi na to, że takie podejście nie uwzględnia stanów pośrednich, powstały pewne alternatywne systemy logiczne. Do takich systemów można zaliczyć np. stworzoną przez polskiego uczonego Jana Łukasiewicza logikę trójwartościową lub tzw. logikę rozmytą opracowaną przez profesora Lofti A. Zadeha.

Logika rozmyta jest w pewnym sensie uogólnieniem logiki klasycznej. Modeluje ona zjawiska wieloznaczne, nieprecyzyjne i czasami sprzeczne. W logice rozmytej między stanem 0 (fałsz) a stanem 1 (prawda) rozciąga się szereg wartości pośrednich, które określają stopień przynależności elementu do zbioru. Typowy proces wnioskowania rozmytego zachodzi w czterech etapach:

1. rozmywanie,
2. zastosowanie operacji rozmytych,
3. zastosowaniem implikacji rozmytych,
4. wyostrzanie (precyzowanie).

W pierwszym etapie dane wejściowe w postaci wartości rzeczywistych są zamieniane w zbiory rozmyte. Do wnioskowania rozmytego wykorzystuje się zmienne lingwistyczne, którym przyporządkowuje się pewne zbiory rozmyte. Zmienne lingwistyczne to takie zmienne, które przyjmują jako swoje wartości słowa lub zdania wypowiedziane w języku naturalnym. Przykładem może być stwierdzenie „mała prędkość”. Zmienne lingwistyczne mogą również przyjmować wartości liczbowe. W następnych etapach stosuje się operacje rozmyte i reguły wnioskowania rozmytego (reguły postępowania) w formie rozmytych zdań warunkowych typu „jeśli ... to ...”. Otrzymane w ten sposób wyniki ulegają wyostrzaniu co pozwala uzyskać konkretną odpowiedź systemu w postaci wartości rzeczywistej. Na rys. 5.1 przedstawiono schemat systemu (sterownika) rozmytego, który składa się z bloku rozmywania, bloku wnioskowania, bazy reguł i bloku wyostrzania.



Rys. 5.1 Schemat systemu rozmytego

Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do sterowania procesów technicznych nie wymaga znajomości modeli tych procesów. Dlatego logika rozmyta okazała się bardzo przydatna w zastosowaniach inżynierskich, między innymi w elektronicznych systemach sterowania (maszynami, pojazdami i automatami), zadaniach eksploracji danych czy też w budowie systemów ekspertowych. Metody logiki rozmytej wraz z algorytmami ewolucyjnymi i sieciami neuronowymi stanowią nowoczesne narzędzia do budowy inteligentnych systemów mających zdolności uogólniania wiedzy.

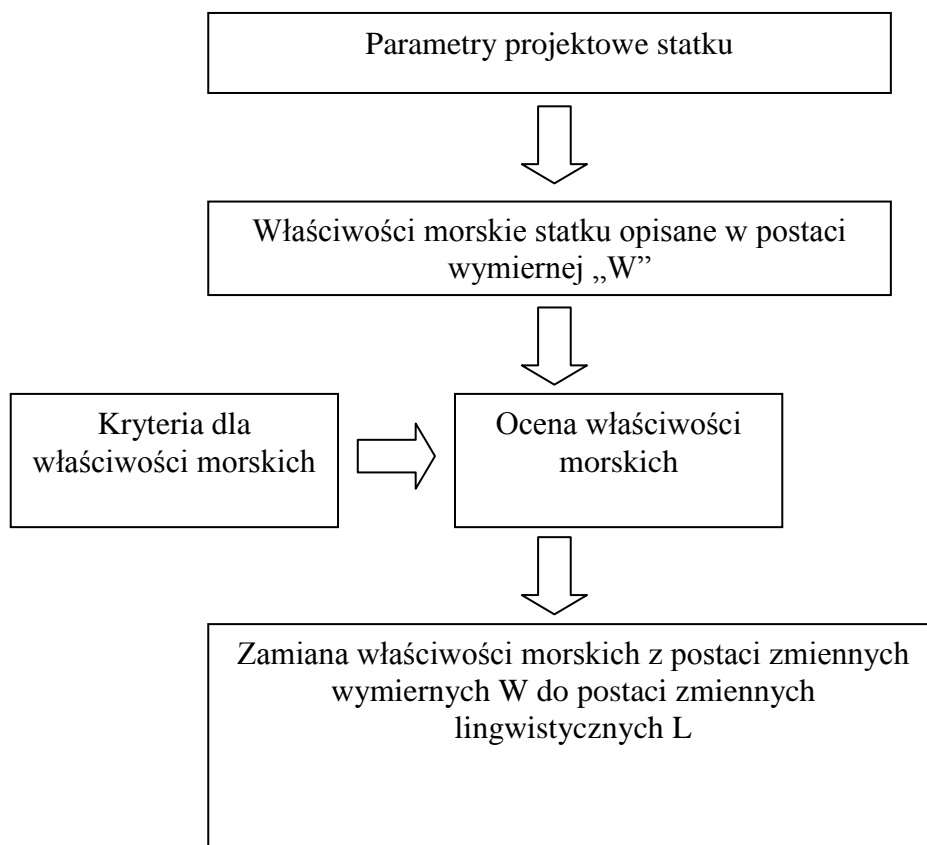
Logika rozmyta również jest wykorzystywana w okrętownictwie. Przykładowo w publikacji [16] wykorzystano zmienne lingwistyczne do opisu zachowania się statku na wodzie spokojnej. W pracy [21] wykorzystano logikę rozmytą do określania położenia środka ciężkości promu ro-ro. W publikacji [4] przedstawiono właściwości morskie w postaci zmiennych lingwistycznych opisujących intensywność kołysań i towarzyszących im zjawisk, natomiast w publikacji [10] wykorzystano elementy logiki rozmytej do wyboru optymalnego kształtu promu ro-ro.

Ocena właściwości morskich ma zwykle charakter opisowy, uznaniowy i nie zawsze jest ścisła. W praktyce eksploatacyjnej często formułuje się stwierdzenie, że dany statek ma „dobre” lub „złe” właściwości morskie. Podobne problemy związane są z opisem czynników, które wpływają na właściwości morskie. Wykorzystując systemy ekspertowe można przedstawić czynniki wpływające na właściwości morskie i właściwości morskie za pomocą zmiennych lingwistycznych. Stosując logikę rozmytą można opracować bazę reguł wnioskowania rozmytego i na tej podstawie prognozować właściwości morskich wyrażone w postaci lingwistycznej.

W publikacji [4] przeprowadzono analizę porównawczą dokładności aproksymacji właściwości morskich do postaci lingwistycznej i wymiernej. W celu porównania wyników wartości wymierne zamieniono na zmienne lingwistyczne. W ten sposób w badaniach przyjęto dwie metody:

1. aproksymacja właściwości morskich w postaci wymiernej i zamiana na postać lingwistyczną,
2. aproksymacja właściwości morskich do postaci lingwistycznej.

Na rys. 5.2 przedstawiono algorytm, w którym w pierwszej kolejności właściwości morskie są aproksymowane do postaci wymiernej (wartości parametru „W”) i następnie zamieniane na zmienną lingwistyczną L.



Rys. 5.2 Aproksymacja właściwości morskich do postaci wymiernej i konwersja do postaci lingwistycznej

Ten algorytm przebiega zgodnie z procedurą:

1. przyjęcie wartości parametrów projektowych statku X_1, X_2, \dots, X_n ,
2. aproksymacja właściwości morskich statku w postaci wymiernej „W”:

$$W = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1.3)$$

gdzie:

f – funkcja aproksymująca właściwości morskie,

X_1, X_2, \dots, X_n – parametry projektowe statku,

W – właściwości morskie statku przedstawione w postaci wymiernej,

3. ocena właściwości morskich – tj. porównanie wartości „W” z wartościami kryteriów dla właściwości morskich,
4. przedstawienie właściwości morskich za pomocą parametru „L” w postaci lingwistycznej:

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\} \quad (1.4)$$

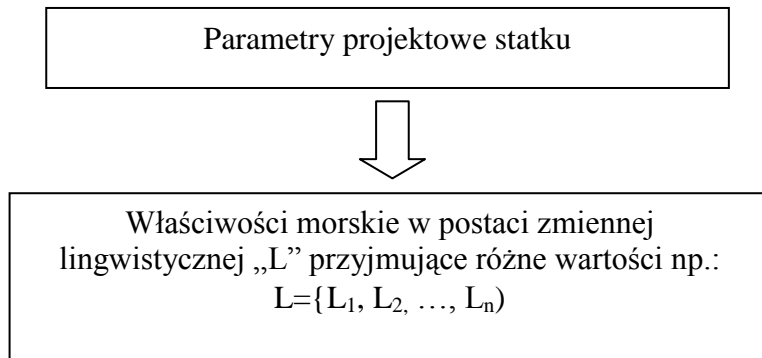
gdzie:

L – zmienna lingwistyczna,

L_1, L_2, \dots, L_n – wartości zmiennej lingwistycznej (np. „dobre”, „średnie”, „słabe” właściwości morskie).

Powyższe podejście wymaga opracowania funkcji aproksymującej f właściwości morskie do postaci wymiernej W .

Na rys. 5.3 przedstawiono drugie podejście polegające na aproksymacji właściwości morskich bezpośrednio do postaci lingwistycznej L .



Rys. 5.3 Aproksymacja właściwości morskich do postaci lingwistycznej

W tym algorytmie aproksymacja właściwości morskich statku w postaci lingwistycznej przebiega zgodnie z zależnością:

$$L = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1.5)$$

gdzie:

f – funkcja aproksymująca właściwości morskie,

X_1, X_2, \dots, X_n – parametry projektowe statku,

L – zmienna przyjmująca wartości lingwistyczne: $\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$.

W analizie wzięto pod uwagę:

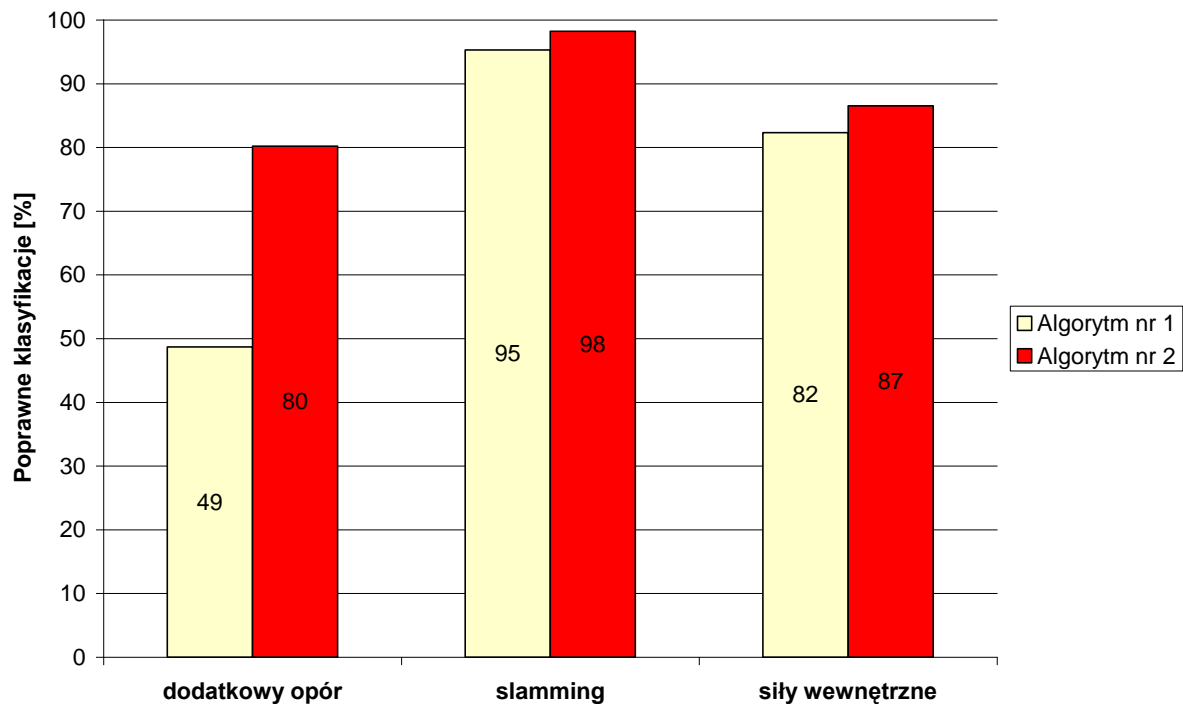
- dodatkowy przyrost oporu od fali,
- slamming,
- siły wewnętrzne na wybranych wręgach,

w zależności od parametrów ruchu statku i parametrów falowania.

Zmienna lingwistyczna przyjmowała następujące wartości:

- dodatkowy opór na fali:
 - „napór” – dla wartości dodatkowego oporu od fali R mniejszego od 0 kN
 - „brak oporu” – dla R do 30 kN,
 - „mały opór” – dla $R = 30 - 100$ kN,
 - „duży opór” – dla $R > 100$ kN,
- slamming:
 - „nie przekracza niebezpiecznego progu”,
 - „przekracza niebezpieczny próg”,
- siły wewnętrzne:
 - „nie przekraczają niebezpiecznego progu”,
 - „przekraczają niebezpieczny próg”.

Do aproksymacji wykorzystano sztuczne sieci neuronowe. Na rys. 5.4 przedstawiono ilość poprawnych klasyfikacji w stosunku do wartości wzorcowych dla obu powyższych algorytmów.



Rys. 5.4 Ilość poprawnych klasyfikacji w stosunku do wartości wzorcowych dla algorytmów: Algorytm 1 zgodnie z rys. 5.2, Algorytm 2 zgodnie z rys. 5.3

Z badań [4] wynika, że aproksymacja właściwości morskich w postaci zmiennych lingwistycznych przynosi dokładniejsze rozwiązanie. Wynikać to może z faktu, że na dokładność aproksymacji (czy też ekstrapolacji) wpływa zakres danych wyjściowych, który w przypadku przedstawiania właściwości morskich w postaci lingwistycznej jest węższy niż gdy właściwości morskie są przedstawiane w postaci wymiernej. W przypadku gdy zmienna lingwistyczna jest dwuwartościowa dokładność obydwu testowanych algorytmów jest zbliżona (z przewagą algorytmu nr 2). Natomiast w przypadku gdy zmienna lingwistyczna posiada więcej niż dwie wartości (dla dodatkowego oporu osiągała cztery wartości) dokładność algorytmu nr 2 wzrasta znacząco.

6 Podsumowanie

Przedstawione metody modelowania różnią się od siebie pod względem:

- zakresu danych wejściowych,
- sposobem opisu właściwości morskich,
- ograniczeniem poszczególnych metod.

W tabeli 56.1 przedstawiono porównanie danych wejściowych uwzględnianych w poszczególnych metodach modelowania. W tej tabeli w celu uproszczenia porównania spośród danych wejściowych wyłączono dane o parametrach projektowych statku. Z tej tabeli wynika, że:

1. wszystkie metody modelowania wymagają takich danych wejściowych jak:
 - a. parametry opisujące stan załadowania,
 - b. parametry ruchu statku,
2. modelowanie właściwości morskich za pomocą funkcji przenoszenia nie wymaga danych o falowaniu, kryteriów dla właściwości morskich i rozkładach prawdopodobieństwa różnych parametrów eksploatacyjnych na trasie żeglugi

3. modelowanie właściwości morskich na fali statystycznej wymaga dodatkowo danych o parametrach falowania ale nie wymaga danych o kryteriach dla właściwości morskich i rozkładach prawdopodobieństwa różnych parametrów eksploatacyjnych na trasie żeglugi,
4. modelowanie właściwości morskich w postaci zmiennych lingwistycznych dodatkowo wymaga danych o parametrach falowania i kryteriach dla właściwości morskich, ale nie wymaga danych o rozkładach prawdopodobieństwa różnych parametrów eksploatacyjnych na trasie żeglugi,
5. modelowanie właściwości morskich w postaci wskaźnika efektywności operacyjnej dodatkowo wymaga danych o:
 - a. parametrach falowania,
 - b. kryteriach dla właściwości morskich,
 - c. rozkładach prawdopodobieństwa różnych parametrów eksploatacyjnych na trasie żeglugi.

Tabela 6.1. Wymagane dane wejściowe w poszczególnych metodach modelowania

Dane wejściowe	Metoda modelowania właściwości morskich			
	za pomocą funkcji przenoszenia	na fali statystycznej	za pomocą zmiennych lingwistycznych	za pomocą wskaźnika efektywności operacyjnej
Parametry opisujące stan załadowania	X	X	X	X
Parametry ruchu statku	X	X	X	X
Parametry falowania	-	X	X	X
Kryteria dla właściwości morskich	-	-	X	X
Rozkłady prawdopodobieństwa różnych parametrów eksploatacyjnych na trasie żeglugi ¹	-	-	-	X

Uwzględnienie w poszczególnych modelach powyższych danych wiąże się z:

- ograniczeniem poszczególnych metod modelowania,
- uproszczeniem poszczególnych modeli pod kątem ilości zmiennych wejściowych i co się z tym wiąże postacią funkcji aproksymującej.

W tabeli 6.2 przedstawiono porównanie ograniczeń poszczególnych metod modelowania. Z tego porównania wynika, że:

- metodą modelowania, która jest najmniej ograniczona pod kątem ilości danych wejściowych jest metoda modelowania za pomocą funkcji przenoszenia,
- metodą modelowania, która wymaga największej ilości danych wejściowych i tym samym jest najbardziej ograniczona, jest metoda modelowania właściwości morskich za pomocą wskaźnika efektywności operacyjnej.

¹ Prawdopodobieństwo uwzględniające m.in.: występowanie falowania z danego kierunku o określonych parametrach statystycznych w określonej porze roku i na danym akwenu, przebywania statku oraz osiągnięcia przez statek założonej prędkości i założonego kursu na danym akwenu

Tabela 6.2. Ograniczenia poszczególnych metod modelowania

Ograniczenie	Metoda modelowania właściwości morskich			
	za pomocą funkcji przenoszenia	na fali statystycznej	za pomocą zmiennych lingwistycznych	za pomocą wskaźnika efektywności operacyjnej
Parametry falowania	X	-	-	-
Kryteria dla właściwości morskich	X	X	-	-
Rozkłady prawdopodobieństwa różnych parametrów eksploatacyjnych na trasie żeglugi ²	X	X	X	-

Wraz ze zwiększeniem ilości danych wejściowych w modelu zwiększa się stopień uproszczenia, zwiększają się ograniczenia i zmniejsza się uniwersalność modelu. Z drugiej strony wraz ze zwiększaniem ilości danych uwzględnianych w modelu, nie rozbudowuje się, i tym samym nie komplikuje się, model obliczeniowy. Na przykład obliczenie wskaźnika efektywności operacyjnej korzystając z aproksymacji właściwości morskich za pomocą funkcji przenoszenia jest bardziej złożone i bardziej skomplikowane niż aproksymowanie tego wskaźnika na podstawie parametrów projektowych (przy ustalonych pozostałych parametrach).

Oznacza to, że najbardziej ogólne modelowanie można wykorzystać do projektowania statków eksploatowanych w różnych, zmieniających się warunkach eksploatacyjnych. Natomiast dla statków, które są eksploatowane w określonych warunkach operacyjnych, lub które muszą charakteryzować się dobrymi właściwościami morskimi w określonych warunkach, można zastosować mniej ogólne metody modelowania. Warunkiem stosowalności przedstawionych metod modelowania w takim przypadku jest założenie istotnych (reprezentatywnych) warunków eksploatacyjnych.

7 Bibliografia

- [1] Cepowski T., Szelangiewicz T.: An approach to optimization of ship design parameters with accounting for seakeeping ability, Polish Maritime Research, Nr 4/2002
- [2] Cepowski T., Szelangiewicz T.: Application of Artificial Neural Networks to investigation of ship seakeeping ability, Part 1, Polish Maritime Research, Nr 3/2001
- [3] Cepowski T., Szelangiewicz T.: Application of Artificial Neural Networks to investigation of ship seakeeping ability, Part 2, Polish Maritime Research, Nr 4/2001
- [4] Cepowski T.: Application of artificial neural networks to approximation and identification of sea-keeping performance of a bulk carrier in ballast loading condition, Polish Maritime Research, No 4(54), Vol 14, 2007

² Prawdopodobieństwo uwzględniające m.in.: występowanie falowania z danego kierunku o określonych parametrach statystycznych w określonej porze roku i na danym akwenu, przebywania statku oraz osiągnięcia przez statek założonej prędkości i założonego kursu na danym akwenu

- [5]Cepowski T.: Application of statistical methods and artificial neural networks for approximating ship's roll in beam waves, Polish Maritime Research, No 2(44), Vol 12, 2005
- [6]Cepowski T.: Approximation of pitching motion of S-175 containership in irregular waves on the basis of ship's service parameters, Polish Maritime Research, No 1(47), Vol 13, 2006
- [7]Cepowski T.: Approximation of the index for assessing ships sea-keeping performance on the basis of ship design parameters, Polish Maritime Research, No 3(53), Vol 14, 2007
- [8]Cepowski T.: Badanie kołysań bocznych statku na założonej trasie żeglugi, Zeszyty Naukowe AM 2004,
- [9]Cepowski T.: Design Parameters Optimization of ROPAX Ferry Using Seakeeping Characteristics and Additional Wave Resistance, Problemy Eksploatacji
- [10]Cepowski T.: Determination of optimum Hull form for passenger car ferry with regard to its sea-keeping qualities and additional resistance in waves, Polish Maritime Research, No 2(56) 2008
- [11]Cepowski T.: Modelling of Added Wave Resistance on the basis of the Ship's Design Parameters, Monografia "Computer Systems Aiding Science and Engineering Work in Transport, Mechanics and Electrical Engineering", Wydział Transportu Politechniki Radomskiej, 2008
- [12]Cepowski T.: Modelling of green water ingress into holds of an open-top containership in its preliminary design phase, Polish Maritime Research, No 1(59) 2009 Vol 16
- [13]Cepowski T.: Numeryczne próby morskie uwzględniające właściwości morskie statku, Zeszyty Naukowe Nr 74, 2004,
- [14]Cepowski T.: On the modeling of car passenger ferryship design parameters with respect to selected sea-keeping qualities and additional resistance in waves, Polish Maritime Research, No 3(61) 2009 Vol 16
- [15]Lewis E.V.: Principles of Naval Architecture, Second Revision, Vol. 3, SNAME, 1989
- [16]Pietrzykowski Z., Szozda Z., "Linguistic variables in ship stability calculations of ro-ro passenger ferries", Marine Technology Transactions „Technika Morska”, Gdańsk, 2001
- [17]Schneekluth, H.; Bertram V.: Ship Design for Efficiency and Economy, Elsevier, 1998
- [18]Szelangiewicz 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
- [19]Szelangiewicz T., Żelazny K.: Calculation of the mean long-term service speed of transport ship, Part I Resistance of ship sailing on regular shipping route, Polish Maritime Research, No 4/2006
- [20]Szozda Z.: A concept of Ship Stability Criteria Based on Cargo Shift Caused by Rolling due to Gust, Zeszyty Naukowe Nr 2(74), Akademia Morska w Szczecinie, 2004
- [21]Szozda Z.: "Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do oceny stateczności statku", praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2000 r.